



اتاق بازرگانی صنایع معادن و کشاورزی ایران



مرکز ملی مطالعات راهبردی کشاورزی و آب

سیاست‌ها و راهبردهایی برای کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای در بخش کشاورزی ایران

شناسنامه گزارش

عنوان: سیاست‌ها و راهبردهایی برای کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای در بخش کشاورزی ایران
تهیه کننده: کوروش صادق‌زاده مسئول پروژه: ساناز محمدی ناظران علمی: فریبرز عباسی، محمدصادق احدی تاریخ انتشار: خرداد ۱۴۰۴
طبقه بندی موضوعی: آب واژه های کلیدی: گازهای گلخانه‌ای، گرمایش جهانی، تغییر اقلیم، سیاهه انتشار، جذب کربن، تخمیر روده‌ای متان، راهکارهای کاهش.
نشانی: تهران، خیابان طالقانی، نبش خیابان موسوی (فرست)، پلاک ۱۷۵

بسمه تعالی



مرکز ملی مطالعات راهبردی کشاورزی و آب

عنوان گزارش:

**سیاست‌ها و راهبردهایی برای کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای در بخش
کشاورزی ایران**

تهیه کننده/گان:

کوروش صادق زاده

خرداد ۱۴۰۴

چکیده

گازهای گلخانه‌ای دی‌اکسید کربن، متان، اکسید نیتروژن و گازهای F با جذب و بازتابش پرتوهای گرمایی، نقشی کلیدی در افزایش دمای زمین و تشدید تغییرات اقلیمی ایفا می‌کنند. بخش کشاورزی از طریق فرآیندهای کاشت و برداشت، تخمیر روده‌ای دام‌ها، استفاده از کودهای شیمیایی و آلی، شالیکاری و مصرف انرژی سهم قابل توجهی در انتشار این گازها دارد. با توجه به نقش مؤثر کشاورزی در انتشار گازهای گلخانه‌ای، اتخاذ راهکارهای مدیریتی و فناوریانه در این حوزه ضروری است. گزارش حاضر میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای در بخش کشاورزی ایران را بررسی کرده و فرصت‌های کاهش آن را شناسایی کرده است. بررسی‌های انجام‌شده نشان می‌دهد که بخش کشاورزی ایران سهم قابل توجهی در انتشار گازهای گلخانه‌ای دارد. میزان عمده انتشار در بخش کشاورزی ایران از منابع کودهای شیمیایی و آلی (حدود ۱۸/۳ میلیون تن معادل CO₂)، تخمیر روده‌ای دام‌ها (۲۰ میلیون تن معادل CO₂)، مصرف برق معادل ۱۴/۳ درصد از کل برق کشور (۱۹ میلیون تن معادل CO₂)، مصرف گاز طبیعی معادل ۲ درصد از گاز مصرفی کشور (۱۱ میلیون تن معادل CO₂)، مصرف سوخت‌های فسیلی شامل ۵۰ هزار بشکه گازوئیل در روز برای ماشین‌آلات کشاورزی (۸ میلیون تن معادل CO₂) و شالیزارها (با وسعت ۷۹۰ هزار هکتار حدود یک میلیون تن معادل CO₂) در مجموع ۷۸ میلیون تن می‌باشد. همچنین، انتشار غیرمستقیم ناشی از آزادسازی کربن خاک، چرای دام‌ها و سوزاندن بقایای گیاهی نیز حدود ۲۵ میلیون تن معادل CO₂ برآورد شده است. بنابراین در مجموع انتشار گازهای گلخانه‌ای بخش کشاورزی ایران حدود ۱۰۳ میلیون تن معادل CO₂ برآورد می‌شود؛ که معادل ۱۰ درصد از کل انتشار کشور است. یافته‌های این گزارش نشان می‌دهد که ارزیابی‌های قبلی از سهم بخش کشاورزی در انتشار گازهای گلخانه‌ای در ایران به‌طور قابل توجهی کمتر از واقع بوده و نیازمند بازنگری و توجه ویژه در سیاست‌گذاری‌های ملی است.

ناهمخوانی‌های بسیاری میان داده‌های اندازه‌گیری شده بزرگ مقیاس صحرایی و میزان انتشار گزارش شده توسط نهادهای رسمی مانند IPCC و UNFCCC که به ندرت داده‌های اندازه‌گیری شده را به کار می‌برد، هست. این ناهمخوانی‌ها در هر دو سطح جهانی و ملی و برای همه منابع انتشار وجود دارد. بسیاری از گزارش‌های آرسالی رسمی گازهای گلخانه‌ای به UNFCCC برای سال‌ها به روزرسانی نشده‌اند (مانند ایران که تازه‌ترین گزارش انتشار گازهای گلخانه‌ای در سال ۲۰۱۰ انجام شده است) و حتی برای آن‌هایی که شده‌اند بسیاری هنوز به اندازه کافی دقیق نیستند تا نمای روشنی از انتشار گازهای گلخانه‌ای بدهند. یکی از توصیه‌های این پژوهش آن است که تا آنجایی که می‌شود از اندازه‌گیری‌های صحرایی بزرگ مقیاس برای گزارش انتشار گازهای گلخانه‌ای استفاده شود و به برآوردهای تقریبی IPCC و UNFCCC اکتفا نشود.

افزایش انتشار گازهای گلخانه‌ای تأثیرات عمیق و فزاینده‌ای بر اقلیم جهانی داشته که از جمله آن‌ها می‌توان به افزایش ۱/۶ درجه‌ای دمای میانگین زمین، ذوب یخچال‌ها، کاهش یا افزایش غیرمتعادل بارش‌ها، تبخیر بیشتر، خشک شدن منابع سطحی و افت شدید منابع آب زیرزمینی اشاره کرد. با این حال، ایران و بسیاری از کشورهای مشابه از جمله هند، مکزیک، ترکیه، پاکستان و مصر، در بازه ۲۰۰۵ تا ۲۰۲۳ نه تنها موفق به کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای نشدند، بلکه روندی افزایشی داشته‌اند. در مقابل، ایالات متحده با تدوین و اجرای سیاست‌های مؤثری همچون «لایحه مزرعه» و «قانون کاهش تورم»، انتشار گازهای گلخانه‌ای خود را در این بازه کاهش داده است. در این راستا، پیشنهاد می‌شود اتاق بازرگانی ایران با الگوبرداری از تجارب موفق جهانی، طرحی قانونی را به مجلس ارائه دهد که در آن در صد مشخصی از تولید ناخالص داخلی به سیاست‌های کاهش گازهای گلخانه‌ای در بخش‌های مختلف، به‌ویژه کشاورزی، اختصاص یابد همان‌طور که به توسعه صنعت کم‌کربن در قانون برنامه هفتم توسعه اشاره شده است.

برخی کشورها با تمرکز بر به کارگیری انرژی‌های تجدیدپذیر و افزایش کارایی انرژی، انتشار گازهای گلخانه‌ای در بخش کشاورزی را کاهش داده‌اند؛ اقداماتی مانند جایگزینی پمپ‌های سنتی (هند)، استفاده از انرژی خورشیدی و بادی، و تولید کودهای نیتراتی با انرژی پاک در این مسیر مؤثر بوده‌اند. اجرای این فناوری‌ها نیازمند حمایت دولت، مشارکت بخش خصوصی و توسعه پژوهش‌های مرتبط است. هرچند در ایران محدودیت‌های زیرساختی وجود دارد، اما با برنامه‌ریزی تدریجی می‌توان به سمت این اهداف حرکت کرد.

کاربرد ناکارآمد کودهای نیتراتی یکی از منابع اصلی انتشار گازهای گلخانه‌ای در بخش کشاورزی است، به‌ویژه در کشورهای مانند ایران که کارایی مصرف نیتروژن پایین دارند. برای کاهش این انتشار، راهکارهایی مانند تولید و مصرف کودهای با رهايش کنترل‌شده (اوره با پوشش گوگردی)، اصلاح الگوی مصرف کودهای نیتراتی (کاربرد به مقدار کم ولی به دفعات مکرر)، خصوصی سازی کارخانه‌های تولید کود، الزام به تولید کودهای با کارایی بالا و حمایت از تحقیقات در زمینه بازدارندگی زیستی نیترات‌زایی و حمایت مالی از پژوهشگران و کشاورزان نوآور می‌تواند گذار به کشاورزی کم‌کربن را تسهیل کند.

یکی از اقدامات مؤثر دیگر برای کاهش گازهای گلخانه‌ای در بخش کشاورزی، افزایش جذب کربن در خاک است. گرچه روش‌هایی مانند کشاورزی بدون خاک‌ورزی پیش‌تر مؤثر تصور می‌شدند، اما شواهد جدید نشان داده‌اند که این روش‌ها در ذخیره‌سازی پایدار کربن، به‌ویژه در ژرفای پایین خاک کارایی چندانی ندارند. همچنین، استفاده از مالچ و بقایای گیاهی نیز به دلیل چالش‌هایی مانند رقابت با خوراک دام و کمبود نیتروژن برای تجزیه (به دلیل نسبت کربن به نیتروژن بالا) با محدودیت مواجه است. در مقابل، دارکشت‌ورزی به عنوان یک راهکار پایدار با تلفیق درختان، گیاهان زراعی و دام نه تنها ظرفیت ذخیره‌سازی کربن را افزایش می‌دهد بلکه مزایای اقتصادی، زیست‌محیطی و بهره‌وری قابل توجهی نیز به همراه دارد.

تولید متان از تخمیر روده‌ای دام‌ها مهم‌ترین منبع انتشار گازهای گلخانه‌ای بخش کشاورزی است. استفاده از واکسن‌ها و میکروب‌های به‌گزینی‌شده می‌تواند به کاهش متان و افزایش بهره‌وری گوشت و شیر کمک کند اما مقاومت باکتری‌های روده‌ای در برابر این روش‌ها یک چالش جدی است. در ایران، به دلیل غالب بودن دامداری‌های سنتی اجرای این فناوری‌ها محدود است؛ بنابراین باید با تبدیل تدریجی این واحدها به دامداری‌های صنعتی و حمایت از روش‌هایی مانند افزودنی‌های NOP3 از طریق یارانه و پژوهش‌های هدفمند، انتشار متان را کاهش داد.

با وجود سهم اندک شالیزارهای ایران در انتشار جهانی گازهای گلخانه‌ای، اقداماتی مانند افزایش عملکرد بدون افزایش سطح زیرکشت، جایگزینی سوزاندن برنج با رهاسازی بقایای آن بر سطح خاک و کاهش سطح آب در شالیزارها می‌تواند به کاهش انتشار متان کمک کند. با این حال، برای جلوگیری از افزایش احتمالی اکسید نیتروز در نتیجه کاهش سطح آب، استفاده هم‌زمان از بازدارنده‌های نیترات‌زایی ضروری است.

در مجموع، کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای در بخش کشاورزی مستلزم یک رویکرد جامع است که در آن اصلاح الگوی مصرف نهاده‌ها و ساختار تولید آن‌ها، توسعه زیرساخت‌های انرژی‌های تجدیدپذیر و حمایت‌های قانونی، مالی و پژوهشی از فناوری‌های کم‌کربن، در اولویت سیاست‌گذاری‌های ملی قرار گیرد.

کلمات کلیدی: گازهای گلخانه‌ای، گرمایش جهانی، تغییر اقلیم، سیاهه انتشار، جذب کربن، تخمیر روده‌ای متان، راهکارهای کاهش.

فهرست مطالب

۱- گازهای گلخانه‌ای.....	۱۲
۲-۱ انتشار گازهای گلخانه‌ای:.....	۲۰
۲-۲ معادل دی‌اکسیدکربن (CO_2eq).....	۲۰
۲- روش‌های برآورد، پایش و اندازه‌گیری گازهای گلخانه‌ای.....	۲۶
۲-۱ پایش نوسان‌های CO_2 اتمسفر.....	۲۶
۲-۲ انواع انتشار CO_2 اتمسفر.....	۲۷
۲-۳ فناوری‌های پایش CO_2 اتمسفر.....	۲۷
۲-۳-۱ تصویرگر حرارتی اصلاح شده.....	۲۸
۲-۳-۲ طیف سنج لیزری دیود قابل تنظیم (TDL).....	۲۸
۲-۳-۳ پایشگر انتشار پیوسته.....	۲۹
۲-۴ اندازه‌گیری و پایش انتشار متان.....	۳۰
۲-۴-۱ روش‌های از پایین به بالا برای اندازه‌گیری انتشار متان.....	۳۱
۲-۴-۲ روش‌های پایین به بالا برای اندازه‌گیری انتشار متان در بخش کشاورزی.....	۳۵
۲-۴-۳ جایگاه‌های دفن پسماند.....	۴۰
۲-۴-۴ روش‌های بالا به پایین برای اندازه‌گیری انتشار متان.....	۴۳
۲-۴-۵ برآورد انتشار متان از پایش بالا به پایین.....	۴۷
۲-۴-۶ همسنجی رویکردهای پایین به بالا و بالا به پایین.....	۵۲
۲-۵ روش‌های برآورد اکسید نیتروز.....	۵۵
۲-۵-۱ روش‌های اندازه‌گیری اکسید نیتروز.....	۵۷
۲-۵-۲ روش‌های تحلیلی.....	۵۹
۲-۵-۳ روش‌های جدید در حال توسعه.....	۶۶
۳- برآورد انتشار گازهای گلخانه‌ای در بخش کشاورزی ایران.....	۷۱
۳-۱ برآورد انتشار گازهای گلخانه‌ای در بخش‌های انرژی و کشاورزی ایران.....	۷۲
۴- راهبردهای کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای در بخش کشاورزی.....	۷۸
۴-۱ سیاست‌ها و راهبردهای کاهشی کشورهای مورد بررسی.....	۷۹
۴-۱-۱ هند.....	۷۹
۴-۱-۲ مکزیک.....	۸۲
۴-۱-۳ ترکیه.....	۸۲
۴-۱-۴ پاکستان.....	۸۵
۴-۱-۵ مصر.....	۸۶
۴-۲ سیاست‌ها و راهبردهای کاهشی آمریکا.....	۸۷
۴-۲-۱ لایحه مزرعه (Farm Bill).....	۸۷

۴-۲-۲	قانون کاهش تورم (Inflation Reduction Act)	۸۹
۴-۳	سیاست‌های پیشنهادی برای کاهش گازهای گلخانه‌ای	۹۰
۴-۴	راهبردهای کاهش پیشنهادی برای کاهش گازهای گلخانه‌ای	۹۱
۴-۴-۱	افزایش کارایی انرژی در بخش کشاورزی با به کارگیری منابع انرژی تجدید پذیر	۹۱
۴-۴-۲	کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای با افزایش کارایی کاربرد نیتروژن (NUE در زمین‌های کشاورزی)	۹۲
۴-۴-۳	گزینه‌های واقع گرایانه برای افزایش جذب کربن در خاک	۹۳
۴-۴-۴	به کارگیری شیوه‌های مدیریتی و گونه‌هایی از برنج که گازهای گلخانه‌ای کمتری درشالیزارمنتشر می‌کنند	۹۴
۴-۴-۵	به کارگیری فناوری‌های نوین در کاهش تخمیر رودهای دام‌ها در کشاورزی	۹۵
۴-۵	بررسی هزینه روش‌های کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای	۹۶
۹۷	سخن پایانی	
۹۹	منابع	
۱۲۰	پیوست	

فهرست جدول‌ها

- جدول ۱- کشورهایی که بیشترین تولید انرژی را در سال ۲۰۲۲ داشتند [۹]..... ۱۳
- جدول ۲- کشورهایی که بیشترین مصرف انرژی را در سال ۲۰۲۲ داشتند [۹]..... ۱۴
- جدول ۳- کشورهایی که بیشترین تولید گاز را در سال ۲۰۲۲ داشتند [۹]..... ۱۴
- جدول ۴- کشورهایی که بیشترین مصرف گاز را در سال ۲۰۲۲ داشتند [۹]..... ۱۵
- جدول ۵- کشورهایی که بیشترین تولید برق را در سال ۲۰۲۲ داشتند [۹]..... ۱۵
- جدول ۶- کشورهایی که بیشترین مصرف برق را در سال ۲۰۲۲ داشتند [۹]..... ۱۶
- جدول ۷- کشورهایی که بیشترین تولید نفت را در سال ۲۰۲۲ داشتند [۹]..... ۱۶
- جدول ۸- کشورهایی که بیشترین مصرف نفت را در سال ۲۰۲۲ داشتند [۹]..... ۱۶
- جدول ۹- کشورهایی که بیشترین تولید برق سالانه در ۲۰۲۲ را داشتند (تراوات ساعت در سال) [۱۳]..... ۱۷
- جدول ۱۰- سهم کشورهایی که بیشترین تولید برق سالانه در ۲۰۲۲ را داشتند (تراوات ساعت در سال) [۱۳]... ۱۸
- جدول ۱۱- انتشار گازهای گلخانه‌ای در بخش‌های مختلف اقتصاد ایران در سال‌های ۱۹۹۰ و ۲۰۲۰ (تن معادل دی اکسید کربن) و نرخ تغییر آنها [۱۵]..... ۲۰
- جدول ۱۲- میزان و سهم بخش کشاورزی و کل بخش‌های مختلف اقتصاد در انتشار کل گازهای گلخانه‌ای (میلیون تن معادل دی اکسید کربن) [۱۵]..... ۲۲
- جدول ۱۳- میزان انتشار گاز دیاکسید کربن بخش‌های مختلف اقتصاد ایران و جهان (میلیون تن معادل دی اکسید کربن) [۱۵]..... ۳۰
- جدول ۱۴- میزان و سهم بخش کشاورزی و کل بخش‌های مختلف اقتصاد در انتشار گاز متان (میلیون تن معادل دی اکسید کربن) [۱۵]..... ۵۳
- جدول ۱۵- میزان و سهم بخش کشاورزی و کل بخش‌های مختلف اقتصاد در انتشار گاز اکسید نیتروز (میلیون تن معادل دی اکسید کربن) [۱۵]..... ۶۹
- جدول ۱۶- برآورد میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای از بخش‌های مختلف کشاورزی ایران (میلیون تن معادل دی اکسید کربن)..... ۷۵
- جدول ۱۷- تولید فرآورده‌های کشاورزی گوناگون و ارزش آنها در اقتصاد کلان ایران [۲۸۸]..... ۷۸
- جدول ۱۸- سهم کشاورزی، صنعت و خدمات در تولید ناخالص داخلی اسمی (بیلیون دلار) چند کشور..... ۷۸
- جدول ۱۹- مقایسه سناریوی پایه، سناریوی کاهش انتشار و میزان واقعی انتشار گازهای گلخانه‌ای ترکیه (میلیون تن معادل دی اکسید کربن) [۲۹۶]..... ۸۳

فهرست شکل‌ها

- شکل ۱- انتشار گازهای گلخانه‌ای در بخش‌های مختلف اقتصاد جهانی در بازه زمانی ۲۰۲۳ - ۱۹۷۰ [۸]..... ۱۳
- شکل ۲- سهم گازهای گلخانه‌ای گوناگون در جهان در بازه زمانی ۲۰۲۲ - ۱۹۹۰ [۱۴]..... ۱۸
- شکل ۳- سهم کشورهای گوناگون در انتشار گازهای گلخانه‌ای در جهان در ۲۰۲۲ [۱۴]..... ۱۹
- شکل ۴- انتشار گازهای گلخانه‌ای در بخش‌های مختلف اقتصاد ایران در بازه زمانی ۱۹۹۰ و ۲۰۲۰ (میلیون تن معادل دی‌اکسیدکربن) [۱۵]..... ۲۳
- شکل ۵- سهم بخش‌های مختلف کشاورزی آمریکا در انتشار گازهای گلخانه‌ای در سال ۲۰۲۱ [۱۶]..... ۲۴
- شکل ۶- انتشار گاز دی‌اکسید کربن در بخش‌های مختلف اقتصاد ایران در بازه زمانی ۱۹۹۰ و ۲۰۲۰ (میلیون تن)..... ۳۰
- شکل ۷- انتشار متان در بخش‌های مختلف اقتصاد جهان در بازه زمانی ۱۹۹۰ و ۲۰۲۰ (معادل دی‌اکسید کربن)..... ۵۴
- شکل ۸- انتشار متان در بخش‌های مختلف اقتصاد ایران در بازه زمانی ۱۹۹۰ و ۲۰۲۰ (معادل دی‌اکسید کربن)..... ۵۴
- شکل ۹- مسیرهای میکروبی تولید N_2O (a) تولید N_2O از طریق نیترات‌زایی از طریق هیدروکسیل آمین (b) تولید N_2O از طریق نیتریفیکاسیون نیتریفایر. شکل اصلاح شده از [۱۹]..... ۵۵
- شکل ۱۰- انتشار اکسید نیتروز در بخش‌های مختلف اقتصاد جهان در بازه زمانی ۱۹۹۰ و ۲۰۲۰ (معادل دی‌اکسید کربن)..... ۶۸
- شکل ۱۱- انتشار اکسید نیتروز در بخش‌های مختلف اقتصاد ایران در بازه زمانی ۱۹۹۰ و ۲۰۲۰ (معادل دی‌اکسید کربن)..... ۶۸
- شکل ۱۲- سهم مصرف گاز طبیعی در بخش‌های مختلف اقتصاد ایران..... ۷۴
- شکل ۱۳- افزایش تجمعی میانگین دمای زمین در بازه زمانی ۱۸۵۱ - ۲۰۲۱ [۱۵]..... ۷۶
- شکل ۱۴- برآورد میزان انتشار کل گازهای گلخانه‌ای ترکیه در دو سناریو پایه و کاهش انتشار با لحاظ LULUCF (میلیون تن دی‌اکسیدکربن معادل)..... ۸۳
- شکل ۱۵- اثرات هزینه‌ای مستقیم لایحه مزرعه (۲۰۱۸)..... ۸۷
- شکل ۱۶- نمونه‌ای از اجرای دارکشتورزی..... ۹۴
- شکل ۱۷- نمودار هزینه کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای جهانی فراتر از وضع موجود [۳۱۴]..... ۹۷
- شکل ۱۸- انتشار گازهای گلخانه‌ای در بخش‌های مختلف اقتصاد ترکیه در بازه زمانی ۱۹۹۰ و ۲۰۲۰ (میلیون تن معادل دی‌اکسیدکربن) [۱۵]..... ۱۲۱
- شکل ۱۹- انتشار گازهای گلخانه‌ای در بخش‌های مختلف اقتصاد پاکستان در بازه زمانی ۱۹۹۰ و ۲۰۲۰ (میلیون تن معادل دی‌اکسیدکربن) [۱۵]..... ۱۲۲
- شکل ۲۰- انتشار گازهای گلخانه‌ای در بخش‌های مختلف اقتصاد مصر در بازه زمانی ۱۹۹۰ و ۲۰۲۰ (میلیون تن معادل دی‌اکسیدکربن) [۱۵]..... ۱۲۳
- شکل ۲۱- انتشار گازهای گلخانه‌ای در بخش‌های مختلف اقتصاد مکزیک در بازه زمانی ۱۹۹۰ و ۲۰۲۰ (میلیون تن معادل دی‌اکسیدکربن) [۱۵]..... ۱۲۴
- شکل ۲۲- انتشار گازهای گلخانه‌ای در بخش‌های مختلف اقتصاد هند در بازه زمانی ۱۹۹۰ و ۲۰۲۰ (میلیون تن معادل دی‌اکسیدکربن) [۱۵]..... ۱۲۴

- شکل ۲۳- انتشار گاز دی اکسید کربن در بخش‌های مختلف اقتصاد ترکیه در بازه زمانی ۱۹۹۰ و ۲۰۲۰ (میلیون تن)
۱۲۵
- شکل ۲۴- انتشار گاز دی اکسید کربن در بخش‌های مختلف اقتصاد پاکستان در بازه زمانی ۱۹۹۰ و ۲۰۲۰ (میلیون تن)
۱۲۶.....
- شکل ۲۵- انتشار گاز دی اکسید کربن در بخش‌های مختلف اقتصاد مصر در بازه زمانی ۱۹۹۰ و ۲۰۲۰ (میلیون تن)
۱۲۶.....
- شکل ۲۶- انتشار گاز دی اکسید کربن در بخش‌های مختلف اقتصاد مکزیک در بازه زمانی ۱۹۹۰ و ۲۰۲۰ (میلیون تن)
۱۲۷
- شکل ۲۷- انتشار گاز دی اکسید کربن در بخش‌های مختلف اقتصاد هند در بازه زمانی ۱۹۹۰ و ۲۰۲۰.....
۱۲۷
- شکل ۲۸- انتشار متان در بخش‌های مختلف اقتصاد ترکیه در بازه زمانی ۱۹۹۰ و ۲۰۲۰ (معادل دی اکسید کربن)
۱۲۸
- شکل ۲۹- انتشار متان در بخش‌های مختلف اقتصاد پاکستان در بازه زمانی ۱۹۹۰ و ۲۰۲۰ (معادل دی اکسید کربن)
۱۲۹
- شکل ۳۰- انتشار متان در بخش‌های مختلف اقتصاد مصر در بازه زمانی ۱۹۹۰ و ۲۰۲۰ (معادل دی اکسید کربن)
۱۲۹
- شکل ۳۱- انتشار متان در بخش‌های مختلف اقتصاد مکزیک در بازه زمانی ۱۹۹۰ و ۲۰۲۰ (معادل دی اکسید کربن)
۱۳۰
- شکل ۳۲- انتشار متان در بخش‌های مختلف اقتصاد هند در بازه زمانی ۱۹۹۰ و ۲۰۲۰ (معادل دی اکسید کربن)
۱۳۰
- شکل ۳۳- انتشار اکسید نیتروز در بخش‌های مختلف اقتصاد ترکیه در بازه زمانی ۱۹۹۰ و ۲۰۲۰ (معادل دی اکسید کربن)
۱۳۱
- شکل ۳۴- انتشار اکسید نیتروز در بخش‌های مختلف اقتصاد پاکستان در بازه زمانی ۱۹۹۰ و ۲۰۲۰ (معادل دی اکسید کربن)
۱۳۲
- شکل ۳۵- انتشار اکسید نیتروز در بخش‌های مختلف اقتصاد مصر در بازه زمانی ۱۹۹۰ و ۲۰۲۰ (معادل دی اکسید کربن)
۱۳۲
- شکل ۳۶- انتشار اکسید نیتروز در بخش‌های مختلف اقتصاد مکزیک در بازه زمانی ۱۹۹۰ و ۲۰۲۰ (معادل دی اکسید کربن)
۱۳۳
- شکل ۳۷- انتشار اکسید نیتروز در بخش‌های مختلف اقتصاد هند در بازه زمانی ۱۹۹۰ و ۲۰۲۰ (معادل دی اکسید کربن)
۱۳۳

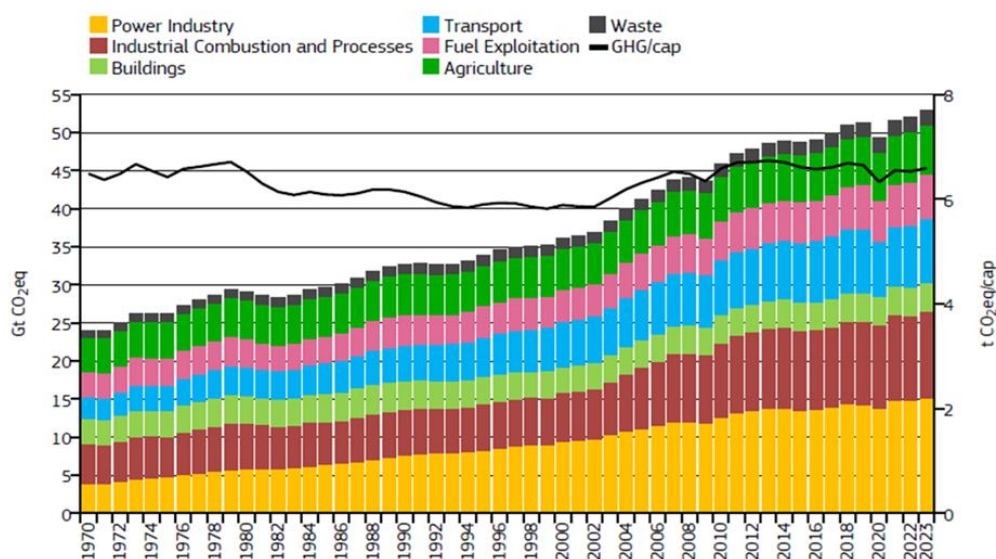
فصل اول

گازهای گلخانه‌ای

۱- گازهای گلخانه‌ای

گازهای گلخانه‌ای گازهایی هستند که دمای سطح زمین را بالا می‌برند. چیزی که آنها را از گازهای دیگر جدا می‌کند توانایی‌شان در جذب پرتوهای بلند موج تابش خورشید است که پیامد آن اثرات گلخانه‌ای است [۱]. بیشترین گازهای گلخانه‌ای در جو زمین به ترتیب کسر مولی بخار آب، دی اکسید کربن، متان، اکسید نیتروز، ازن و گازهای F (کلروفلوروکربن (CFCs)، هیدروفلوروکربن (HFCs) و پرفلوروکربن (PFCs) مانند CF_4 , C_2F_6 , SF_6 و NF_3) هستند [۲،۳]. میانگین دمای کنونی سطح زمین در نتیجه انتشار گازهای گلخانه‌ای $15^{\circ}C$ است در صورتی که بدون حضور گازهای گلخانه‌ای $18^{\circ}C$ - می‌شد [۴،۵]. گفتنی است که بخار آب هر چند که گاز گلخانه‌ای است اما کنشهای انسانی به مقدار آن در جو زمین نمی‌افزاید بنابراین هیئت بین دولتی تغییر اقلیم (IPCC) آن را در لیست گازهای گلخانه‌ای که باعث تغییر اقلیم می‌شود نگنجانده است.

کنش‌های انسانی از آغاز انقلاب صنعتی (۱۷۵۰) باعث افزایش چشمگیر گازهای گلخانه‌ای در جو زمین شده است: مقدار دی اکسید کربن، متان، و اکسید نیتروز به ترتیب از ۲۷۸ ppm، ۷۰۰ ppb و ۲۷۰ ppb در سال ۱۷۵۰ به ترتیب به ۴۲۰ ppm، ۱۹۵۰ ppb و ۳۳۵ ppb در سال ۲۰۲۲ رسیده است [۵،۶]. پایش این سه گاز گلخانه‌ای از آن جهت اهمیت دارد که ۷۵ درصد گرمایش جهانی ناشی از افزایش دی اکسید کربن در جو زمین است که هزاران سال طول خواهند کشید تا با چرخه کربن کاملاً جذب شود. باقی گرمایش جهانی بیشتر ناشی از افزایش مقدار متان در اتمسفر زمین است [۷]. نمودار ۱ روند افزایش گازهای گلخانه‌ای را در بازه زمانی ۱۹۷۰-۲۰۲۳ نشان می‌دهد [۸]. به طوری که میزان گازهای گلخانه‌ای از کمتر از ۲۵ گیگاتن معادل دی اکسید کربن در ۱۹۷۰ به ۵۳ گیگاتن در ۲۰۲۳ افزایش یافته است. در این آمار سهم کاربری زمین، تغییر کاربری زمین و جنگلداری (LULUCF) گنجانده نشده است. انرژی با ۱۵ گیگاتن بیشترین سهم را در انتشار گازهای گلخانه‌ای داشت. پس از آن احتراق صنعتی و فرایندها با ۱۱/۴، ترابری با ۸/۴، کشاورزی با ۶/۵، اکتشاف سوخت‌های فسیلی با ۵/۹، ساخت و ساز با ۳/۷۶ و پسماند با ۲ گیگاتن سهم داشتند. همان‌طور که در نمودارهای ۱ و ۲ دیده می‌شود با شروع همه‌گیری کرونا در سال ۲۰۱۹ و کاهش فعالیت‌های اقتصادی، روند انتشار گازهای گلخانه‌ای در بخش‌های مختلف اقتصاد جهانی در این بازه کاهش یافته است.



شکل ۱- انتشار گازهای گلخانه‌ای در بخش‌های مختلف اقتصاد جهانی در بازه زمانی ۱۹۷۰ - ۲۰۲۳ [۸].

IPCC میزان دی اکسید کربن منتشر شده از سوخت هر تن نفت و زغال سنگ، هر فوت مکعب گاز طبیعی و هر وات ساعت برق تولید شده را برآورد کرده است که در فصل سوم به آن پرداخته خواهد شد. کشورهایی که بیشترین تولید و مصرف انرژی، گاز، برق و نفت را در سال ۲۰۲۲ داشتند در جدول‌های ۱ تا ۱۰ آورده شده‌اند.

جدول ۱ بیانگر این است که ایران با تولید ۱۷/۶۳۶ کوادریلیون BTU انرژی در رده هشتم کشورهایی است [۹، ۱۰] که بیشترین تولید انرژی را در سال ۲۰۲۲ داشتند (هر BTU برابر با ۱/۰۵۵۰۶ کیلو ژول و ۰/۲۹۳ وات ساعت است). از این مقدار ۹/۸۱۸ کوادریلیون BTU سهم گاز طبیعی خشک (۵۶ درصد)، ۷/۶۴۹ کوادریلیون BTU سهم نفت و دیگر مایعات نفتی (۴۳ درصد)، ۰/۰۴۷ کوادریلیون BTU سهم زغال سنگ (۰/۲۶ درصد) و ۰/۱۲۱ کوادریلیون BTU سهم انرژی‌های تجدید پذیر و هسته‌ای (۰/۷ درصد) است [۹].

جدول ۱- کشورهایی که بیشترین تولید انرژی را در سال ۲۰۲۲ داشتند [۹].

Ranking	Country	quadrillion Btu
۱	China	۱۳۷/۸۲۸
۲	United States	۹۸/۵۲۶
۳	Russia	۵۹/۹۳۶
۴	Saudi Arabia	۲۹/۶۵۱
۵	India	۲۱/۸۹
۶	Canada	۲۱/۵۵
۷	Australia	۱۷/۸۲۴
۸	Iran	۱۷/۶۳۶
۹	Indonesia	۱۶/۵۰۲
۱۰	United Arab Emirates	۱۰/۸۸۳

مطابق جدول ۲ ایران با مصرف ۱۳/۵۰۲ کوادریلیون BTU انرژی در رده ششم کشورهایی است که بیشترین مصرف انرژی را در سال ۲۰۲۲ داشتند [۹]. از این مقدار ۱۳۳/۹ کوادریلیون BTU سهم گاز طبیعی خشک (۶۸ درصد)، ۴/۲۰۵ کوادریلیون BTU سهم نفت و دیگر مایعات نفتی (۳۱ درصد)، ۰/۰۴۹ کوادریلیون BTU سهم زغال سنگ (۳۶/۰ درصد) و ۰/۱۱۶ کوادریلیون BTU سهم انرژی‌های تجدید پذیر و هسته‌ای (۸۶/۰ درصد) است. برآورد BP از مصرف انرژی در ایران ۱۲/۲۰ exajoul است [۱۱] که ۸/۷ exajoul آن از گاز و ۳/۲۵ exajoul از نفت است. این برآورد ۱۵ درصد با برآورد EIA فرق دارد [۹، ۱۱].

جدول ۲- کشورهایی که بیشترین مصرف انرژی را در سال ۲۰۲۲ داشتند [۹].

Ranking	Country	quadrillion Btu
۱	China	۱۷۳/۹۶۴
۲	United States	۹۴/۷۹۱
۳	India	۳۵/۲۵۷
۴	Russia	۳۲/۵۴۱
۵	Japan	۱۶/۸۹
۶	Iran	۱۳/۵۰۲
۷	Canada	۱۲/۲۶۶
۸	South Korea	۱۲/۲۰۴
۹	Saudi Arabia	۱۱/۴۲۹
۱۰	Germany	۱۱/۰۹۳

همان‌طور که در جدول ۳ و ۴ آورده شده است ایران با تولید ۹۲۹۸ میلیارد فوت مکعب [۹] گاز طبیعی در رده سوم کشورهایی است که بیشترین تولید گاز را در سال ۲۰۲۲ داشتند [۹]. به روزترین آمار ۲۹۲ میلیارد متر مکعب در سال ۲۰۲۳ است [۱۲]. ایران با مصرف ۸۶۴۸ میلیارد فوت مکعب گاز طبیعی در رده چهارم کشورهایی است که بیشترین مصرف گاز را در سال ۲۰۲۲ داشتند [۹]. به روزترین آمار ۲۷۷ میلیارد متر مکعب در سال ۲۰۲۳ است [۱۲].

جدول ۳- کشورهایی که بیشترین تولید گاز را در سال ۲۰۲۲ داشتند [۹].

Ranking	Country	billion cubic feet
۱	United States	۳۶/۳۵۳
۲	Russia	۲۱/۸۱۸
۳	Iran	۹/۲۹۸
۴	China	۷/۹۵۸
۵	Canada	۶/۶۲۸
۶	Qatar	۵/۹۸۹
۷	Australia	۵/۴۳۱
۸	Norway	۴/۳۶۹
۹	Saudi Arabia	۴/۳۰۴
۱۰	Algeria	۳/۵۵۷

جدول ۴- کشورهایی که بیشترین مصرف گاز را در سال ۲۰۲۲ داشتند [۹].

Ranking	Country	billion cubic feet
۱	United States	۳۲/۲۸۸
۲	Russia	۱۶/۶۷۷
۳	China	۱۲/۹۳۱
۴	Iran	۸/۶۴۸
۵	Canada	۴/۶۰۲
۶	Saudi Arabia	۴/۳۰۴
۷	Japan	۳/۲۷۹
۸	Mexico	۳/۱۹۸
۹	Germany	۲/۷۳۷
۱۰	United Kingdom	۲/۴۷۷

جدول ۵ و ۶ بیانگر این است که ایران با تولید ۳۶۱ تراوات ساعت برق در رده دوازدهم کشورهایی است که بیشترین تولید برق را در سال ۲۰۲۲ داشتند [۹]. به روزترین آمار ۳۷۸ تراوات ساعت در سال ۲۰۲۳ است [۱۲]. ایران با مصرف ۳۱۶ تراوات ساعت برق در رده دوازدهم کشورهایی است که بیشترین مصرف برق را در سال ۲۰۲۲ داشتند [۹]. به روزترین آمار ۲۹۷ تراوات ساعت در سال ۲۰۲۳ است [۱۲].

در زمینه نفت نیز ایران با تولید ۳ میلیون و ۶۶۱ هزار بشکه نفت در روز در رده نهم کشورهایی است که بیشترین تولید نفت را در سال ۲۰۲۲ داشتند [۹]. تولید نفت ایران ۳ میلیون و ۹۹۲ هزار بشکه در سال ۲۰۲۳ است [۹]. ایران با مصرف ۲ میلیون و ۱۳۶ هزار بشکه نفت در روز در رده یازدهم کشورهایی است که بیشترین مصرف نفت را در سال ۲۰۲۲ داشتند [۹] (جدول ۷ و ۸).

جدول ۵- کشورهایی که بیشترین تولید برق را در سال ۲۰۲۲ داشتند [۹].

Ranking	Country	TWh
۱	China	۸/۸۸۲
۲	United States	۴/۲۹۲
۳	India	۱/۷۶۰
۴	Russia	۱/۱۳۸
۵	Japan	۹۹۱
۶	Brazil	۶۷۴
۷	Canada	۶۳۸
۸	South Korea	۶۰۷
۹	Germany	۵۶۱
۱۰	France	۴۴۶
۱۱	Saudi Arabia	۴۳۲
۱۲	Iran	۳۶۱

جدول ۶- کشورهایی که بیشترین مصرف برق را در سال ۲۰۲۲ داشتند [۹].

Ranking	Country	TWh
۱	China	۸/۵۴۰
۲	United States	۴/۱۲۸
۳	India	۱/۴۶۳
۴	Russia	۱/۰۲۶
۵	Japan	۹۳۹
۶	South Korea	۵۸۷
۷	Brazil	۵۸۳
۸	Canada	۵۵۳
۹	Germany	۵۰۷
۱۰	France	۴۲۶
۱۱	Saudi Arabia	۳۹۳
۱۲	Iran	۳۱۶

جدول ۷- کشورهایی که بیشترین تولید نفت را در سال ۲۰۲۲ داشتند [۹].

Ranking	Country	thousand barrels per day
۱	United States	۲۰/۳۰۱
۲	Saudi Arabia	۱۲/۱۴۴
۳	Russia	۱۰/۹۷۴
۴	Canada	۵/۶۹۴
۵	China	۵/۱۱۹
۶	Iraq	۴/۵۵۳
۷	United Arab Emirates	۴/۲۳۷
۸	Brazil	۳/۸۱۰
۹	Iran	۳/۶۶۱
۱۰	Kuwait	۳/۰۲۲

جدول ۸- کشورهایی که بیشترین مصرف نفت را در سال ۲۰۲۲ داشتند [۹].

Ranking	Country	thousand barrels per day
۱	United States	۲۰/۰۱۰
۲	China	۱۵/۱۴۸
۳	India	۵/۰۴۹
۴	Russia	۳/۶۸۴
۵	Saudi Arabia	۳/۶۴۹
۶	Japan	۳/۳۷۶
۷	Brazil	۳/۰۲۷
۸	South Korea	۲/۵۴۷
۹	Canada	۲/۴۰۷
۱۰	Germany	۲/۱۷۹
۱۱	Iran	۲/۱۳۶

طبق جدول ۹ میزان ۲۹ هزار تراوات ساعت برق تولید شده در سال ۲۰۲۲ حدود ۱۲ گیگاتن دی اکسید کربن در جهان منتشر کرده است [۸]. همان طور که در جدول ۱۰ دیده می شود شوربختانه درصد ۳۶ تولید برق جهان از زغال سنگ است که هم اندازه تولید برق از همه منابع تجدیدپذیر است. این میزان در چین ۶۱ درصد، در هند ۷۴ درصد، در اندونزی ۶۲ درصد، در کره جنوبی ۳۴ درصد، در ژاپن ۳۴ درصد، در آلمان ۳۲ درصد و در ترکیه ۳۰ درصد بوده است [۱۳]. زغال سنگ نه تنها بسیار آلاینده بوده بلکه گازهای گلخانه ای زیادی را نیز منتشر می کند. پس از زغال سنگ ۲۳ درصد از برق تولیدی جهان از گاز، ۱۵ درصد از برقابی، ۹ درصد از هسته ای، ۷ درصد از باد، درصد ۵ از خورشید، ۳ درصد از نفت و ۲ درصد از سوخت های زیستی بوده است.

نمودار ۲ نشان می دهد [۱۴] بیشتر گازهای گلخانه ای جهان (۷۳/۷) دی اکسید کربن جو زمین است که ناشی از سوزاندن سوخت های فسیلی مانند نفت، گاز طبیعی و ذغال سنگ و تولید سیمان و فولاد و کودهای شیمیایی و تغییر کاربری زمین با کشاورزی و جنگل زدایی است. پس از CO₂ دیگر گاز گلخانه ای عمده (۱۸/۹) متان است که انتشار آن بیشتر ناشی از کنش های کشاورزی، تولید سوخت های فسیلی و نشتی از تاسیسات نفت و گاز است. سومین گاز گلخانه ای (۴/۷) عمده اکسید نیتروز است که انتشار آن بیشتر ناشی از کاربرد کودهای نیتراتی در کشاورزی و واکنش های شیمیایی در پسماند است. مقدار گازهای F در جو زمین ۲/۷ درصد است.

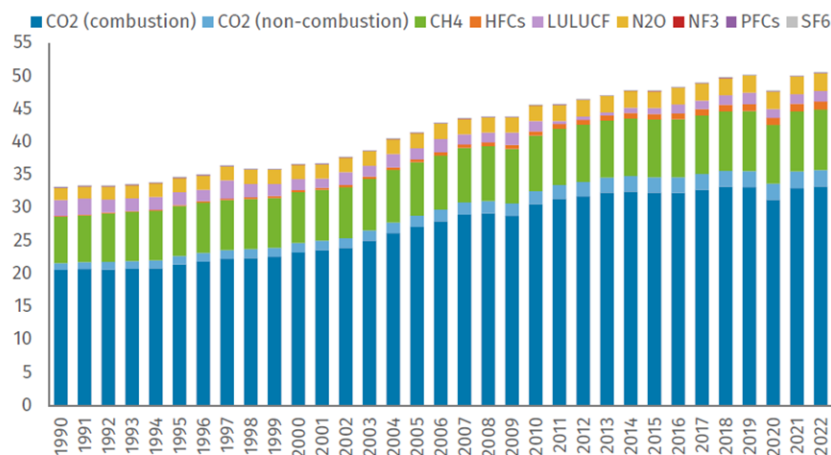
جدول ۹- کشورهای که بیشترین تولید برق سالانه در ۲۰۲۲ را داشتند (تراوات ساعت در سال) [۱۳].

Region	Total	Coal	Gas	Hydro	Nuclear	Wind	Solar	Oil	Bio	Geo
World	۲۸۸۴۴	۱۰۲۸۸	۶۵۸۲	۴۲۹۸	۲۶۴۰	۲۰۹۹	۱۳۲۳	۸۴۹	۶۷۶	۸۹
China	۸۸۴۹	۵۳۹۸	۲۹۱	۱۳۰۳	۴۱۸	۷۶۳	۴۲۸	۷۲	۱۷۷	۰
USA	۴۲۸۷	۸۳۲	۱۶۸۷	۲۴۹	۷۷۲	۴۳۴	۲۰۵	۳۹	۵۲	۱۸
India	۱۸۵۸	۱۳۸۰	۴۷	۱۷۵	۴۶	۷۰	۹۵	۴	۴۱	۰
Russia	۱۱۶۷	۱۹۲	۵۳۴	۱۹۸	۲۲۴	۴	۲	۱۲	۰/۸	۰
Japan	۱۰۳۴	۳۴۸	۳۶۱	۷۵	۵۲	۸	۱۰۲	۴۶	۴۱	۰
Brazil	۶۷۷	۱۶	۴۲	۴۲۷	۱۵	۸۲	۳۰	۱۲	۵۳	۰
Canada	۶۶۰	۳۵	۸۴	۳۹۸	۸۷	۳۸	۶	۳	۹	۰
S Korea	۶۲۰	۲۱۱	۱۷۵	۴	۱۷۶	۳	۲۷	۷	۱۷	۰
Germany	۵۶۷	۱۸۰	۸۰	۱۸	۳۵	۱۲۵	۶۱	۲۲	۴۸	۰/۲
France	۴۶۹	۴	۴۶	۴۶	۲۹۵	۳۹	۲۰	۱۰	۱۰	۰/۶
S Arabia	۴۰۲	۰	۲۶۹	۰	۰	۰/۰۱	۰/۸	۱/۳۱	۰	۰
Iran	۳۴۸	۰/۸	۳۰۰	۷	۷	۱	۰/۷	۳۱	۰/۰۲	۰
Mexico	۳۴۱	۲۲	۱۹۲	۳۶	۱۱	۲۰	۱۹	۳۴	۷	۰
Indonesia	۳۳۴	۲۰۵	۵۷	۲۷	۰	۰/۴	۰/۴	۶	۲۱	۱۷

جدول ۱۰- سهم کشورهایایی که بیشترین تولید برق سالانه در ۲۰۲۲ را داشتند (تراوات ساعت در سال) [۱۳].

Region	% of World	Coal	Gas	Hydro	Nuclear	Wind	Solar	Oil	Bio	Geo
World	۱۰۰	۳۶	۲۳	۱۵	۹	۷	۵	۳	۲	۰
China	۳۱	۶۱	۳	۱۵	۵	۹	۵	۳	۲	۰
USA	۱۵	۱۹	۳۹	۶	۱۸	۱۰	۵	۱	۱	۰
India	۶	۷۴	۳	۹	۲	۴	۵	۰	۲	۰
Russia	۴	۱۶	۴۶	۱۷	۱۹	۰	۰	۱	۰	۰
Japan	۴	۳۴	۳۵	۷	۵	۱	۱۰	۴	۴	۰
Brazil	۲	۲	۶	۶۳	۲	۱۲	۴	۲	۸	۰
Canada	۲	۵	۱۳	۶۰	۱۳	۶	۱	۰	۱	۰
S Korea	۲	۳۴	۲۸	۱	۲۸	۱	۴	۱	۳	۰
Germany	۲	۳۲	۱۴	۳	۶	۲۲	۱۱	۴	۸	۰
France	۲	۱	۱۰	۱۰	۶۳	۸	۴	۲	۲	۰
S Arabia	۱	۰	۶۷	۰	۰	۰	۰	۳۳	۰	۰
Iran	۱	۰	۸۶	۲	۲	۰	۰	۹	۰	۰
Mexico	۱	۶	۵۶	۱۰	۳	۶	۶	۱۰	۲	۰
Indonesia	۱	۶۲	۱۷	۸	۰	۰	۰	۲	۶	۵

FIGURE 2
Global GHG emissions for 1990-2020 and preliminary estimates for 2022
Billion metric tons of CO₂e



Source: Rhodium Group

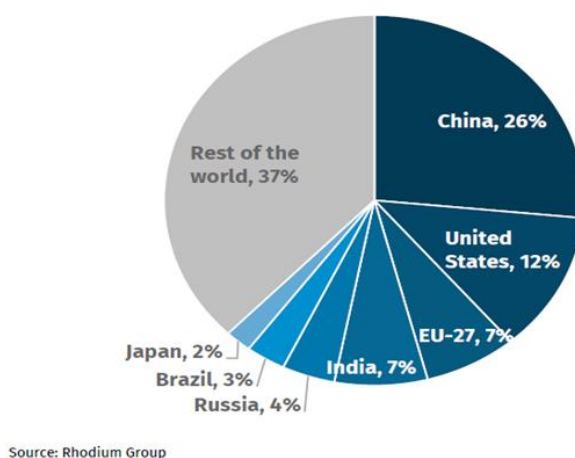
شکل ۲- سهم گازهای گلخانه‌ای گوناگون در جهان در بازه زمانی ۱۹۹۰ - ۲۰۲۲ [۱۴].

این روند در ایران نیز گزارش شده است. بر پایه بررسی‌های شاخه پژوهشی کمیسیون اروپا (JRC)، در ۳۰ سال گذشته انتشار گازهای گلخانه‌ای در ایران سه برابر شده و از ۳۳۳ میلیون تن در سال ۱۹۹۰ به ۸۸۹ میلیون تن معادل دی اکسیدکربن (CO₂-eq) در سال ۲۰۲۰ رسیده است (۱/۹ درصد از انتشار گازهای گلخانه‌ای جهان) که این میزان ایران را در ردیف هشتمین منتشر کننده گازهای گلخانه‌ای جهان قرار داده است [۸]. البته مطابق جدول ۱۱ برآوردهای دیده‌بان اقلیم تفاوت جزئی دارد به‌طوری‌که میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای در ایران را ۳۰۴ میلیون تن در سال ۱۹۹۰ و ۹۱۴ میلیون تن معادل دی اکسید کربن در سال ۲۰۲۰ گزارش کرده است [۱۵]. افزایش انتشار گازهای گلخانه‌ای

در بازه زمانی ۱۹۹۰ تا ۲۰۲۳ در بخش‌های مختلف اقتصاد ایران یکسان نبوده است به طوری که طبق آمار منتشر شده JRC در صنعت انرژی ۳۰۰ درصد، در بخش فرآوری و احتراق صنعتی ۳۰۰ درصد، در بخش ساختمان سازی ۲۳۶ درصد، در ترابری ۲۶۶ درصد، در استخراج سوخت‌های فسیلی ۱۱۲ درصد، در بخش پسماند ۱۱۹ درصد و در بخش کشاورزی ۱۳ درصد بوده است. در بازه زمانی ۱۹۹۰ تا ۲۰۲۳ میانگین افزایش انتشار گازهای گلخانه‌ای در همه بخش‌های اقتصاد ایران ۲۰۰ درصد بوده است [۸]. در سال ۲۰۲۳ میزان انتشار دی اکسید کربن در ایران به ۷۷۹ (۷۸/۱) درصد، متان به ۱۶۹ (۱۷ درصد)، اکسید نیتروز به ۳۰ (۳ درصد) و گازهای F به ۱۹ (۱/۹ درصد) میلیون تن رسیده است [۸].

بر پایه بررسی‌های شاخه پژوهشی کمیسیون اروپا، چین با ۳۰/۱ درصد، آمریکا با ۱۱/۳ درصد، هند با ۷/۸ درصد، روسیه با ۵ درصد، برزیل با ۲/۵ درصد، اندونزی با ۲/۳ درصد، ژاپن با ۲ درصد، ایران با ۱/۹ درصد، عربستان سعودی با ۱/۵ درصد و کانادا با ۱/۴ درصد بزرگترین منتشر کننده گازهای گلخانه‌ای جهانند [۸]، هر چند که همان‌طور که پیش‌تر هم عنوان شد منابع [۸] و [۱۴] برآوردهای گوناگونی از سهم هر کدام از این کشورها در انتشار گازهای گلخانه‌ای دارند و اختلاف جزئی بین آمار گزارش شده JRC و منبع [۱۴] وجود دارد (شکل ۳).

FIGURE 3
2022 net GHG emissions from the world's largest emitters
Percent share of global total



شکل ۳- سهم کشورهای گوناگون در انتشار گازهای گلخانه‌ای در جهان در ۲۰۲۲ [۱۴].

جدول ۱۱ نرخ تغییر انتشار گازهای گلخانه‌ای در بخش‌های مختلف اقتصاد ایران در سال‌های ۱۹۹۰ و ۲۰۲۰ (میلیون تن معادل دی اکسید کربن) را مطابق برآوردهای دیده‌بان اقلیم نشان می‌دهد [۱۵]. همچنان که این جدول نشان می‌دهد بخش‌های پسماند، صنعت، تولید برق و گرما، ساختمان و ترابری بیشترین افزایش انتشار گازهای گلخانه‌ای را در سال‌های ۱۹۹۰ و ۲۰۲۰ در ایران داشته‌اند.

جدول ۱۱- انتشار گازهای گلخانه‌ای در بخشهای مختلف اقتصاد ایران در سال‌های ۱۹۹۰ و ۲۰۲۰ (تن معادل دی اکسیدکربن) و نرخ تغییر آنها [۱۵].

Economic Sections	Emission in 1990	Emission in 2020	Absolute Change	Relative Change
Agriculture	۳۵,۰۱۰,۰۰۰	۳۶,۱۵۰,۰۰۰	+۱,۱۴۰,۰۰۰	+۳%
LULUCF*	-۲۰,۴۱۰,۰۰۰	۶۰,۰۰۰	+۲۰,۴۷۰,۰۰۰	+۱۰۰٪
Waste	۸,۳۸۰,۰۰۰	۴۷,۸۷۰,۰۰۰	+۳۹,۴۹۰,۰۰۰	+۴۷۱%
Building	۴۰,۶۶۰,۰۰۰	۱۵۱,۰۸۰,۰۰۰	+۱۱۰,۱۶۰,۰۰۰	+۲۶۹%
Industry	۹,۵۸۰,۰۰۰	۵۴,۷۴۰,۰۰۰	+۴۵,۱۶۰,۰۰۰	+۴۷۱%
Manufacturing/Construction	۳۷,۴۵۰,۰۰۰	۱۱۸,۶۵۰,۰۰۰	+۸۱,۲۰۰,۰۰۰	+۲۱۷%
Transportation	۴۰,۱۴۰,۰۰۰	۱۳۲,۳۲۰,۰۰۰	+۹۲,۱۸۰,۰۰۰	+۲۳۰%
Electricity/Heat	۴۱,۹۶۰,۰۰۰	۲۱۰,۴۰۰,۰۰۰	+۱۶۸,۴۴۰,۰۰۰	+۴۰۱%
Fugitive Emissions	۹۶,۷۲۰,۰۰۰	۱۴۲,۲۷۰,۰۰۰	+۴۵,۵۵۰,۰۰۰	+۴۷%
Other Fuels Combustion	۱۲,۳۰۰,۰۰۰	۱۴,۸۷۰,۰۰۰	+۲,۵۷۰,۰۰۰	+۲۱%
Aviation/Shipping	۲,۸۲۰,۰۰۰	۵,۵۳۰,۰۰۰	+۲,۷۱۰,۰۰۰	+۹۶%
TOTAL	۳۰۴,۸۷۰,۰۰۰	۹۱۳,۹۴۰,۰۱۰	+۶۰۹,۰۷۰,۰۱۰	+۲۰۰%

مطابق جدول ۱۱ از حدود ۹۱۴ میلیون تن معادل دی اکسیدکربن کل گازهای گلخانه‌ای منتشر شده در ایران در سال ۲۰۲۰، حدود ۲۱۰/۴ میلیون تن از تولید برق و گرما، ۱۴۲/۲۷ میلیون تن از نشتی از تاسیسات نفت و گاز و برق، ۱۳۲/۳۲ میلیون تن از ترابری، ۱۵۱/۰۸ میلیون تن از ساختمان‌های تجاری و مسکونی، ۱۱۸/۶۵ میلیون تن از تولید و ساخت و پرداخت، ۴۷/۸۷ میلیون تن از پسماند، ۵۴/۷۴ میلیون تن از صنعت، ۳۶/۱۵ میلیون تن از کشاورزی، ۱۴/۸۷ میلیون تن از دیگر سوخت‌ها، ۵/۵۳ میلیون تن از هوانوردی و کشتیرانی و ۶۰ هزار تن از کاربری زمین، تغییر کاربری زمین و جنگلداری منتشر شده است [۱۵].

۱-۲ انتشار گازهای گلخانه‌ای:

گاز گلخانه‌ای (GHG) گازی است که با جذب و تابش دوباره‌ی تشعشعات، باعث گرم شدن جو زمین می‌شود. این گازها، پرتوهایی را که از سطح زمین ساطع می‌شوند جذب می‌کنند و مانع از خروج این گرما به فضا می‌شوند. دی اکسید کربن (CO_2) شناخته‌شده‌ترین گاز گلخانه‌ای است، اما گازهای دیگری مانند متان، اکسید نیتروژن و حتی بخار آب نیز وجود دارند. گازهای گلخانه‌ای ناشی از فعالیت‌های انسانی، به ویژه سوخت‌های فسیلی، صنایع و کشاورزی، عامل اصلی تغییرات اقلیمی جهانی هستند. میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای، مجموع گازهایی است که در جو منتشر می‌شوند. این مقدار معمولاً بر حسب معادل دی اکسید کربن (CO_2eq) بیان می‌شود که میزان گرمای ایجاد شده توسط هر نوع گاز را در نظر می‌گیرد.

۲-۲ معادل دی اکسیدکربن (CO_2eq)

دی اکسیدکربن مهم‌ترین گاز گلخانه‌ای است، اما تنها گاز موجود نیست. برای درک بهتر و سنجش کلیه گازهای گلخانه‌ای، محققان از واحدی به نام «معادل دی اکسیدکربن» (CO_2eq) استفاده می‌کنند. این روش، تمام گازهای

۲. Carbon dioxide equivalent

گلخانه‌ای را در نظر می‌گیرد و برای مقایسه‌پذیر کردن آن‌ها، از معیاری به نام «پتانسیل گرمایش جهانی» (GWP) استفاده می‌شود. GWP نشان می‌دهد که یک گاز نسبت به CO₂ چه میزان گرما ایجاد می‌کند. مقدار GWP برای CO₂ برابر با ۱ در نظر گرفته می‌شود. اگر گازی GWP برابر ۱۰ داشته باشد، به این معناست که یک کیلوگرم از آن گاز، ده برابر بیشتر از یک کیلوگرم CO₂ گرما تولید می‌کند.

برای محاسبه معادل دی‌اکسیدکربن یک گاز، جرم انتشار آن گاز را در مقدار GWP آن ضرب می‌کنیم. این میزان گرمایش می‌تواند برای دوره‌های زمانی مختلف بیان شود. برای مثال، اگر بخواهیم میزان گرمایش را در دوره صدساله بسنجیم، GWP صد ساله (GWP100) را در نظر می‌گیریم. مجموع انتشار گازهای گلخانه‌ای که بر حسب CO₂eq اندازه‌گیری می‌شود با جمع زدن مقادیر معادل دی‌اکسید کربن هر گاز به دست می‌آید.

نمودار ۴ روند تغییرات سهم بخش‌های مختلف اقتصاد ایران را در انتشار کل گازهای گلخانه‌ای (CO₂)، متان، اکسید نیتروز و گازهای F در بازه زمانی ۱۹۹۰-۲۰۲۰ نشان می‌دهد [۱۵]. همان‌طور که دیده می‌شود، بخش برق و گرما بیشترین سهم را در انتشار گازهای گلخانه‌ای داشته و پس از آن به ترتیب، نشت از تاسیسات نفت و گاز، ساختمان‌های تجاری و مسکونی، و بخش تولید، ساخت و پرداخت در رتبه‌های بعدی قرار دارند. همچنین، بخش کاربری زمین، تغییر کاربری زمین و جنگلداری که تا پیش از سال ۲۰۱۱ نقش مؤثری در جذب گازهای گلخانه‌ای ایفا می‌کرد، پس از آن سال، این نقش کاهشی خود را از دست داده است. از سوی دیگر، از سال ۲۰۱۹ و همزمان با آغاز همه‌گیری کرونا در جهان، به دلیل تأثیرات اقتصادی ناشی از آن بر بخش‌های مختلف اقتصادی کشورها، روند انتشار گازهای گلخانه‌ای در بسیاری از بخش‌ها کاهش یافته یا از روند صعودی پیشین خارج شده و در سطحی تقریباً ثابت باقی مانده است. روند مشابهی نیز در نمودارهای روند تغییرات انتشار گازهای گلخانه‌ای در بخش‌های مختلف اقتصادی کشورهای هند، پاکستان، ترکیه، مصر و مکزیک در بازه زمانی ۱۹۹۰-۲۰۲۰ دیده می‌شود. برای بررسی دقیق‌تر این نمودارها، به بخش پیوست گزارش مراجعه فرمایید. بررسی‌ها نشان می‌دهد در همسنگی با ایران، بخش کاربری زمین، تغییر کاربری زمین و جنگلداری ترکیه ۲۸/۶۲ میلیون تن معادل دی‌اکسید کربن از گازهای گلخانه‌ای را در سال ۲۰۲۰ جذب کرده است درحالی‌که این میزان در ایران حدود ۶۰ هزار تن معادل دی‌اکسید کربن در سال ۲۰۲۰ می‌باشد [۱۵].

محاسبات این پژوهش نشان می‌دهد که حدود ۳ درصد از کل انرژی مصرفی ایران در بخش کشاورزی مصرف می‌شود که مشروح محاسبات به شرح ذیل می‌باشد:

۱. میزان گاز مصرف شده در بخش کشاورزی ایران (۲ درصد):

$$277 \text{ (bcm)} \times 0.02 \times 35.7 \left(\frac{\text{TBTU}}{\text{bcm}} \right) = 198 \text{ TBTU} = 0.202 \text{ QBTU}$$

۲. میزان برق مصرف شده در بخش کشاورزی ایران (۱۴/۳ درصد):

$$317 \times 0.143 \text{ (TWh)} = 0.155 \text{ QBTU}$$

۳. میزان گازوئیل مصرف شده در بخش کشاورزی ایران:

$$5 \times 10^4 \left(\frac{\text{bbl}}{\text{day}} \right) \times 365 \left(\frac{\text{day}}{\text{year}} \right) = 18250000 \left(\frac{\text{bbl}}{\text{year}} \right) \cong 0.002 \text{ QBTU}$$

۴. میزان و درصد کل انرژی مصرف شده در بخش کشاورزی ایران:

$$0.202 + 0.155 + 0.002 = 0.359 \text{ QBTU}$$

$$\frac{0.359}{13.502} = 2.66 \cong 3 \%$$

در جدول ۱۲ میزان و سهم بخش کشاورزی و کل بخش‌های مختلف اقتصاد کشورهای ایران، هند، پاکستان، مکزیک، ترکیه و مصر در انتشار کل گازهای گلخانه‌ای در سال ۱۹۹۰ و ۲۰۲۰ ارائه شده است. توجه شود که دی-اکسید کربن ناشی از کاربرد انرژی در بخش کشاورزی ایران در این آمار لحاظ شده است.

همان‌طور که دیده می‌شود در همسنگی با ایران، بخش کشاورزی هند، پاکستان، مکزیک، ترکیه و مصر به ترتیب ۷۵۱/۴۲، ۲۰۱/۹۷، ۹۹/۲۷، ۵۷/۹۳ و ۲۲/۴۵ میلیون تن معادل دی اکسید کربن در سال ۲۰۲۰ منتشر کردند [۱۵]. میزان انتشار کل گازهای گلخانه‌ای از بخش‌های مختلف اقتصاد کشور هند در سال ۲۰۲۰ حدود ۳/۵ برابر ایران است. سهم بخش کشاورزی هند از انتشار کل گازهای گلخانه‌ای آن در سال ۲۰۲۰ حدود ۲۳/۶ درصد و سهم بخش کشاورزی ایران از انتشار کل گازهای گلخانه‌ای خود حدود ۳/۹ درصد است، به عبارتی سهم بخش کشاورزی هند حدود شش برابر بخش کشاورزی ایران است.

جدول ۱۲- میزان و سهم بخش کشاورزی و کل بخش‌های مختلف اقتصاد در انتشار کل گازهای گلخانه‌ای (میلیون تن معادل دی اکسید کربن) [۱۵].

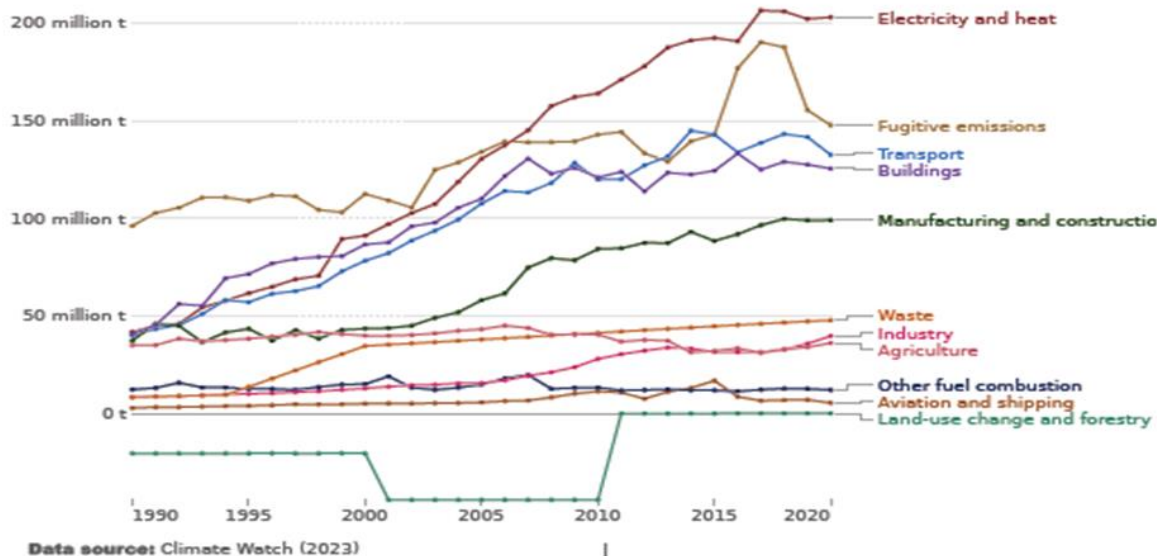
کشور	کشاورزی		کل بخش‌های مختلف اقتصاد		سهم بخش کشاورزی از انتشار کل (درصد)	
	۱۹۹۰	۲۰۲۰	۱۹۹۰	۲۰۲۰	۱۹۹۰	۲۰۲۰
ایران	۳۵/۰۱	۳۶/۱۵	۳۰۴/۸۷	۹۱۳/۹۴	۱۱/۵	۳/۹
هند	۵۶۶/۰۱	۷۵۱/۴۲	۱۰۳۰/۸	۳۱۸۶/۱۱	۵۴/۹	۲۳/۶
پاکستان	۸۵/۷۷	۲۰۱/۹۷	۱۶۹/۷۶	۴۶۷/۹	۵۰/۵	۴۳/۲
مکزیک	۸۸/۷۵	۹۹/۲۷	۴۴۰/۶۶	۶۲۱/۷۶	۲۰/۱	۱۶
ترکیه	۴۴/۱۱	۵۷/۹۳	۱۸۹/۴۲	۴۸۳/۲۹	۲۳/۳	۱۲
مصر	۲۰/۷۲	۲۲/۴۵	۱۴۳/۰۸	۲۹۷/۷۹	۱۴/۵	۷/۵

توجه شود که این برآوردها با برآوردهای شاخه پژوهشی کمیسیون اروپا (JRC) فرق دارد. جدول ۱۲ نشانگر آن است که در سال ۲۰۲۰ تنها بخش کشاورزی هند بیش از ۸۲ درصد همه بخش‌های اقتصاد ایران گازهای گلخانه‌ای منتشر کرده است.

Greenhouse gas emissions by sector, Iran

Greenhouse gas emissions¹ are measured in tonnes of carbon dioxide-equivalents² over a 100-year timescale.

Our World in Data

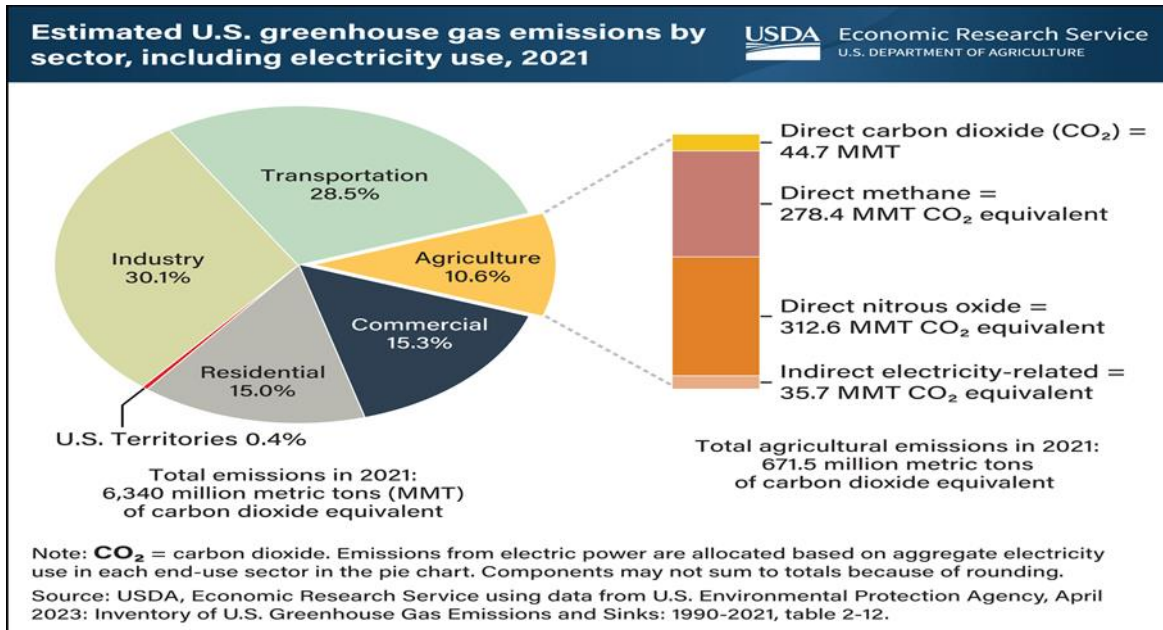


شکل ۴- انتشار گازهای گلخانه‌ای در بخش‌های مختلف اقتصاد ایران در بازه زمانی ۱۹۹۰ و ۲۰۲۰ (میلیون تن معادل دی‌اکسیدکربن) [۱۵].

انتشار گازهای گلخانه‌ای در بخش کشاورزی ناشی از کاشت و داشت و برداشت که باعث آزاد شدن کربن ذخیره شده در خاک به صورت CO_2 می‌گردد، تخمیر روده‌ای دام‌ها در دامپروری، کاربرد کودهای نیتراتی، شالیکاری و مصرف انرژی در این بخش است. از میان سه گاز عمده گلخانه‌ای در بخش کشاورزی، متان از تخمیر روده‌ای دام‌ها و تجزیه بی‌هوازی کودهای جانوری آزاد می‌گردد. اکسید نیتروز در پی واکنش‌های شیمیایی کودهای شیمیایی و آلی نیتراتی و همچنین نیترات‌زایی و نیترات‌زدایی ازت آلی آزاد می‌شود. آزاد شدن کربن ذخیره شده در خاک بستگی به نوع کاشت و داشت برداشت و باقی گذاشتن پسماندهای گیاهی در سطح زمین‌های کشاورزی دارد. کشاورزی با خاک‌ورزی صفر^۳ کمترین آزادسازی کربن ذخیره شده در خاک را دارد.

نمودار ۵ مقدار انتشار گازهای گلخانه‌ای در بخش‌های مختلف کشاورزی آمریکا را نشان می‌دهد به‌طوری‌که آزاد شدن کربن خاک بر اثر کشت و کار کشاورزی ۴۵ میلیون تن، تخمیر روده‌ای دام‌ها در دامپروری ۲۷۸ میلیون تن، انتشار اکسید نیتروز در زمین‌های کشاورزی ۳۱۳ میلیون تن و انتشار معادل دی‌اکسیدکربن از کاربرد انرژی ۳۶ میلیون تن بیشترین سهم را در انتشار گازهای گلخانه‌ای در بخش کشاورزی آمریکا در سال ۲۰۲۱ داشت [۱۶]. بنابراین بخش کشاورزی آمریکا با ۶۷۱/۵ میلیون تن، ۱۱ درصد از انتشار دی‌اکسید کربن (۶۳۴۰ میلیون تن) این کشور را تشکیل می‌دهد. با به کارگیری برآورد انتشار گازهای گلخانه‌ای از زمین‌های کشاورزی ایران در گزارش ملی سوم در سال ۲۰۱۰ و همسنگی آن با بخش کشاورزی آمریکا، این پژوهش انتشار گازهای گلخانه‌ای از زمین‌های کشاورزی ایران را ۲۵ میلیون تن برآورد می‌کند که در بخش سوم این گزارش به آن پرداخته خواهد شد.

^۳ . No-till farming



شکل ۵- سهم بخش‌های مختلف کشاورزی آمریکا در انتشار گازهای گلخانه‌ای در سال ۲۰۲۱ [۱۶].

هم شاخه پژوهشی کمیسیون اروپا و هم دیده‌بان اقلیم مقدار گازهای گلخانه‌ای منتشر شده در بخش کشاورزی ایران را (بدون در نظر گرفتن انرژی مصرفی در کشاورزی) ۳۶ میلیون تن معادل دی اکسیدکربن برآورد کرده اند [۸، ۱۵]. بررسی‌های این پژوهش نشان می‌دهد که این برآوردها چند برابر کمتر از میزان واقعی است که در بخش سوم این گزارش به آن پرداخته خواهد شد. همان‌طور که در نمودار ۵ دیده می‌گردد آمریکا مصرف انرژی در بخش کشاورزی (Indirect electricity-related) را به عنوان جزئی از سهم بخش کشاورزی در انتشار گازهای گلخانه‌ای لحاظ کرده است، لازم به ذکر است که در گزارش حاضر نیز همچون کشور آمریکا مصرف انرژی در بخش کشاورزی ایران به عنوان سهم بخش کشاورزی ایران از انتشار گازهای گلخانه‌ای لحاظ شده است.

هدف اصلی این پروژه جستجو، بررسی، یافتن و ارزیابی راهبردها و سیاست‌های کاهشی برای کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای در بخش کشاورزی کشورهایی است که اقلیم و تولید فرآورده‌های کشاورزی در آن‌ها همانندی‌هایی با ایران دارد. پس از ارزیابی راهبردها و سیاست‌های کاهشی، کاربرد آن‌ها در شرایط اقلیمی و کشاورزی ایران بررسی شده‌اند. این هدف هماهنگ و همخوان با پروتکل کیوتو، پیمان اقلیمی پاریس و بیانیه پایانی نشست COP ۲۸ است که تاکید دارد: (۱) هر مسیری برای رسیدن به هدف‌های پیمان اقلیمی پاریس باید دربرگیرنده «کشاورزی و سامانه‌های تولید خوراک» باشد (۲) بخش کشاورزی و سامانه‌های تولید خوراک باید فوراً دگرگون شده و سازگار با پیامدهای تغییر اقلیم گردند.

فصل دوم

روش‌های برآورد، پایش و اندازه‌گیری

گازهای گلخانه‌ای

۲- روش‌های برآورد، پایش و اندازه‌گیری گازهای گلخانه‌ای

IPCC یک رویکرد چند لایه برای برآورد انتشار گازهای گلخانه‌ای از منابع انسانی پیشنهاد کرده است [۱۷ و ۱۸]:
رویکردهای سطح ۱ متکی بر ضرب داده‌های فعالیت (AD) در یک عامل پیش فرض بین‌المللی است که نشان دهنده انتشار در هر واحد فعالیت است. رویکردهای سطح ۲ شامل استفاده از یک عامل انتشار کشور خاص در AD در سطح ملی یا منطقه‌ای است. رویکردهای سطح ۳ جزئیات بیشتری دارند و شامل طبقه بندی بیشتر AD، برآوردهای انتشار گازهای گلخانه‌ای در هر واحد فعالیت، اندازه گیری مستقیم انتشار گازهای گلخانه‌ای، یا سایر رویکردهای خاص کشور است [۱۸].

روش‌های سطح ۱ به گونه‌ای طراحی شده‌اند که برای همه کشورها قابل اجرا باشند و فقط به AD نیاز دارند که عموماً در دسترس هستند. استفاده از روش‌های سطح بالاتر، از جمله رویکردهای خاص کشور، برای منابع بزرگ انتشار گازهای گلخانه‌ای در یک کشور توصیه می‌شود، زیرا آن‌ها برای انعکاس بهتر شرایط ملی طراحی شده‌اند. به طور کلی، هر چه سطح بالاتر باشد، برآورد انتشار دقیق‌تر است، مشروط بر اینکه روش به خوبی اجرا شود و داده‌های ورودی تحت روش‌های کنترل کیفیت مناسب قرار گیرند [۱۸].

عدم قطعیت برآوردها در انتشار گازهای گلخانه‌ای و نوسان‌های آن‌ها قابل توجه هستند. برخی از بزرگترین رویدادهای انتشار نتیجه تصادفات و خرابی‌های فرآیند پیش‌بینی ناپذیر هستند و ممکن است سطح زیادی از انتشار گازهای گلخانه‌ای ناشی از عملیات نفت و گاز باشند، اما این موارد اغلب در «سیاهه‌های انتشار پایین به بالا» گنجانده نمی‌شوند. رویکردهای آزمایش شده در حال حاضر برای کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای در دسترس هستند، اما داده‌های بهتر و شفاف‌تری برای اقدامات هدفمند مورد نیاز است. در زیر روش‌های برآورد گازهای گلخانه‌ای سه گانه را بررسی کرده و میزان انتشار آنها را در ایران و کشورهایی که همانندی‌های اقلیمی با آن دارند در نمودارهای گوناگون گردآوری کرده‌ایم، کشورهایی مانند ترکیه، پاکستان، مصر، مکزیک و هند.

۱-۲ پایش نوسان‌های CO₂ اتمسفر

فناوری‌های گوناگونی برای جذب CO₂ پیشنهاد شده است: جذب پیش یا پس از سوخت سوخت‌های فسیلی و سوخت اکسی^۵ (از نظر تاریخی، استفاده از سوخت اکسی در جوشکاری و برش فلزات به ویژه فولاد بوده است زیرا سوخت اکسی دمای شعله بالاتری نسبت به شعله سوخت هوا دارد). پس از جذب، CO₂ معمولاً تحت فشار بالا در خطوط لوله به محل ذخیره منتقل می‌شود. برای ترابری، CO₂ فشرده شده تا اطمینان حاصل شود که جریان تک فازی حاصل می‌شود سپس CO₂ از طریق یک یا چند چاه تحت فشار در یک سیال فوق بحرانی به زیرزمین تزریق می‌شود، جایی که ویژگی‌های زمین‌شناسی بتواند CO₂ را برای سال‌ها نگاه دارد. در نظر گرفته شده است که برای ذخیره سازی CO₂ موثر، ۹۹ درصد از CO₂ ذخیره شده باید در یک دوره ۱۰۰ ساله حفظ شود. دستورالعمل اتحادیه اروپا

‡ Bottom up inventories

^۵. Oxyfuel

EC/۲۰۰۹/۳۱ (ذخیره سازی دی اکسید کربن در زمین)، چارچوبی را برای مقررات زیست محیطی جذب و ذخیره کربن (CCS) در سراسر کشورهای عضو اتحادیه اروپا تشکیل می‌دهد. ارزیابی اثرات زیست محیطی اجباری است و سناریوهای نشت باید برای هر مکان پیشنهادی گنجانده شود. همچنین باید یک طرح نظارتی تنظیم شود تا تأیید شود که CO₂ تزریق شده مطابق انتظار عمل می‌کند. ابزار پایش بر جذب، تزریق، انتقال و ذخیره CO₂ هنوز به صورت تجاری در دسترس نیست. برای اجرای این مقررات، ابزار دقیق باید توسعه، ارزیابی، واسنجی و تایید شود. آزمایشگاه ملی فیزیک (NPL) در نقش خود به عنوان مؤسسه ملی اندازه گیری بریتانیا، در حال توسعه ابزارهای اندازه گیری و واسنجی است که برای مقابله با چالش های اجرای CCS مورد نیاز است. در هر مرحله از فرآیند CCS، انتشار گازهای گلخانه‌ای باید پایش شود تا با دستورالعمل CCS مطابقت داشته باشد. تشخیص، پایش و اندازه‌گیری CO₂ در طول فرآیند برای چندین هدف مورد نیاز است: اندازه‌گیری مقدار CO₂ جذب‌شده، اندازه‌گیری مقدار CO₂ ذخیره‌شده، محاسبه CO₂ از دست رفته در طول فرآیند، شناسایی انتشار فرار، تعیین اثربخشی فرآیند ذخیره‌سازی، تشخیص نشت به دلایل ایمنی. اندازه گیری آلاینده‌ها در جریان CO₂ نیز باید شناسایی شود [۱۹].

۲-۲ انواع انتشار CO₂ اتمسفر

۱. انتشار گازهای باقیمانده: CO₂ آن‌هایی که پس از فرآیند جذب، جذب نشده و به اتمسفر منتشر می‌شوند. انتظار می‌رود که فرآیند ضبط میان ۸۵ تا ۹۵ درصد کارایی داشته باشد. ۲. انتشار تهویه شده: می‌تواند عمدی و از پیش برنامه‌ریزی شده یا به دلایل اضطراری باشد. ۳. گازهای گلخانه‌ای فرار: آن‌هایی هستند که ناخواسته یا نامنظم هستند، مانند نشت از دریچه‌ها، اتصالات لوله‌ها، و آب‌بندی‌های مکانیکی. آن‌ها در جایی قرار می‌گیرند که تجهیزات جابجایی CO₂ مانند مراحل تراکم و خطوط لوله قرار دارند و عموماً ماهیت منبع نقطه‌ای دارند، اگرچه تجمع و ادغام ممکن است در اطراف نشتی رخ دهد. انتشار فرار ممکن است از خود منطقه ذخیره‌سازی زمین‌شناسی نیز رخ دهد، مانند نشت از طریق گسل‌های زمین‌شناسی یا چاه‌های ناشناخته/آب‌بندی نشده. انتشار CO₂ ممکن است خارج از مجاورت محل تزریق انجام شود زیرا ممکن است از طریق لایه‌های متخلخل زیرسطح منتقل شود. بنابراین، نوع انتشار می‌تواند هم از منابع نقطه‌ای، مرتبط با محل تزریق یا چاه‌های قدیمی یا پراکنده که یک منطقه وسیع را پوشش می‌دهد باشد [۱۹].

۳-۲ فناوری‌های پایش CO₂ اتمسفر

سه فناوری برای پایش نوسان‌های CO₂ اتمسفر توسعه یافته و ارزیابی شده است: (i) تصویرگر حرارتی اصلاح شده (ii) طیف سنج لیزر دیود قابل تنظیم (TDL) (iii) و پایشگر انتشار پیوسته (CEM) برای اندازه‌گیری دقیق محتوای CO₂ در گازهای باقیمانده

6. Carbon Capture and Storage

7. Tunable Diode Laser

8. Continuous Emission Monitoring

۲-۳-۲ تصویرگر حرارتی اصلاح شده

تصویرگر حرارتی اصلاح شده برای رفع نیاز به شناسایی محل انتشار هر گونه گازهای گلخانه‌ای از فرآیند CCS که عمدتاً مربوط به کارخانه، دریاچه‌ها، کمپرسورها، خطوط لوله و سرچاه است، توسعه یافته است و می‌تواند به عنوان بخشی از یک بررسی دوره‌ای استفاده شود یا در جایی که نشستی از جریان یا اندازه‌گیری‌های دیگر شناسایی شده است اما مکان آن ناشناخته است.

فناوری تصویرگر حرارتی برای تشخیص گازها جدید نیست و دوربین‌ها به صورت تجاری برای تشخیص انتشار ترکیبات آلی فرار (VOC)، گازهای SF₆ و CO اما نه CO₂ در دسترس هستند. با فیلتر کردن دوربین برای حساس بودن به طول موج‌هایی که توسط گاز مورد نظر جذب می‌شوند، حضور گاز به عنوان یک دود تیره در تصویر دیده می‌شود [۱۹]

۲-۳-۲ طیف سنج لیزری دیود قابل تنظیم (TDL)

طیف‌سنج TDL مسیر باز اندازه‌گیری غلظت CO₂ ناشی از انتشار فرار از همه جنبه‌های فرآیند CCS را امکان‌پذیر می‌کند. به ویژه ابزار باید قادر به تشخیص نشت‌های پراکنده مانند موارد مرتبط با یک منطقه ذخیره‌سازی زیرزمینی باشد. تخمین زده می‌شود که ابزار باید حساسیتی در حدود ۱ ppm در سطح زمینه ۳۸۵ ppm داشته باشد. در مسیرهای باز اتمسفر، تغییرات در جذب این سطح شبیه به تغییرات ناشی از دما و فشار خواهد بود. علاوه بر این، تغییرات روزانه و فصلی و تغییرات در سطح پس زمینه طبیعی CO₂ در جو وجود خواهد داشت. برای اندازه‌گیری تفاوت در جذب اندازه‌گیری شده ناشی از تغییرات دما و فشار در طول مسیر لیزر، TDL به طور همزمان غلظت اکسیژن را اندازه‌گیری می‌کند که ثابت در نظر گرفته می‌شود. برای در نظر گرفتن تغییرات طبیعی، اندازه‌گیری‌های رو به باد و پایین باد باید انجام شود و در حالت ایده آل تغییرات غلظت CO₂ قبل از شروع عملیات CCS ثبت شود. TDL مسیر باز از یک واحد فرستنده حاوی اپتیک‌های انتقال و دریافت، آشکارسازها و تقویت‌کننده‌ها استفاده می‌کند. دو بازخورد توزیع شده در نزدیکی دیودهای لیزر فروسرخ و جداکننده‌های نوری در یک واحد الکترونیکی وجود دارد که همچنین جداکننده‌های فیبر، درایورهای دیود لیزر و سخت‌افزار جمع‌آوری داده را در خود جای داده است. لیزرها از طریق فیبرهای نوری به واحد فرستنده گیرنده متصل می‌شوند. این دستگاه دارای حسگر دما و فشار نیز می‌باشد. پرتوهای لیزر از واحد فرستنده گیرنده به یک مکعب گوشه یا آرایه‌ای از مکعب‌های گوشه هدایت می‌شوند که پرتو را به سمت فرستنده گیرنده منعکس می‌کند. پرتو لیزر در خروجی سامانه منبسط می‌شود که هر گونه خطر لیزر برای چشم را کاهش می‌دهد. این سامانه استاتیک است که در آن اپتیک‌های گسترش دهنده پرتو نیز تلسکوپ گیرنده هستند. مکعب گوشه را می‌توان از ۳۰ تا ۲۰۰ متر یا بیشتر از واحد فرستنده گیرنده قرار داد. غلظت CO₂ را می‌توان با اندازه‌گیری جذب در طول مسیر لیزر با استفاده از روش‌های مبتنی بر قانون بیر-لامبرت محاسبه کرد. خروجی لیزر در طول موج در طول یک ویژگی جذب اسکن می‌شود و از آنجایی که جذب در طول موج‌های مورد استفاده نسبتاً قوی است، می‌توان از تکنیک جذب مستقیم استفاده کرد [۱۹].

۳-۳-۲ پایشگر انتشار پیوسته

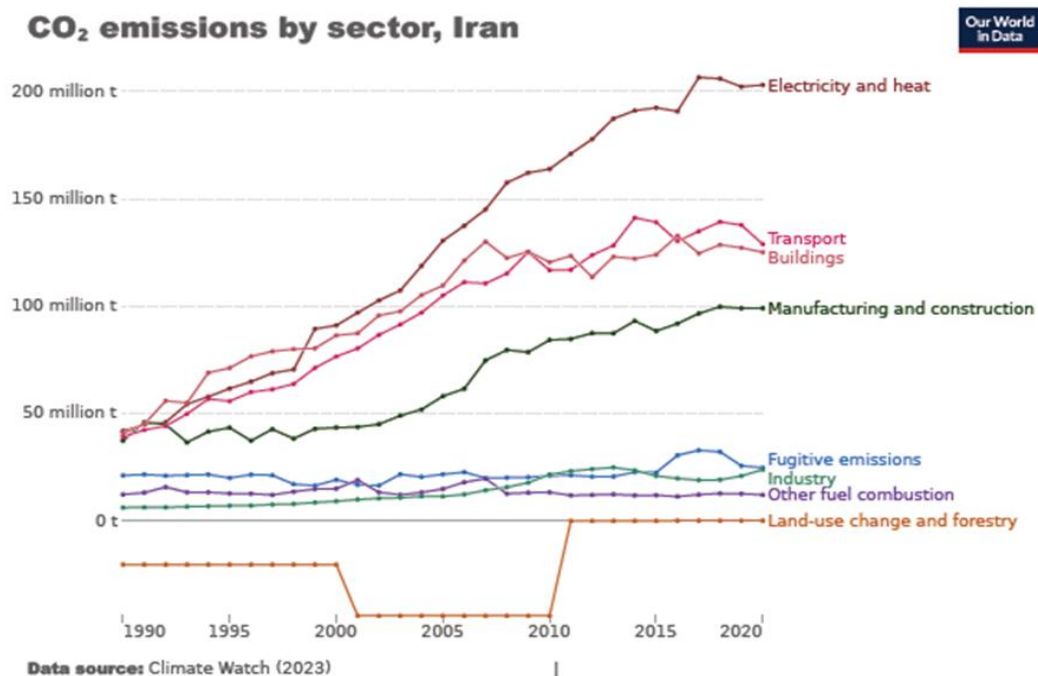
سند EC/۲۰۰۷/۵۸۹ تصمیم کمیسیون مورخ ۱۸ ژوئیه ۲۰۰۷ که دستورالعمل‌هایی را برای پایش و گزارش انتشار گازهای گلخانه‌ای بر اساس دستورالعمل EC/۲۰۰۳/۸۷ ایجاد و عدم قطعیت مجاز $\pm 2/5$ از جمله خطاهای اندازه‌گیری جریان را بیان می‌کند. این تقریباً ده برابر بهتر از دقت MCERTهای فعلی (۲۰٪) برای SO_2 و NO_x از نیروگاه‌های احتراق بزرگ است. پایشگر انتشار پیوسته برای اندازه‌گیری میزان گاز دی اکسید کربن اتمسفر در جاهایی از بریتانیا در آزمایش‌های بزرگ اندازه به کار گرفته شده و دقت و همبستگی خوبی گزارش شده است [۱۹].

نمودار ۶ انتشار گاز CO_2 را در بخش‌های مختلف اقتصاد ایران نشان می‌دهد (نمودار مربوط به کشورهای هند، پاکستان، مصر، مکزیک و ترکیه در بخش پیوست گزارش ارائه شده است). انتشار جهانی CO_2 مانند کل گازهای گلخانه‌ای است: تولید برق و گرما بیشترین سهم را از انتشار دی اکسید کربن دارد و به دنبال آن ترابری، تولید فراورده‌های صنعتی مانند سیمان و فولاد، و ساخت و ساز قرار دارند. یک تفاوت کلیدی این است که انتشار CO_2 در بخش کشاورزی (اگر تغییر کاربری زمین و جنگلداری را حذف کنیم) نشان داده نمی‌شود زیرا که اندازه‌گیری آن از زمین‌های کشاورزی حتی در کشورهای گروه ۷ هم بسیار دشوار است. مانند انتشار کل گازهای گلخانه‌ای، انتشار دی اکسید کربن در میان کشورها متفاوت است. میزان انتشار گاز دی اکسید کربن در ایران در سال ۲۰۲۰ در بخش‌های مختلف عبارتند از ۲۰۳/۰۵ میلیون تن در بخش تولید برق و گرما، ۱۲۸/۸۳ میلیون تن در ترابری، ۱۲۵ میلیون تن در ساختمان‌های تجاری و مسکونی، ۹۹ میلیون تن در تولید فراورده‌های صنعتی مانند سیمان و فولاد، ۲۴/۶۵ میلیون تن در نشتی از تاسیسات نفت و گاز و دیگر نشتی‌ها، ۲۳/۸۷ میلیون تن در صنعت، ۱۲/۰۳ میلیون تن در احتراق سوخت‌های دیگر و ۶۰ هزار تن در «کاربری زمین و تغییر کاربری زمین و جنگلداری» [۱۵]. همان‌طور که در نمودار ۶ دیده می‌شود از سال ۲۰۱۹ همزمان با شیوع همه‌گیری کرونا و تاثیر آن بر بخش‌های مختلف اقتصاد میزان دی اکسید کربن منتشر شده از بخش‌های مختلف اقتصاد ایران روند کاهشی داشته یا در سطحی تقریباً ثابت باقی مانده است.

جدول ۱۳ نیز میزان انتشار گاز CO_2 را در بخش‌های مختلف اقتصاد ایران و جهان در سال‌های ۱۹۹۰ و ۲۰۲۰ را نشان می‌دهد. بیشترین میزان افزایش انتشار گاز CO_2 در بین کشورهای مورد بررسی در این گزارش در طی ۳۰ سال مربوط به کشور هند با حدود ۵۳۰ درصد افزایش و کمترین میزان نیز مربوط به کشور مکزیک با حدود ۳۷ درصد افزایش می‌باشد که این میزان برای کشور ایران حدود ۲۸۰ درصد افزایش است. همچنین میزان انتشار گاز CO_2 در کل بخش‌های مختلف اقتصاد ایران در سال ۲۰۲۰ برابر با ۶۹۱/۴۶ میلیون تن معادل دی اکسید کربن است.

جدول ۱۳- میزان انتشار گاز دی اکسید کربن بخش های مختلف اقتصاد ایران و جهان (میلیون تن معادل دی اکسید کربن) [۱۵].

کشور	کل بخش های مختلف اقتصاد		میزان افزایش طی ۳۰ سال (%)
	۱۹۹۰	۲۰۲۰	
ایران	۱۸۲/۰۸	۶۹۱/۴۶	۲۸۰/۷۵
هند	۳۴۵/۹۳	۲۱۷۴/۷۹	۵۲۸/۶۸
پاکستان	۶۸/۹	۲۱۵/۸۷	۲۱۳/۳۱
مکزیک	۲۹۶/۸۴	۴۰۷/۷۴	۳۷/۳۶
ترکیه	۱۲۳/۱۶	۳۸۵/۶۵	۲۱۳/۱۳
مصر	۹۳/۱۳	۲۱۰/۳۱	۱۲۵/۸۲



شکل ۶- انتشار گازی اکسید کربن در بخش های مختلف اقتصاد ایران در بازه زمانی ۱۹۹۰ و ۲۰۲۰ (میلیون تن)

۲-۴ اندازه گیری و پایش انتشار متان

اندازه گیری انتشار و پایش متان برای توسعه «سیاهه انتشار» کارآمد ضروری است. اندازه گیری میدانی انتشار متان از بخش های مختلف می تواند درک بهتری از فرآیندهایی را که منجر به انتشار می شوند فراهم کند، به توسعه مدل های ریاضی انتشار متان و همچنین راهبردهای کاهش در مقیاس منطقه ای کمک کند. علاوه بر این، پایش میزان متان جو نیز برای شناسایی روندهای منطقه ای انتشار و آزمون «رویکردهای پایین به بالا» مورد نیاز است.

اندازه گیری های متان و برآوردهای انتشار در گستره ای از اندازه های مکانی و زمانی انجام می شوند: از ارزیابی های جهانی سالانه در مقیاس بزرگ تا اندازه گیری های مقیاس کوچک از منابع جداگانه در بازه های زمانی کوتاه. با اندازه گیری

⁹ . Emission inventories

میزان متان در جو در اندازه‌های مکانی بزرگ‌تر (به عنوان مثال، جهانی، قاره‌ای و منطقه‌ای) می‌توان، با یاری مدل‌های ریاضی، برآوردی از انتشار متان در پهنه جغرافیایی گسترده به دست آورد. به این گونه برآورد انتشار متان، که انتشار گازهای گلخانه‌ای از منابع متعدد را گردآوری می‌کند، «ارزیابی از بالا به پایین top down» گفته می‌شود. در اندازه‌های مکانی کوچک‌تر، اندازه‌گیری‌ها از فرآیندهای منفرد، منابع منفرد یا اجزای درون یک تأسیسات به اندازه‌های بزرگ‌تر (منطقه‌ای، ملی، جهانی) تعمیم داده می‌شوند. به این ارزیابی‌ها، «رهیافت‌های از پایین به بالا bottom up» گفته می‌شود. برآورد انتشار متان در مقیاس‌های مکانی میانی مانند یک نیروگاه فرآوری گاز طبیعی، یک عملیات تغذیه حیوانات، یا یک جایگاه‌های دفن پسماند در منطقه‌ای بزرگ ممکن است «پایین به بالا» یا «بالا به پایین» یا هر دو در نظر گرفته شود. در این اندازه‌های میانی، انتشار از منابع یا اجزای متعدد در یک تأسیسات ممکن است مانند ارزیابی از بالا به پایین گردآوری شود. در همان زمان، مجموع انتشار گازهای گلخانه‌ای تأسیسات ممکن است برای نشان دادن انتشار گازهای گلخانه‌ای از سایر تأسیسات مشابه، مانند ارزیابی از پایین به بالا، استفاده شود (یعنی در مقیاس‌های میانی، هر دو رهیافت «از بالا به پایین» و «از پایین به بالا» همزمان برای برآورد انتشارمتان به کار گرفته شوند).

علاوه بر مقیاس مکانی گوناگون، هر دو رویکرد از بالا به پایین و پایین به بالا اندازه‌های زمانی متفاوتی دارند. اندازه‌گیری‌های تک منبعی ممکن است در اندازه‌های زمانی کوتاه (ساعت/روزانه) یا طولانی (ماهانه/سالانه) بسته به روش‌های مورد استفاده انجام شوند. روش‌های محفظه، روش‌های حسگر سوار بر خودرو و نمونه‌برداری از هواپیما، عکس‌های فوری از انتشار گازهای گلخانه‌ای را در دوره‌های زمانی کوتاه‌تر ثبت می‌کنند. برخی از روش‌های هواشناسی و پایش برج‌های بلند ممکن است اطلاعاتی را از روزها تا سال‌ها ارائه دهند. پایش‌های ماهواره‌ای که اندازه‌های منطقه‌ای تا جهانی را پوشش می‌دهند، ممکن است عکس‌های فوری آنی ارائه دهند یا برای ارائه اندازه‌گیری‌های طولانی مدت به‌طور میانگین زمانی محاسبه شوند.

۲-۴-۱ روش‌های از پایین به بالا برای اندازه‌گیری انتشار متان

روش‌های انتشار از پایین به بالا از نظر تاریخی با ضرب داده‌های فعالیت (به‌عنوان مثال، تعداد دام، عملیات گاز طبیعی، پسماندهای دفن‌شده) در عوامل انتشار (مانند انتشار به ازای هر راس دام، انتشار به ازای هر واحد فرآوری گاز طبیعی) ایجاد شده‌اند. با این حال، برای برخی از منابع انتشارمتان (به عنوان مثال جاهای دفن پسماند، کود)، چنین محاسبات ساده‌ای معمولاً نامناسب هستند. انتشارناشی از چنین منابعی به صورت میکروبی هدایت می‌شوند یا در معرض تفاوت‌های قابل توجهی در تجهیزات یا شیوه‌های عملیاتی هستند و به همین ترتیب، آنها در معرض تغییرات زمانی و مکانی زیادی هستند. این نیاز به پوشش زمانی و مکانی بهتر در هنگام اندازه‌گیری دارد. پروژه‌های تحقیقاتی از روش‌های میدانی متعددی برای اندازه‌گیری انتشارمتان استفاده کرده‌اند. در حالی که ماهیت و منابع داده‌های فعالیت در بررسی‌های انجام شده متفاوت است بسیاری از این بررسی‌ها روش‌های همانندی برای برآورد انتشارمتان به کار گرفته‌اند که در زیر به آن‌ها اشاره شده است.

مروری بر روش‌های اندازه‌گیری از پایین به بالا

انتشار متان را می‌توان از منابع نقطه ای و مساحتی با استفاده از طیف گسترده‌ای از روش‌های پایین به بالا مانند تعیین مستقیم غلظت متان و سرعت جریان در یک دریچه نشستی و روش‌های موازنه جرم در یک تاسیسات اندازه گیری کرد. همچنین مانند: i) روش‌های اتاقکی که از سری زمانی میزان متان برای برآورد انتشار آن در مقیاس یک متر مربع یا انتشار متان از تک تک جانوران یا از گروهی از آن‌ها استفاده می‌کنند. ii) رویکردهای موازنه جرم برای تعیین مقدار انتشار متان از دامها، iii) روش‌های هواشناسی برای برآورد انتشار گازهای گلخانه‌ای.

i. روش اندازه‌گیری نقطه‌ای

برخی از منابع انتشار دارای نقاط انتشار مجزا و به خوبی تعریف شده هستند (یعنی دریچه ها)، و نرخ انتشار را می‌توان مستقیماً از ترکیب و سرعت جریان گاز در آن نقطه تعیین کرد. نمونه برداری دودکشی در نقاط خروجی احتراق یک کاربرد رایج است، اما انواع دیگری از نقاط انتشار مجزا و کاملاً تعریف شده نیز وجود دارد. به عنوان مثال، سامانه‌های تهویه معدن زغال سنگ می‌توانند متان را از طریق دودکش‌ها آزاد کنند. شیرهای پنوماتیک و چندین منبع مجزا در هر دو زنجیره تامین نفت و گاز طبیعی می‌توانند در حین کار متان ساطع کنند. یکی از روش‌های اندازه‌گیری منابع نقطه‌ای، استفاده از کیسه‌های کالیبره شده است که در آن کیسه نمونه، زمانی که به طور کامل باد می‌شود، حاوی حجم مشخصی از گاز است که در یک دوره زمانی مشخص جمع‌آوری شده است. همچنین، برای حیوانات نشخوارکننده، انتشار متان روده‌ای برای گاوها می‌تواند با استفاده از روش ردیاب داخلی اندازه‌گیری شود [۲۰]. در کاربردهای دیگر برای منابع نقطه‌ای صنعتی، دستگاه‌های اندازه‌گیری نمونه‌برداری با نرخ جریان شناخته شده تلاش می‌کنند تا کل جریان انتشار را به تصویر بکشند- نرخ انتشار متان با ضرب نرخ نمونه‌برداری در غلظت متان منهای غلظت هوای پس‌زمینه محاسبه می‌شود.

ii. روش اتاقکی

انتشار متان از سطوح را می‌توان مستقیماً با استفاده از اتاقک‌های کوچکی که در بالای منبع قرار می‌گیرند (به عنوان مثال، سطوح خاک و سطوح ذخیره سازی کود) تعیین کرد. برای محفظه‌های ساکن، انتشار متان مستقیماً از تغییر غلظت متان در یک سری زمانی کوتاه ضرب در نسبت حجم به مساحت محفظه اندازه‌گیری می‌شود [۲۱]. اتاقک‌های دینامیکی (گاز در یک محفظه با سرعت مشخصی جریان می‌یابد) انتشار را بر اساس تفاوت میان غلظت متان ورودی و خروجی و سرعت جریان گاز اندازه‌گیری می‌کنند [۲۲]. رویکرد اتاقک برای تعیین کمیت انتشار از جاهای دفن پسماند و خطوط لوله بالا، سطوح آب (با استفاده از اتاق‌های شناور) در تالاب‌های مدیریت کود، گروه‌های کوچک حیوانات، و کاربردهای متعدد دیگر استفاده شده است. اتاقک‌های اندازه‌گیری سطح معمولاً ۱ متر مربع یا کمتر را در بر می‌گیرند و برای تعیین کمیت گوناگونی انتشار مفید هستند. نکته مهم این است که محفظه‌های ساکن همچنین می‌توانند به طور مستقیم میزان جذب متان اتمسفر توسط متانتروف‌های خاک با ظرفیت اکسید کنندگی بالا را تعیین کنند [۲۳].

iii. روش‌های ریزه‌واشناسی

اگر انتشار از یک منبع را نمی‌توان محصور یا ضبط کرد، چندین روش ریزه‌واشناسی وجود دارد که می‌تواند با استفاده از برج‌هایی با حسگرهای واکنش سریع متان و شناساگرهای سرعت/جهت باد، همراه با مدلسازی، انتشار متان را برآورد کند. اندازه‌گیری‌های انجام شده در یک مکان و ارتفاع خاص بیانگر شرایط سطح زیرین حسگر در مقابل باد است. این ناحیه تحت تأثیر «ردپا» نامیده می‌شود و به عواملی مانند ارتفاع اندازه‌گیری، ارتفاع زبری، لایه‌بندی، انحراف استاندارد جزء جانبی باد و سرعت باد بستگی دارد. بنابراین، برای ارزیابی دقیق انتشار گازهای گلخانه‌ای منبع، ردپا باید یک منطقه به اندازه کافی بزرگ از منبع را پوشش دهد تا گوناگونی مکانی انتشار را به تصویر بکشد.

iv. ردیاب خارجی

اندازه‌گیری انتشار گاز متان از منابع (مانند دفن پسماند، مناطق اسکان دام، و چاه گاز طبیعی) نیز می‌تواند با استفاده از یک ردیاب خارجی انجام شود. در این رویکرد، یک گاز ردیاب که از تاسیسات ساطع نمی‌شود (اغلب اکسید نیتروز یا استیلن) با سرعت مشخصی در منبع مورد نظر یا نزدیک به آن آزاد می‌شود. اندازه‌گیری‌های رو به باد از ردیاب و متان انجام می‌شود و نرخ انتشار متان با ضرب نرخ رهاسازی ردیاب در نسبت غلظت متان به ردیاب مشاهده شده در جهت باد برآورد می‌شود. [۲۴،۲۵،۲۶] نرخ انتشار برآورد شده بر این فرض تکیه دارد که متان و ردیاب تحت پاشش (dispersion) جوی یکسانی میان منبع و جای اندازه‌گیری قرار می‌گیرند. اگر بخشی از انتشار گازهای گلخانه‌ای از یک جایگاه شناور باشد (مثلاً متان تا حدی نسوخته در آگروز احتراق) [۲۷] و ردیاب‌ها به طور مشابه شناور نباشند یا اگر منبع حاوی مخلوطی از ردیاب‌های شناور و غیرشناور باشد، این فرض ممکن است از میان برود. همچنین اگر بخشی از انتشار از مکان‌های مرتفع (مثلاً از بالای مخزن ذخیره) و بخشی دیگر در سطح زمین باشند، این فرض ممکن است از میان برود. برای پرداختن به این مسائل، محققین [۲۸] از ردیاب‌های خارجی متعدد برای اندازه‌گیری یک منبع واحد استفاده کرده‌اند. یک نوع رهاسازی ردیاب در نقطه رهاسازی بالا و سایر ردیاب‌ها در نزدیکی سطح زمین منتشر می‌شود. از ردیاب‌های متعدد نیز می‌توان برای ارائه یک برآورد کمی از میزانی که ردیاب و انتشار مورد نظر تحت پاشش یکسان قرار نمی‌گیرند، استفاده کرد.

v. مدل‌سازی پاشش وارون

انتشار متان از منابع نقطه‌ای و منطقه‌ای را نیز می‌توان با استفاده از مدلسازی پاشش وارون با اندازه‌گیری متان در باد به تنهایی (بدون ردیاب خارجی)، همراه با اندازه‌گیری غلظت متان پس‌زمینه و سرعت باد، جهت باد و تلاطم هوا تعیین کرد. سپس این داده‌ها با مدلسازی پاشش برای برآورد نرخ انتشار همراه می‌شوند. مشابه روش‌های ریزه‌واشناسی، به منظور ارزیابی دقیق انتشار گازهای گلخانه‌ای منبع، ردپا باید یک منطقه به اندازه کافی بزرگ از منبع را پوشش دهد تا گوناگونی مکانی انتشار را در نظر بگیرد. غلظت در باد را می‌توان به روش‌های مختلفی اندازه‌گیری کرد. یکی از روش‌ها اندازه‌گیری غلظت متان در ارتفاع ثابت بالاتر از سطح زمین در پایین باد منبع روی یک سکوی

متحرک، اغلب یک وسیله نقلیه است. اگر وسیله نقلیه در مسیری عمود بر جهت باد حرکت کند، وسعت افقی ستون را می توان تعیین کرد. به طور معمول، غلظت های مشاهده شده و گوناگونی آن ها در سرتاسر ستون به یک مدل پراکندگی برای برآورد نرخ انتشاربرازش می شوند [۳۰،۲۹]. به دلیل گوناگونی مکانی و زمانی زیاد انتشاراز سطوح دفن پسماند، معمولاً تطابق ضعیفی میان غلظت متان پیش بینی شده و اندازه گیری شده در باد با استفاده از مدل های پاشش استاندارد مشاهده می شود. برخی از محققان وسایل نقلیه ای را با توانایی اندازه گیری غلظت در ارتفاعات چندگانه بالاتر از سطح زمین تجهیز کرده اند که خصوصیات ستون و دقت برآورد انتشاررا بهبود می بخشد. سایر محققین از روش هایی استفاده کرده اند که غلظت متان یکپارچه را در کل ستون اتمسفر بالای وسیله نقلیه به جای در ارتفاعات مشخص اندازه گیری می کند [۳۱]. اندازه گیری غلظت باد را می توان در یک نقطه ثابت یا در یک فاصله ثابت با استفاده از ابزارهای مسیر باز، همراه با آمار باد سه بعدی انجام داد و برای برآورد نرخ انتشاربه یک مدل پاشش برازش کرد [۳۰،۳۲]. دقت این روش بستگی به موقعیتی دارد که در آن استفاده می شود. به عنوان مثال، چندین مطالعه اعتبار سنجی با استفاده از روش پراکندگی وارون تصادفی لاگرانژی برای اندازه گیری انتشاراز دام، خطاهای کمتر از ۲۰ درصد را گزارش می کنند، احتمالاً به این دلیل که این انتشارنسبتاً یکنواخت هستند [۳۳،۳۴،۳۵]. با این حال، برای اندازه گیری انتشارمتان از نفت و گاز طبیعی، که تمایل به متغیر بودن بیشتری دارند، ممکن است خطاها بسیار بیشتر باشد. تجزیه و تحلیل اخیر برآورد انتشار بر اساس مدلسازی پاشش در باد، مرزهای خطای ۱۱۷/۴۶+ را گزارش می کند [۳۶].

vi. اندازه گیری های درجا با هواپیما

اندازه گیری های مبتنی بر هواپیما را می توان برای برآورد انتشار گازهای گلخانه ای از تأسیسات فردی (به عنوان مثال، عملیات تغذیه حیوانات، جایگاه های دفن پسماند، یا تأسیسات پردازش گاز طبیعی) استفاده کرد. یک روش معمولی پرواز در مسیرهای پرواز بسته متحدالمرکز در ارتفاعات چندگانه در اطراف یک منبع و در عین حال اندازه گیری مداوم غلظت متان، سرعت باد و جهت باد است. نرخ انتشار با استفاده از رویکرد تعادل جرم برآورد زده می شود. تفاوت غلظت میان بخش های رو به باد و رو به باد مسیرهای پرواز در نرخ تهویه برای حجم محصور شده توسط مسیرهای پرواز ضرب می شود تا به برآورد انتشاربرسد [۳۷]. این تکنیک ها برای انواع منابع متان در مناطق شهری به کار گرفته شده است [۳۸،۳۹]. این رویکرد در همسنجی با روش های دیگر (به عنوان مثال ردیاب ها) در مراحل نسبتاً اولیه است و محدودیت های متعددی وجود دارد که باید در نظر گرفته شوند. برای مثال اندازه گیری های هواپیمای تأسیسات تنها در شرایط محدود موفقیت آمیز هستند، زمانی که هیچ منبع مخدوش کننده ای در نزدیکی تأسیسات وجود ندارد و زمانی که هواپیما می تواند تقریباً تا انتهای ستون انتشارپرواز کند. علاوه بر این، این رویکرد تنها می تواند انتشار گازهای گلخانه ای را که در ارتفاعات پرواز در فاصله شعاعی پرواز با آن مواجه می شوند، شناسایی کند. مشخص نیست که برون یابی از سطح پرواز پایین به زمین برای انتشارنزدیک به زمین قوی باشد (به عنوان مثال، یک دریچه نشی دمنده).

۲-۴-۲ روش‌های پایین به بالا برای اندازه‌گیری انتشار متان در بخش کشاورزی

دو منبع برای انتشار متان از دام وجود دارد: تخمیر روده ای (عمدتاً در دستگاه گوارش حیوانات نشخوارکننده) و مدیریت کود (متان تولید شده توسط متانوژنر در طول ذخیره سازی کود). برای برخی از سامانه‌های تولید نشخوارکنندگان (به عنوان مثال، گوشت گاو یا گاو شیری در مرتع)، تخمیر روده ای منبع اصلی انتشار متان است. در سیستم‌های تولید نشخوارکنندگان که در آن کود به صورت مایع استفاده می‌شود (مثلاً انبارهای لبنی که در آن کود با آب از انبار تخلیه می‌شود)، انتشار متان از مدیریت کود می‌تواند به اندازه یا حتی بیشتر از انتشار گازهای گلخانه‌ای روده باشد. برای سامانه‌های تولید غیرنشخوارکننده (مانند خوک، طیور)، متان تولید شده از ذخیره کود منبع اصلی انتشار متان است. انتشار متان از دام‌ها به صورت میکروبی هدایت می‌شود و بنابراین می‌تواند گوناگونی مکانی و زمانی زیادی داشته باشد، زیرا فعالیت میکروبی توسط بستر موجود و همچنین سایر شرایط کنترل می‌شود. بنابراین، باید دقت شود تا اطمینان حاصل شود که گوناگونی زمانی، مکانی و حیوانی (روده‌ای) در انتشار به منظور نمایش دقیق انتشار از هر دسته منبع داده شده است [۱۸].

i. متان روده‌ای

اصطلاح «متان روده‌ای» به متان تولید شده توسط فعالیت‌های مربوط به تخمیر میکروبی در دستگاه گوارش حیوانات نشخوارکننده یا غیرنشخوارکننده اشاره دارد [۴۰]. حیوانات نشخوارکننده بزرگترین عامل انتشار متان در کشاورزی هستند. با این حال، حیوانات غیرنشخوارکننده نیز متان را از طریق فعالیت‌های تخمیر در روده خود منتشر می‌کنند. متان روده‌ای می‌تواند توسط نشخوارکنندگان از طریق بازدم یا نفخ منتشر شود. پیش از این [۴۱] و داده‌های جدیدتر [۴۲] به صراحت سهم کمتری از متان (۲-۳ درصد) منتشر شده از طریق نفخ را در همسنجی با متان منتشر شده از طریق بازدم نشان داده‌اند. بخش قابل توجهی از متان تولید شده در شکمبه، بزرگترین اندام دستگاه گوارش حیوان نشخوارکننده، به جریان خون جذب می‌شود (۱۲ درصد) [۴۳]. با این حال، بیشتر این متان از طریق ریه‌ها بازدم می‌شود [۴۴].

روش‌های اندازه‌گیری متان روده‌ای از دام شامل اتاقک‌های محصور، روش‌های ردیاب، روش‌ها sniffer و آشکارسازهای لیزری دستی متان می‌شود. «استاندارد طلایی» برای اندازه‌گیری انتشار متان روده از حیوانات مزرعه (نشخوارکنندگان و غیرنشخوارکنندگان) اتاق تنفس است. اصول اصلی اتاق‌های تنفس دینامیکی اندازه‌گیری جریان هوای ورودی و خروجی، غلظت گازهای مورد نظر در آن هوا و غلظت اولیه و نهایی گاز در محفظه است. بحث مفصلی در مورد طراحی و عملکرد اتاق‌های تنفسی در کتابچه راهنمای فنی طراحی‌های اتاق تنفس، منتشر شده توسط اتحادیه تحقیقات جهانی [۴۵] ارائه شده است. حیوانات معمولاً برای چند روز در اتاقک قرار می‌گیرند (توصیه می‌شود حداقل ۳ روز باشد)، در طی آن‌ها تغذیه و شیردهی می‌شوند (در صورت شیردهی)، و کود از اتاق خارج می‌شود. قبل از انجام اندازه‌گیری، حیوانات باید با محیط اتاق سازگار شوند. مزیت اصلی اتاق‌های تنفس این است که (۱) زمانی که به درستی کالیبره و کار می‌کنند دقیق هستند، (۲) همه گازهای متان، از جمله از مقعد، ضبط می‌شوند، و (۳)

اندازه‌گیری‌ها به طور مداوم در طول چند روز انجام می‌شوند، به حساب روزانه. تغییر در انتشارمتان نتایج آزمایش حلقه‌ای اخیر اتاق‌های تنفس در بریتانیا اهمیت واسنجی را برای دقت و دقت اتاق‌های تنفس نشان داد [۴۶]. اشکالات اتاق‌های تنفس این است که (۱) حیوانات در یک محیط «غیر طبیعی» قرار می‌گیرند که در بسیاری از موارد منجر به استرس و کاهش مصرف خوراک و / یا تولید شیر می‌شود. (۲) محفظه‌ها را نمی‌توان برای اندازه‌گیری انتشار گازهای گلخانه‌ای از تعداد زیادی از حیوانات بزرگ به طور همزمان استفاده کرد (که برای انتخاب ژنتیکی انتشاردهنده‌های کم متان مهم است). و (۳) گران هستند و به آموزش گسترده و مهارت‌های عملیاتی نیاز دارند.

در حالی که می‌توان از سامانه‌های محفظه‌ای برای اندازه‌گیری انتشار گازهای گلخانه‌ای از نشخوارکنندگان و غیرنشخوارکنندگان استفاده کرد، روش‌های مختلفی برای اندازه‌گیری انتشارمتان روده‌ای از حیوانات نشخوارکننده وجود دارد. یک روش پرکاربرد روش ردیاب هگزا فلوراید گوگرد (SF6) است که ابتدا توسط [۲۰] توسعه یافت و اولین بار توسط جانسون و همکاران استفاده شد [۴۷]. این روش اخیراً توسط دیتون و همکاران اصلاح و بهبود یافته است [۴۸] این روش مبتنی بر استفاده از گاز ردیاب SF6 است که به طور مداوم با سرعت مشخصی از یک لوله نفوذ قرار داده شده در شکمبه (یکی از بخش‌های معده پیچیده نشخوارکنندگان) و مخلوط با گازهای شکمبه آزاد می‌شود. گاز دفع شده به طور مداوم از اطراف سوراخ‌های بینی حیوان در یک ظرف تخلیه شده نمونه برداری و برای SF6 و متان آنالیز می‌شود. برای محاسبه میزان انتشار متان از نسبت دو گاز و نرخ انتشار SF6 استفاده می‌شود. این روش در همسنجی با سرمایه گذاری برای ساخت و راه اندازی اتاقک‌های تنفسی هزینه کمتری دارد و به طور گسترده توسط گروه‌های تحقیقاتی در سراسر جهان مورد استفاده قرار گرفته است [۴۹-۵۱]. Deighton و همکاران (۲۰۱۴) به مهم‌ترین منابع خطا پرداخته است [۴۸] و روش اصلاح شده اندازه‌گیری متان، دقتی مشابه اتاقک‌های تنفسی دارد. برخلاف اتاقک‌ها، روش SF6 می‌تواند برای اندازه‌گیری انتشار متان از تعداد زیادی از حیوانات و در محیط طبیعی آنها استفاده شود. این روش متان تولید و دفع شده از طریق راست روده را در نظر نمی‌گیرد. دستورالعمل‌های دقیق برای استفاده از این روش توسط Berndt و همکاران منتشر شده است [۵۲].

چندین شرط مهم برای کاهش گوناگونی در داده‌های اندازه‌گیری متان هنگام استفاده از روش SF6 باید رعایت شود. اینها شامل (۱) نرخ آزادسازی بالای SF6 از لوله نفوذ، (۲) حداقل پنج روز اندازه‌گیری متوالی، و (۳) غلظت پایین SF6 و متان در هوای پس زمینه (یعنی استفاده از روش در انبارهای بسته توصیه نمی‌شود مگر اینکه تهویه کافی در طول دوره اندازه‌گیری وجود داشته باشد؛ هریستوف و همکاران، [۵۳]). هنگامی که این شرایط برآورده شود، روش ردیاب SF6 می‌تواند داده‌های دقیق انتشارمتان را از گروه بزرگی از حیوانات تولید کند.

اخیراً، یک سامانه محفظه سر خودکار (GF) GreenFeed® (GF)، برای نمونه‌برداری نقطه‌ای از گازهای بازدمی و خروجی ساخته شده است [۵۴] و مقایسه با اتاق‌های تنفس یا SF6 نشان داده است که در صورت استفاده مناسب، روش قابل اعتماد برای اندازه‌گیری انتشارمتان روده‌ای از حیوانات نشخوارکننده است [۵۵-۵۷]. مشابه روش SF6، سامانه GF را می‌توان برای انتشارمتان از گروهی از حیوانات در محیط طبیعی استفاده کرد. این روش مبتنی بر جذب

حیوان به محفظه سر GF و نگه داشتن آن برای حداقل ۵ دقیقه در هر رویداد نمونه برداری است در حالی که گازهای بیرون زده و بازدم گرفته شده و به حسگرهای گاز هدایت می‌شوند.

یک پیش‌نیاز مهم برای استفاده از سامانه GF این است که همه حیوانات در همه ساعات شبانه روز از واحد بازدید کنند. انتشارمتان یک الگوی روزانه مشخص دارد که مربوط به مصرف خوراک است (معمولاً در شب کمتر است). بنابراین برای برآورد دقیق انتشار روزانه، بازدید از حیوانات باید در یک چرخه تغذیه ۲۴ ساعته انجام شود. بهترین نتایج با سامانه GF زمانی به دست می‌آید که تعداد و زمان بازدید از حیوانات توسط محقق کنترل شود [۵۸، ۵۹]، یا اندازه‌گیری‌ها باید در یک دوره طولانی (۳-۵ هفته، بسته به اهداف مطالعه؛ [۶۰]) انجام شود. بررسی‌ها انجام شده در شرایط مرتع ممکن است به زمان بیشتری برای دستیابی به تعداد بازدیدهای مورد نیاز نسبت به بررسی‌ها انجام شده در محصور نیاز داشته باشد. روش‌های واسنجی GF و جمع‌آوری گاز پس‌زمینه توصیه‌شده باید کاملاً رعایت شود. [۶۱] مشابه روش SF6، GF نمی‌تواند متان دفع شده از طریق راست روده را اندازه‌گیری کند.

یکی دیگر از روش‌های مستقیم با کاربرد محدود، محفظه یا جعبه تهویه شده هود است [۶۲] که یک محفظه پلی‌کربنات است که سر حیوان را در بر می‌گیرد و امکان جمع‌آوری و تجزیه و تحلیل مداوم گازهای بیرون‌آمده و بازدمی را فراهم می‌کند. یک آستین گردنی به حیوان اجازه می‌دهد دراز بکشد و در حین اندازه‌گیری غذا بخورد. محفظه تحت خلاء ثابت است و هوای ورودی و خروجی از نظر غلظت متان تجزیه و تحلیل می‌شود. شرح مفصلی از چنین اتفاقی را می‌توان در [۶۳] یافت. اشکالات این روش این است که (۱) محفظه‌های هود نیاز به سرمایه‌گذاری قابل توجهی دارند، (۲) حیوانات باید به طور گسترده آموزش ببینند تا استرس را در طول آزمایش به حداقل برسانند، (۳) مصرف خوراک حیوانات احتمالاً در حین تغذیه در اتاقک کاهش می‌یابد، و (۴) این روش برای اندازه‌گیری انتشارمتان از گروه بزرگی از حیوانات مناسب نیست.

روش‌های غیرمستقیم برای اندازه‌گیری انتشارمتان روده از دام پیشنهاد و استفاده شده است. یک رویکرد از انتشار تخمینی دی‌اکسیدکربن و نسبت دی‌اکسیدکربن به متان اندازه‌گیری شده در هوای بازدمی برای برآورد انتشارمتان استفاده می‌کند [۶۴]. این روش مبتنی بر این واقعیت است که بیشتر دی‌اکسیدکربن توسط متابولیسم واسطه حیوان تولید می‌شود و قابل پیش‌بینی است. اگر کل تولید دی‌اکسیدکربن و نسبت دی‌اکسیدکربن به متان مشخص باشد، تولید کل متان را می‌توان محاسبه کرد. هلوینگ و همکاران [۶۵] روش دی‌اکسیدکربن را با اتاق‌های تنفس همسنجی کرد و برآورد کم قابل توجهی پیدا کرد. تغییرات در فعالیت‌های گوارشی و متابولیکی در همان سطح مصرف خوراک، تفاوت در بازده خوراک و گوناگونی در تخمیر شکمبه می‌تواند بر میزان دی‌اکسیدکربن تولید شده توسط حیوان تأثیر بگذارد و در نتیجه بر انتشارمتان پیش‌بینی شده تأثیر بگذارد [۶۶].

روش غیر مستقیم دیگری که توسط [۶۷] ارائه شده است متکی بر برآورد انتشارمتان درآروغ زدن جانور و اندازه‌گیری بسامد آروغ در بازه زمانی آزمایش است. نمونه‌های گاز از هوا در سامانه شیردوشی خودکار هنگام دوشیدن حیوان جمع‌آوری می‌شود. جذابیت این رویکرد (همچنین "sniffer" نامیده می‌شود) این است که انتشار گازهای گلخانه

ای را می‌توان در شرایط مزرعه و تعداد زیادی از حیوانات اندازه‌گیری کرد. این روش متان بازدمی از ریه‌ها را در نظر نمی‌گیرد. نویسندگان همبستگی خوبی را میان اندازه‌گیری‌های "sniffer" و اتاقت برای حیوانات مشابه گزارش کرده‌اند [۶۷،۶۸]. با این حال، حتی تغییرات کوچک در موقعیت سر می‌تواند منجر به تفاوت‌های بزرگ در غلظت گاز شود [۶۶]. در دو آزمایش اندازه‌گیری انتشار متان با روش "sniffer" در گاوهای شیرده، هوتانن و همکاران [۶۶] نوسان‌های بیشتری پیدا کردند که هیچ رابطه‌ای با انتشار متان اندازه‌گیری شده با سامانه GF نداشت. بررسی دیگری همچنین به این نتیجه رسید که قابلیت روش "sniffer" برای اندازه‌گیری مناسب نرخ انتشار متان در میان گاوهای شیری بسیار نامشخص است و به بررسی بیشتر نیاز دارد [۶۹].

تکنیکی شبیه به روش "sniffer" از یک آشکارساز لیزری متان برای اندازه‌گیری غلظت متان در هوای میان دستگاه لیزر و حیوان (معمولاً ۱-۳ متر) استفاده می‌کند. این روش امکان اندازه‌گیری متان را در شرایط مزرعه و تعداد زیادی از حیوانات فراهم می‌کند. با این حال، بررسی‌های تطبیقی یک رابطه مثبت اما ضعیف را میان روش لیزر و اندازه‌گیری‌های محفظه نشان دادند [۷۰،۷۱]. عوامل محیطی مانند دما، سرعت باد (به ویژه برای شرایط چرا مهم است)، و رطوبت می‌توانند بر دقت اندازه‌گیری‌ها تأثیر بگذارند. روش‌های دقیقی برای اندازه‌گیری انتشار متان روده دام در دسترس است. اگرچه برخی از این روش‌ها می‌توانند انتشار گاز متان تعداد قابل توجهی از حیوانات (حدود ۲۰ حیوان برای هر دستگاه اندازه‌گیری) را در محیط طبیعی اندازه‌گیری کنند، اما برای غربالگری حیوانات در سطح جمعیت، جهت گزینش انتشار دهندگان کم متان نامناسب هستند.

ii. مدیریت کود آلی

سامانه‌های مدیریت کود ممکن است شامل مناطق باز برای خشک کردن، انباشتن یا کمپوست کردن کودها و همچنین سامانه‌های ذخیره سازی مایع/دوغاب شامل حوضچه‌های جداسازی، جداکننده‌های مکانیکی، مخازن، چاله‌ها و تالاب‌ها باشد. بسته به نوع سامانه موجود در یک مرکز، روش‌های اندازه‌گیری برای برآورد انتشار گازهای گلخانه‌ای از این منابع متفاوت خواهد بود. برای انبارهای محصور که تهویه مکانیکی دارند، نرخ انتشار را می‌توان با روش‌های موازنه جرم تعیین کرد. برای سامانه‌های مسکن باز، روش‌های اندازه‌گیری می‌تواند شامل موازنه جرم، روش‌های ردیاب خارجی، مدلسازی وارون و روش‌های ریز هواشناسی باشد. اندازه‌گیری انتشار متان از ذخیره‌سازی کود معمولاً با استفاده از روش‌های ردیاب خارجی، مدلسازی وارون، روش‌های ریز هواشناسی یا اتاقت‌ها انجام می‌شود.

انتشار گازهای گلخانه‌ای درون تاسیسات تولید و نگهداری کودهای آلی شامل تخمیر روده‌ای نشخوار کنندگان و مدیریت کودهای آلی است، در حالی که هدف مدیریت انتشار متان درون این تاسیسات مدیریت کردن تولید درون ساختمانی کودهای حیوانی، ترابری و نگهداری آنها می‌باشد. انتشار در سطح تاسیسات را می‌توان با انواع سکوه‌ای اندازه‌گیری در مقیاس بزرگتر، مانند حسگرهای هواپیما، یا مدلسازی وارون تعیین کرد. اطلاعات در این مقیاس می‌تواند نرخ انتشار کلی را برای یک مرکز مشخص ارائه کند، اما قادر به تشخیص منبع انتشار از داخل یک مرکز نیست. برای حسگرهای هواپیما، به دلیل هزینه پروازی و وابستگی به شرایط آب و هوایی مطلوب، داده‌ها احتمالاً تنها مقیاس‌های

زمانی کوچک را پوشش می‌دهند و در بسیاری از موارد فقط در ساعات ظهر که انتشار گازهای گلخانه‌ای از یک تأسیسات بیشترین میزان انتشار را دارد، اطلاعات ارائه می‌دهد. بنابراین، تغییرات مهم روزانه و فصلی که بر انتشار سالانه کلی تأثیر می‌گذارند ممکن است در نظر گرفته نشوند. در حالی که مدلسازی وارون می‌توانند گوناگونی زمانی در انتشار گازهای گلخانه‌ای را به تصویر بکشند، منابع فردی در داخل تأسیسات ممکن است قابل تشخیص نباشند.

در سطح اجزاء (به عنوان مثال، تولید، جابجایی و ذخیره کود)، انواع روش‌ها را می‌توان برای تعیین انتشار استفاده کرد. روشهای تعادل جرم را می‌توان برای اندازه‌گیری انتشار گازهای گلخانه‌ای از انبارهای سرپوشیده یا سایر مناطق (ذخیره کود) که به طور مکانیکی تهویه می‌شوند استفاده کرد. این روش شامل اندازه‌گیری غلظت گاز به طور مداوم در طول زمان در ورودی و خروجی انبار همراه با جریان تهویه است [۷۲، ۷۳]. نرخ انتشار اندازه‌گیری شده شامل انتشار متان روده (برای انبارها) و انتشار متان از کود است. این روش اندازه‌گیری تا زمانی که تجهیزات پایش برای اندازه‌گیری میزان تهویه به خوبی واسنجی شده باشد، به خوبی کار می‌کند. اندازه‌گیری انتشار گازهای گلخانه‌ای از ساختمان‌های دام با تهویه طبیعی چالش بزرگ‌تری است. زیرا تعیین میزان تهویه دشوار است. در این موارد نرخ تهویه را می‌توان با استفاده از روش تعادل دی‌اکسیدکربن یا گاز ردیاب برآورد زد. روش تعادل دی‌اکسیدکربن از دی‌اکسید-کربن تشکیل شده توسط تنفس حیوانات به عنوان یک گاز ردیاب طبیعی با نرخ تهویه برآورد زده شده با محاسبه تعادل جرمی جریان دی‌اکسیدکربن استفاده می‌کند [۷۴]. از طرف دیگر، یک گاز ردیاب (به عنوان مثال، ^{85}Kr یا سایرین) می‌تواند در داخل ساختمان توزیع شود و برای برآورد میزان تهویه استفاده شود [۷۵، ۷۶]. اندازه‌گیری متان در انبار، همراه با نرخ‌های تهویه تخمینی، برای محاسبه میزان انتشار کلی استفاده می‌شود [۷۷، ۷۸]. این روش‌ها می‌توانند برآوردهای خوبی از انتشار گازهای گلخانه‌ای از مناطق مسکونی ارائه دهند. با این حال به طور مستقیم اجازه برآورد سهم انتشار متان روده در مقابل متان کود را نمی‌دهند. همچنین می‌توانند در دوره‌های زمانی طولانی‌تری به کار گرفته شوند که گوناگونی زمانی انتشار را نشان می‌دهد و برآوردهای بلندمدت انتشار بهتری را ارائه می‌کند.

روش‌های دیگری را می‌توان به کار برد که بر محاسبه یا برآورد نرخ تهویه تکیه نمی‌کنند و می‌توانند برای منابع باز (مرتفع، مناطق ذخیره‌سازی کود) قابل استفاده باشند. این‌ها شامل ردیاب‌های خارجی [۷۹، ۸۰]، مدل‌های پراکندگی [۸۰، ۸۱]، گرادیان شار، شار افقی یکپارچه، تعادل جرم ریزه‌واشناسی، و کوواریانس گردابی [۸۰] است. همه این روش‌های هوای آزاد این مزیت را دارند که می‌توانند انتشار گاز متان را از یک منبع بدون مزاحمت برای حیوانات یا تغییر شرایط محیطی اندازه‌گیری کنند. از آنجایی که آن‌ها انتشار را از کل منطقه منبع (یا بخش بزرگی از آن) اندازه‌گیری می‌کنند، گوناگونی مکانی انتشار نیز در نظر گرفته می‌شود. بسیاری از این روش‌ها نیز به راحتی در دوره‌های زمانی طولانی‌تر مورد استفاده قرار می‌گیرند، که گوناگونی زمانی را پوشش می‌دهد و امکان پیش‌بینی دقیق‌تری از انتشار طولانی‌مدت را فراهم می‌کند.

روش‌های موجود برای تجزیه و تحلیل هدفمند سطوح خاص شامل استفاده از محفظه‌ها است [۷۲، ۸۲، ۸۳]. اگر چه این تکنیک‌ها می‌توانند تخمین‌های انتشار را برای یک منطقه منبع معین ارائه دهند، چندین اشکال بالقوه وجود

دارد که باید در نظر گرفته شود. به دلیل کوچک بودن بیشتر اتاقک‌ها، توانایی ثبت نوسان‌های مکانی انتشار از ناحیه منبع ممکن است دشوار باشد. در طول اندازه‌گیری، خود محفظه می‌تواند محیط (به عنوان مثال، دما و جریان هوا) منطقه منبع را تغییر دهد، که ممکن است بر انتشار گازهای گلخانه‌ای تأثیر بگذارد. ثبت نوسان‌های زمانی در گازهای گلخانه‌ای نیز می‌تواند دشوار باشد زیرا ممکن است اتاقک‌ها نتوانند برای مدت زمان طولانی مستقر شوند زیرا اختلال در شرایط جوی محیط بسیار زیاد است. با این حال، برخی اتاق‌های خودکار و شناور طراحی شده‌اند که برای غلبه بر چالش ثبت نوسان‌های زمانی در انتشار گازهای گلخانه‌ای در مدت زمان طولانی کار می‌کنند.

به دلیل نوسان‌های زمانی و مکانی انتشار ناشی از نگهداری دام و مدیریت کود آلی، اندازه‌گیری‌ها و پایش‌ها باید در دوره‌های زمانی طولانی‌تری انجام شود که نوسان‌های روزانه و فصلی در انتشار را پوشش دهد تا به طور دقیق انتشار سالانه را منعکس کند.

۳-۴-۲ جایگاه‌های دفن پسماند

بر خلاف سایر منابع انسانی انتشارماتان، محاسبات ساده (داده‌های فعالیت ضرب در ضریب انتشار) عموماً برای برآورد انتشارماتان دفن پسماند نامناسبند زیرا فرآیندهای انتقال خاک - گاز و اکسیداسیون در خاک‌های پوششی دفن پسماند پیچیده است. دو عامل اصلی انتشارماتان دفن پسماند در جاهای خاص، آب و هوای فصلی و شیوه‌های مهندسی/عملیاتی جایگاه، از جمله (۱) ضخامت و ویژگی‌های فیزیکی مواد پوششی و (۲) میزان استخراج بیوگاز مهندسی شده است [۸۴-۸۸]. بررسی‌های میدانی عمده و توسعه مدل مبتنی بر فرآیند در سال‌های اخیر رخ داده‌اند که نتایج مهمی را برای تعیین کمیت انتشار متان از جاهای دفن پسماند و ارائه رویکردهای موجودی بهبودیافته ارائه کرده‌اند. همچنین، جاهای دفن پسماند در حال حاضر باید با (i) حداقل الزامات پوشش، (ii) استانداردهای مدیریت بیوگاز، (iii) بازیافت بیوگاز مورد نیاز در جایگاه‌های بزرگتر، (iv) پایش‌های سطح سه ماهه برای افزایش غلظت متان و سایر دستورالعمل‌های عملیاتی بند «قانون حفاظت و بازیابی منابع» و «قانون هوای پاک» مطابقت داشته باشند. این الزامات در میان ایالت‌ها تا حدودی متفاوت است تا با تفاوت‌های منطقه‌ای در شیوه‌های دفن پسماند و همچنین الزامات ایالتی که ممکن است سختگیرتر از حداقل استانداردهای فدرال باشد مطابقت داشته باشد.

انتشار دفن پسماند به دلیل گوناگونی مکانی و زمانی بالا [۸۶، ۸۷]، از جمله انتشار بسیار متفاوت از خاک‌های پوششی مجاور (روزانه، متوسط، نهایی) و گوناگونی زمانی در اکسیداسیون خاک چالش برانگیز است. انتقال گاز و نرخ اکسیداسیون به تغییرات دینامیکی در دمای خاک و رطوبت ناشی از نوسانات آب و هوا و همچنین روندهای آب و هوایی طولانی مدت بستگی دارد [۸۷]. مطالعه آزمایشگاهی خاک‌های پوششی که در محدوده وسیعی از شرایط دما و رطوبت انجام شد، نشان می‌دهد که نرخ اکسیداسیون بهینه در دمای خاک در حدود ۳۵ درجه سانتی‌گراد و پتانسیل رطوبت خاک نزدیک به ظرفیت نگهداری آب (حدود ۱۰ کیلو پاسکال) رخ می‌دهد [۸۷].

به طور کلی، بالاترین میانگین شار انتشار (نرمال شده به گرم متان در هر متر مربع در روز) با رویه سطحی خاک جایگاه‌های دفن پسماند در آب و هوای نیمه گرمسیری مرطوب مرتبط است، در حالی که انتشار کمتر با خاک‌های

پوشش نهایی ضخیم‌تر همراه است [۸۵] با این حال، در بسیاری از جایگاه‌ها می‌توان نشان داد که مناطق پوشش میانی به دلیل سطح بزرگ و خاک‌های پوششی نازک‌تر (نسبت به پوشش‌های نهایی) بیشترین سهم از کل انتشار را دارند [۸۸]. نکته مهم این است که بود و نبود بازیابی بیوگاز مهندسی شده در زیر یک منطقه پوششی خاص (چه چاه‌های عمودی یا گردآورنده‌های افقی که همزمان با پر کردن نصب شده‌اند) غلظت گاز متان خاک و نیروی محرکه انتشارمتان در جو را تعیین می‌کند [۸۷].

بررسی‌های میدانی متعدد در دو دهه گذشته درک فرآیندهای انتشارمتان از پسماند را تا حد زیادی بهبود بخشیده است. علاوه بر این در دهه گذشته یک مدل مبتنی بر فرآیند (CALMIM, California Landfill Methane Inventory Model توسعه و دراندازه میدانی اعتبارسنجی شده است. در حال حاضر، این مدل در GHGI یا GHGRP ایالات متحده گنجانده نشده است.

اندازه‌گیری و مدل‌سازی میدانی

روش‌های اندازه‌گیری میدانی برای جاهای دفن پسماند از اندازه‌های مترمربع تا کیلومترمربع، از جمله اتاقک‌ها، روش‌های ردیاب، رویکردهای ریز هواشناسی، نقشه‌برداری ستون شعاعی عمودی (VRPM) و رویکردهای موازنه جرم هواپیما متغیر است.

به طور کلی، استفاده موازی از اتاقک‌های مستقر در سطح زمین در ترکیب با سایر روشهای مورد بحث در زیر مطلوب است زیرا اتاقک‌ها، (۱) می‌توانند در هر ساعت از شبانه روز مستقر شوند، (۲) یک روش اندازه‌گیری مستقیم را تشکیل می‌دهند که برای استنباط نرخ شارمتان نیازی به مدل‌سازی ندارد و (۳) می‌تواند تغییرپذیری مکانی و زمانی انتشاردر یک نوع پوشش مشخص را کمیت کند. علاوه بر این، اتاقک‌های ساکن همچنین می‌توانند انتشار «منفی» (به عنوان مثال جذب متان اتمسفر)، که می‌تواند در خاک‌های پوشیده از دفن پسماند با ظرفیت اکسیداسیون فصلی بالا رخ دهد، اندازه‌گیری کند [۲۳، ۸۹]. علاوه بر این، کاوشگرهای گاز خاک که به موازات اتاق‌ها استفاده می‌شوند برای توصیف پروفایل‌های مولکولی و ایزوتوپی درجا برای درک بهتر تولید، انتقال و دینامیک اکسیداسیون متان مفید هستند. روش‌های ابتکاری مورد استفاده در دفن پسماند شامل روش‌های ردیاب مضاعف به کار رفته در مقیاس میدانی [۸۶] آزمایش‌های گازخاک برای تعیین کمیت اکسیداسیون [۹۰]، و اصلاح روش‌های ریز هواشناسی است برای ثبت بهتر دینامیک ترابری جوی در جاهای دفن پسماند. [۹۱]

متان که مستقیماً از پسماندهای دفن شده (بی‌هوازی) بازیافت می‌شود دارای علامت ایزوتوپی نسبتاً ثابت برای کربن ($\delta^{13}C$ حدود ۶۰ -) است. از این رو، روش‌هایی که تغییر در $\delta^{13}C$ را برای متان اکسید شده جایگاه‌های دفن پسماند در اتاقک‌ها، شناساگرها یا ستون‌های بادگیر تعیین می‌کنند می‌توانند به طور مستقیم میزان اکسیداسیون را در مقیاس میدانی کمی کنند. بررسی‌ها نشان می‌دهد که اکسیداسیون فصلی بسیار متغیر است و پیش‌فرض ۱۰ درصد که توسط IPCC پیشنهاد شده است [۹۲] بسیار کم است (مقادیر متوسط در محدوده ۳۰ درصد است [۹۳-۹۶]). انگشت‌نگاری ایزوتوپی با استفاده از $\delta^{13}C$ متان و دی‌اکسیدکربن نیز برای تأیید تولید فصلی متان در خاک پوششی محل

دفن زباله به کار برده شده است [۲۳]. به طور کلی، $\delta^{13}C$ متان منتشر شده از جایگاه‌های دفن زباله می‌تواند از ۶۰- درصد (اکسیداسیون ناچیز) تا ۳۰- درصد (اکسیداسیون بالا) متغیر باشد [۲۳، ۸۶]. در بررسی‌های جوی علامت منفی برای نشان دادن متان جایگاه‌های دفن پسماند به کار می‌رود.

با استفاده از روش‌های توالی‌یابی مدرن، بینش‌های جدیدی درباره جوامع میکروبی اکسیدکننده متان نیز در حال ظهور است. به عنوان مثال، هنبرگر و همکاران [۹۷] تغییرات مکانی و زمانی را در جوامع میکروبی اکسیدکننده متان در یک خاک پوششی دفن پسماند با استفاده از اندازه‌گیری‌های میدانی اکسیداسیون، کاوش ایزوتوپی پایدار اسیدهای چرب مشتق شده از لیپید قطبی، و تجزیه و تحلیل ریزآرایه ژن‌های *pmoA* و رونوشت‌ها ارزیابی کردند. به دلیل شرایط محیطی متغیر (دما، رطوبت، فرآیندهای خاک) جوامع میکروبی فعال با خوشه‌بندی فضایی و فصلی متمایز، از جمله حضور همزمان اکسیدکننده‌های متان اتمسفر، بسیار گوناگون بودند.

بررسی‌های اخیر چند جایگاه‌های دفن پسماند در ایالات متحده بر روش‌های گوناگون میدانی از «پایین به بالا» برای تعیین کمیت انتشار متان و اکسیداسیون در سطح جایگاه‌های دفن پسماند تکیه کرده اند، بنابراین بینش‌های مهمی در مورد نقاط قوت و ضعف روش‌های گوناگون ارائه می‌دهند.

در دهه گذشته، یک مدل مبتنی بر فرآیند جدید (CALMIM) توسعه یافته و برای استفاده در برآورد سالانه انتشار متان «جایگاه‌های دفن پسماند» تایید شده است. این مدل برآورد بهبود یافته‌ای را برای انتشار متان پوشش با و بدون اکسیداسیون برای گام‌های زمانی ۱۰ دقیقه‌ای و افزایش عمق ۲/۵ سانتی‌متری در طول یک چرخه سالانه ارائه می‌کند. راستی‌آزمایی جهانی برای این مدل دربرگیرنده همسنجی پیش‌بینی‌های مدل با اندازه‌گیری‌های میدانی است که از طیف گسترده‌ای از روش‌ها برای ۴۰ ماده پوششی در ۲۹ مکان دفن پسماند در ۶ قاره به دست آمده است (به عنوان مثال [۲۳، ۸۹، ۸۶، ۸۷، ۸۸]). همسنجی مدل با اندازه‌گیری‌های میدانی منجر به شاخص توافق ویلموت ۰/۷۶۵ [۹۹] و شاخص پیرسون بزرگتر از ۰/۸ در ۲۵ جایگاه از ۲۹ جایگاه دفن پسماند و میانگین خطای ۱۲ گرم متان در مترمربع در روز در همه پوشش‌ها شد. این مدل می‌تواند یک چارچوب زمانی برای «انتشار با و بدون اکسیداسیون» برای همسنجی با اندازه‌گیری‌های میدانی فراهم کند و روندهای منطقه‌ای را هم می‌توان متمایز کرد. به عنوان مثال، در همسنجی با داده‌های میدانی در ۱۰ جایگاه دفن پسماند کالیفرنیا، جاهایی که تابستان‌های گرم و خشک دارند، به دلیل کاهش اکسیداسیون، پیوسته افزایش‌های فصلی زیادی در انتشار داشتند [۸۸].

بهبود بیشتر مدل‌های مبتنی بر فرآیند برای برآورد انتشار متان از «جایگاه‌های دفن پسماند» به ویژگی‌های جایگاه متکی است (به عنوان مثال، سطح، ضخامت و بافت هر خاک پوششی؛ وسعت نصب شده بازیابی بیوگاز؛ آب و هوای جایگاه) و می‌تواند برآوردهای واقعی‌تری از انتشار متان نسبت به روش‌های فعلی GHGI و GHGRP ارائه دهد. به طور خاص، پیوند قوی میان اکسیداسیون پوشش خاص و آب و هوای خاص جایگاه ضروری است.

۴-۴-۲ روش‌های بالا به پایین برای اندازه‌گیری انتشار متان

۱. رصد جهانی پایش متان

برآوردهای انتشار «از بالا به پایین» متان براندازه‌گیری‌های جوی و برآورد تولید و مصرف آن در جو متکی است. از آنجایی که انتشار متان ایران بخش کوچکی از بودجه جهانی متان را تشکیل می‌دهد و از آنجایی که طول عمر طولانی متان در اتمسفر اجازه می‌دهد تا انتشار آن در سطح جهانی پراکنده شود، نمی‌توان میزان انتشار متان ایران را بدون در نظر گرفتن سهم منابع جهانی در تولید و مصرف آن تعیین کرد. «شبکه جهانی پایش متان» این اطلاعات را ارائه می‌دهند.

پایش متان اتمسفر بر اساس تلاش‌های پایش دی‌اکسیدکربن ساخته شده است. این پایش توسط گروه رولند-بلیک در دانشگاه کالیفرنیا (UC)، ایروین، در سال ۱۹۷۸ آغاز شد و همچنان ادامه دارد و این پایش را به طولانی‌ترین سری زمانی غلظت متان اتمسفر تبدیل می‌کند. نمونه‌های هوا در ۴۵ مکان توزیع شده در سراسر حوضه اقیانوس آرام از آلاسکا تا نیوزلند، چهار بار در سال جمع‌آوری می‌شوند که بسیاری از جاهای نمونه‌برداری در جزایر دورافتاده اقیانوس آرام و در امتداد ساحل غربی ایالات متحده قرار دارند. تجزیه و تحلیل نمونه‌های هوا همچنین شامل حدود ۱۰۰ هالوکربن و هیدروکربن است، از جمله برخی که به طور بالقوه برای درک منابع متان مفید هستند.

سازمان ملی اقیانوسی و جوی (NOAA) اندازه‌گیری و نمونه‌برداری هوایی متان را در سال ۱۹۸۳ آغاز کرد و تا امروز در بیش از ۶۰ جایگاه که داوطلبان نمونه‌هایی را جمع‌آوری می‌کنند ادامه دارد و به آزمایشگاه تحقیقاتی سامانه زمین NOAA (ESRL) در بولدر، کلرادو فرستاده می‌شود [۱۰۰]. فرکانس نمونه‌برداری حدود یک بار در هفته است، اگرچه در رصدخانه‌های NOAA، پایش مداوم امکان پذیر است زیرا هوا در جا نمونه‌برداری و تجزیه و تحلیل می‌شود. نمونه‌های هوا از پلتفرم‌های گوناگون از جمله کشتی‌های باری، هواپیماهای کوچک و برج‌های مخابراتی بلند جمع‌آوری شده‌اند. اندازه‌گیری هواپیماها و برج‌های NOAA عمدتاً در جایگاه‌هایی در ایالات متحده انجام می‌شود. آزمایش گازهای اتمسفر پیشرفته جهانی (AGAGE)، با حمایت برنامه تحقیقاتی جو فوقانی علوم زمین اداره ملی هوانوردی و فضایی (ناسا) پایش متان با فرکانس بالا را در اواسط دهه ۱۹۸۰ در پنج جایگاه «پایه» توزیع شده در سطح جهانی آغاز کرد [۱۰۱] و امروز در بیش از ده‌ها جایگاه در سراسر جهان ادامه دارد. شبکه AGAGE همچنین بیش از ۵۰ ترکیب جوی دیگر را اندازه‌گیری می‌کند که بسیاری از آنها مربوط به متان هستند.

طیف وسیعی از سیگنال‌ها در متان اتمسفر با استفاده از پایش توزیع‌شده فضایی که در طول زمان حفظ می‌شوند، وجود دارد. در همسنجی با میانگین جهانی کسرمولی هوای خشک (نسبت مول‌های متان نسبت به تعداد مول‌های همه اجزا) غلظت متان (که حدود ۱۸۵۰ ppb است) گرادیان عرضی متان (تفاوت میانگین سالانه میان قطب شمال و جنوب) حدود ۱۵۰ ppb است. بر اساس برآوردهای انتشار گازهای گلخانه‌ای ایالات متحده و زمان‌های عبور از سراسر ایالات متحده، شیب‌های طولی بسیار کوچک‌تری (۱۰-۲۰ ppb) میان اقیانوس آرام و اقیانوس اطلس رخ می‌دهد. تفاوت در شیب اقیانوس آرام-اطلس به ویژه برای تعیین انتشار گازهای گلخانه‌ای ایالات متحده مهم است زیرا

اقیانوس آرام به طور کلی در جهت باد و اقیانوس اطلس در خلاف جهت باد ایالات متحده است. در نزدیکی منابع متان، گردانها می توانند بسیار بزرگتر، صدها تا هزاران قسمت در میلیارد در فواصل نسبتاً کوچک باشند. چرخه فصلی متان در حدود دهها قسمت در میلیارد است، در حالی که روندهای دهه‌ای از کمتر از یک تا بیشتر از ۱۰ بخش در میلیارد در سال متغیر بوده است.

عدم قطعیت در برآورد انتشار «از بالا به پایین» متان هم تحت تأثیر عدم قطعیت در اندازه‌گیری‌های متان اتمسفر و هم از عدم قطعیت در مدل‌های مورد استفاده برای برآورد انتشار بر اساس اندازه‌گیری‌های جوی است. عدم قطعیت پایش شبکه نقش مهمی در تعیین حساسیت شبکه به تغییرپذیری مکانی و زمانی متان ایفا می‌کند و این به اطلاعاتی درمورد توزیع منبع متان و گوناگونی آنها تبدیل می‌شود. عدم قطعیت پایش شبکه NOAA و AGAGE بسیار کوچک است و تنها حدود ۰/۰۶ درصد میانگین کسر مولی متان جهانی است، به این معنی که پایش شبکه در طیف وسیعی از تغییرات مکانی و زمانی حساس هستند. با استفاده از درک کنونی از منابع تولید و مصرف متان، هریک ppb افزایش متان که در سطح جهان توزیع می‌شود، نیاز به انتشار ۲/۸ تراگرم متان دارد [۱۰۲]. عدم قطعیت سال ۲۰۱۶ در میانگین فراوانی متان تروپوسفر جهانی مدلسازی شده (۱/۱ ppb) معادل ۳/۱ تراگرم انتشار متان در سطح جهان است، به این معنی که تغییرات ۰/۶ درصد در بودجه جهانی متان قابل تشخیص است (با فرض بودجه کل جهانی ۵۵۰ تراگرم در سال برای متان). شبکه‌های رصد دقیق متان که اکنون وجود دارند، مکانیسم دقیقی را برای ردیابی تغییرات در انتشار جهانی متان فراهم می‌کنند.

ii. تلاش‌های بین المللی پایش متان

علاوه بر پایش شبکه متان جمع آوری شده توسط NASA، NOAA، (از طریق AGAG) و UC Irvine، پایش متان توسط بسیاری از کشورهای دیگر انجام می‌شود و این اندازه‌گیری‌ها برای درک عوامل موثر بر شار متان مهم هستند. برای مثال، Environment and Climate Change Canada پایش بلندمدت را در Alert، Nunavut و سایر مکان‌ها در سراسر کانادا جمع‌آوری می‌کند. یک رکورد طولانی مدت از متان برای نیمکره جنوبی که به خوبی مخلوط شده است در رصدخانه کیپ گریم در تاسمانی توسط سازمان تحقیقات علمی و صنعتی مشترک المنافع استرالیا جمع‌آوری شده است.

استفاده از پایش نظارتی از چندین مؤسسه می‌تواند به طور قابل توجهی پوشش داده‌ها را بهبود بخشد. با این حال، لازم است اطمینان حاصل شود که داده‌ها در مقیاس یکسان کالیبره شده‌اند. برای تسهیل این امر، سازمان جهانی هواشناسی چارچوبی را ایجاد کرده است تا اطمینان حاصل شود که داده‌های ارسال شده به مرکز جهانی داده‌های گازهای گلخانه‌ای (WDCGG) با استانداردهای کیفیت و واسنجی مطابقت دارند و ابرداده‌های مربوطه به همراه داده‌ها توزیع می‌شوند. تعهد به ارسال منظم داده‌ها به WDCGG متفاوت است، برخی از مؤسسات به‌روزرسانی‌های مکرر را ارائه می‌کنند و برخی دیگر سال‌ها تأخیر دارند. پایش از هواپیماهای تجاری توسط محققان اروپایی، ژاپنی و استرالیایی انجام شده است. [۱۰۳، ۱۰۴] این داده‌ها اطلاعاتی در مورد تروپوسفر فوقانی و استراتوسفر پایینی ارائه می‌دهند. نیمرخها

در هنگام صعود و فرود عمدتاً در محیط‌های شهری آلوده ساخته می‌شوند و آنها را برای برآورد انتشار گازهای گلخانه‌ای شهری مفید میکند.

iii. پایش گونه‌های ردیاب جوی مرتبط

پایش جهانی نیز برای گونه‌های کمیاب جوی موجود است که برای درک بودجه متان مهم هستند. به عنوان مثال، نمونه‌های هوا برای CH_4 ۱۳ توسط موسسه تحقیقات قطب شمال و آلپ (INSTAAR) در دانشگاه کلرادو اندازه گیری می‌شود. این ایزوتوپ متان برای نسبت دادن انتشار به منابع بیوژنیک یا گرمازا مفید است [۱۰۶، ۱۰۵]. می‌توان از متیل کلروفرم برای استنباط قدرت شیمیایی تولید متان اتمسفر استفاده کرد زیرا گمان می‌رود انتشار آن به خوبی شناخته شده است، و تنها تلفات شیمیایی آن، مانند متان، در اثر واکنش با رادیکال‌های هیدروکسیل است. اندازه‌گیری متیل کلروفرم توسط UC Irvine، NOAA/ESRL و شبکه AGAGE انجام می‌شود. پایش برخی از هیدروکربن‌ها مانند اتان و پروپان نیز ممکن است به کمیت انتشار گازهای گلخانه‌ای از تولید نفت و گاز طبیعی کمک کند زیرا آنها با متان از این منبع منتشر می‌شوند. نسبت انتشار این هیدروکربن‌ها نسبت به متان به طور قابل توجهی متفاوت است و در حال حاضر به خوبی مشخص نشده است [۱۰۷-۱۰۹]. با این حال، اتان و پروپان هر دو به سرعت در جو در حال افزایش هستند، احتمالاً به دلیل افزایش تولید نفت و گاز باشد، اگرچه انتشار متان از تولید نفت و گاز تصور می‌شود که پایدار باشد. [۱۱۰-۱۱۳].

iv. پایش با استفاده از روش‌های سنجش از دور

پایش فراوانی متان از سکوها یا ماهواره‌ای ممکن است به طور قابل توجهی پوشش مکانی و زمانی محدودیت‌های رصدی را افزایش دهد [۱۱۴] که در مدلسازی مستقیم و وارون برای برآورد انتشار متان کاربرد دارند. اندازه‌گیریهای ماهواره‌ای معمولاً از ویژگی‌های جذب متان در موج کوتاه یا محدوده طیفی فروسرخ حرارتی برای استخراج فراوانی متان استفاده می‌کنند. سنجش از دور در امواج فروسرخ موج کوتاه بر اساس طیف‌سنجی جذبی با استفاده از خورشید به عنوان منبع نور است که آن را به متان در کل ستون اتمسفر، از جمله تغییرات نزدیک به سطح، بسیار حساس می‌کند (به عنوان مثال، بوچویتز و همکاران [۱۱۵]). با این حال، استفاده از خورشید به عنوان منبع نور، اندازه‌گیری‌های شبانه را حذف می‌کند. بازیابی‌ها در فروسرخ حرارتی از تابش جسم سیاه از سطح و جو به عنوان منبع نور استفاده می‌کنند و حساسیت کمتری به سطح دارند، با حداکثر حساسیت در تروپوسفر آزاد (به عنوان مثال، [۱۱۶، ۱۱۷]).

یکی از مزایای اصلی سنجش از دور این است که در اصل، پوشش سراسری و مکرر را با یک ابزار واحد امکان‌پذیر می‌کند. با این حال، بازیابی‌های مبتنی بر ماهواره هرگز نمی‌توانند به اندازه ابزارهای زمینی درجا دقیق باشند، زیرا اندازه‌گیری‌ها همیشه تحت تأثیر عوامل مخدوش کننده دیگر مانند ذرات معلق در هوا قرار می‌گیرند، که هرگز نمی‌توانند به طور کامل با سنجش از دور حذف شوند. در صورت موفقیت آمیز بودن، سنجش از دور فعال آینده با استفاده از Lidar (تشخیص نور و محدوده)، مانند ماموریت سنجش از راه دور متان [118] Lidar Mission Merlin، ممکن است

این کاستیها را کاهش دهد و اندازه‌گیری در طول سال را از قطبی به قطب دیگر امکان‌پذیر کند. با این حال، بعید است اندازه‌گیریهای فعال به پوشش جهانی واقعی دست یابند.

پایش ماهواره‌ای متان نزدیک به سطح توسط جوامع فضایی اروپا و ژاپن انجام شد. اولین ابزاری که متان را در سطح جهانی اندازه‌گیری کرد، SCIAMACHY بود، یک طیف سنج جذب خورشیدی فروسرخ نزدیک که حساسیت به جو نزدیک سطح و اندازه ردپای افقی 60×30 کیلومتر دارد [۱۱۹]. داده‌های SCIAMACHY که در سال ۲۰۰۲ راه‌اندازی شد تا سال ۲۰۱۲ جمع‌آوری شد، زمانی که این ابزار از کار افتاد. حسگر حرارتی و فروسرخ نزدیک برای مشاهده کربن (TANSO-FTS) یک ابزار مشابه، اما با وضوح فضایی و طیفی بالاتر (۸۰ کیلومتر مربع) است که در سال ۲۰۰۹ روی GOSAT راه‌اندازی شد [۱۲۰]. ابزار پایش TROPOSPHERIC 10 در سال ۲۰۱۷ راه‌اندازی شد و پوشش مکانی بسیار بهتری با وضوح فضایی کمی بهتر (7×7 کیلومتر) دارد. اولین ماهواره ایالات متحده با حساسیت سطحی بالا، رصدخانه چرخه کربن زمین ساکن (GeoCARB) خواهد بود (به عنوان مثال، [۱۲۱]) که نویدبخش وضوح مکانی و زمانی بالاتر است. این ابزار با وضوح بالاتر ممکن است امکان استفاده از رویکردهای موازنه جرم را برای برآورد انتشار گازهای گلخانه‌ای با وضوح فضایی بالاتر از آنچه در حال حاضر امکان‌پذیر است را فراهم کند. مأموریت‌های بالقوه آینده ممکن است قادر به نقشه‌برداری توده‌های موضعی از فضا باشند [۱۲۲، ۱۲۳]، تکنیکی که در حال حاضر تنها با استفاده از سکوی هوابرد به دست می‌آید (به عنوان مثال [۱۲۳، ۱۹، ۱۱۵، ۱۲۶]). این استراتژی با وضوح بسیار خوب فضایی از فضا (کمتر از ۱۰۰ متر) توسط برخی از ماهواره‌های تجاری مانند GHGSat دنبال می‌شود. اگرچه این استراتژی امیدوارکننده است، هنوز مشخص نیست که آیا ابزارهای تجاری الزامات را برآورده می‌کنند و آیا مجموعه داده‌ها در دسترس همگان قرار خواهند گرفت.

۷. پایش نظارتی در مقیاس قاره‌ای

پایش جوی گازهای گلخانه‌ای برای ایالات متحده، از جمله متان، به عنوان بخشی از شبکه مرجع جهانی گازهای گلخانه‌ای (GGRN) که توسط NOAA و شرکا در دانشگاه‌ها و موسسات تحقیقاتی با بودجه فدرال اداره می‌شود، انجام می‌شود علاوه بر GGRN، از سال ۲۰۱۲، Earth Networks, Inc. بیش از ۴۰ مکان نظارتی را در سراسر ایالات متحده ایجاد کرده است. این شرکت از نزدیک با بسیاری از سازمان‌های دولتی و دانشگاهی در پروژه‌های اندازه‌گیری شهری عمدتاً در حوضه لس آنجلس و کریدور شمال شرقی همکاری کرده است. داده‌های حاصل از تلاش‌ها به‌طور گسترده در دسترس هستند و چندین مقاله با سنجش‌های مرتبط منتشر شده‌اند یا در حال انتشار هستند (به عنوان مثال [۱۲۷]).

برج‌های بلند (حدود ۳۰۰ متر) یک راه مفید برای درک تغییرات گازهای گلخانه‌ای منطقه‌ای هستند زیرا با تغییر جهت باد، تشخیص سیگنال‌ها از منابع اطراف امکان‌پذیر است. با این حال، بیشتر شبکه برج NOAA برای اندازه‌گیری متان به طور مداوم مجهز نیست، اگرچه برخی از داده‌های شبکه برای مناطق شهری در دسترس هستند، سامانه‌های تحلیلی مستقر در جایگاه‌های پایش برج‌های بلند مبتنی بر حسگرهای تجاری جذب فروسرخ غیر پراکنده هستند. اندازه‌گیری متان با استفاده از این آنالیزورها امکان‌پذیر نیست. با این حال، طیف‌سنج‌های حلقه-پایین حفره

[۱۲۸] یا طیف‌سنج‌های خروجی حفره یکپارچه خارج از محور [۱۲۹] که متان را اندازه‌گیری می‌کنند، در دو جایگاه برج در کالیفرنیا نصب شده‌اند. نمونه‌های هوا نیز از اواخر دهه ۱۹۹۰ با استفاده از هواپیماهای سبک جمع‌آوری شده است. [۱۳۰] در حال حاضر، نیمرخ‌های گازهای گلخانه‌ای از جمله متان هر ۲ یا ۳ هفته در ۱۷ مکان از لایه مرزی سیاره‌ای (۵/۰ کیلومتر بالاتر از سطح دریا) تا تروپوسفر آزاد (تا ۸ کیلومتر بالاتر از سطح دریا) جمع‌آوری می‌شود. این برنامه اطلاعاتی در مورد شیب‌های افقی و عمودی متان در مقیاس بزرگ در سراسر ایالات متحده و چرخه‌های فصلی آنها ارائه کرده است.

vi. پایش منطقه‌ای

پایش منطقه‌ای متان اتمسفر را می‌توان با استفاده از شبکه‌هایی از جایگاه‌های برج مشابه آنچه در شبکه‌های قاره‌ای استفاده می‌شود، اما در مقیاس کوچکتر انجام داد. به عنوان مثال، هیئت منابع هوایی کالیفرنیا (CARB) شبکه‌ای متشکل از هشت جایگاه دارد که از سال ۲۰۱۰ به طور مداوم داده‌های متان را جمع‌آوری می‌کنند. هدف این است که محدودیت‌هایی از بالا به پایین (اتم‌سفر) برای انتشار متان کالیفرنیا برای همسنگی با موجودی‌های «پایین به بالا» فراهم کند [۱۳۱، ۱۳۲]. برج‌های منطقه‌ای و پایش مبتنی بر ساختمان‌های بلند نیز در مقیاس شهرها، از جمله ایندیاناپولیس [۱۳۳] و بوستون [۱۳۴] انجام شده است.

پایش کوتاه‌مدت منطقه‌ای نیز توسط هواپیما انجام شده است، اغلب در مناطقی که انواع خاصی از منابع انتشار متان بر آن غالب است. به طور کلی، این بررسی‌ها شامل انجام اندازه‌گیری‌ها در سمت بالا و پایین باد منطقه منبع در طول دوره‌هایی است که جو به خوبی مخلوط شده است. ابزار دقیق مورد استفاده در اندازه‌گیری هواپیما می‌تواند متفاوت باشد، اما به طور کلی بر ابزارهایی با وضوح و دقت بالا متکی است. اندازه‌گیری‌های هواپیما برای برآورد گازهای گلخانه‌ای منطقه‌ای با ضرب (۱) اختلاف غلظت متان میان اندازه‌گیری‌های باد و پایین باد در (۲) نرخ تهویه برای منطقه استفاده می‌شود. این نوع پایش گوناگونی منطقه‌ای قابل توجهی را در شدت انتشار متان (واحد انتشار متان در واحد متان تولید شده) از منابع زنجیره تامین نفت و گاز نشان داده است.

۲-۴-۵ برآورد انتشار متان از پایش بالا به پایین

رصد پراکنش فضایی و گوناگونی زمانی متان اتمسفر یک کران‌بندی «بالا به پایین» برای تولید و مصرف آن است. از مدل‌های مختلفی برای استنباط اطلاعات در مورد فرآیندهای انتشار و مصرف متان استفاده می‌شود. در این مدل‌ها از اندازه‌گیری‌های سری زمانی متان که به صورت فضایی توزیع شده است استفاده می‌شود. در مقیاس‌های جهانی، قاره‌ای و منطقه‌ای از روش‌های مدل‌سازی مستقیم و وارون. در مقیاس‌های منطقه‌ای، برخی تحلیل‌ها از رویکردهای موازنه جرم استفاده می‌کنند. هر دو رویکرد مدل‌سازی مستقیم و وارون ابزارهای تحلیلی قدرتمندی هستند که می‌توانند درک بودجه جهانی و منطقه‌ای متان را افزایش دهند. روش‌های وارون تشخیصی هستند زیرا امکان نگاهی به گذشته را برای درک روند انتشار گازهای گلخانه‌ای فراهم می‌کنند. آن‌ها ممکن است راهنمایی‌هایی را در مورد اینکه آیا سیاست با هدف کاهش انتشار متان موثر است ارائه دهند و ممکن است دانشمندان را از افزایش انتشار گازهای گلخانه‌ای

از تالاب‌های قطب شمال و یخ‌های دائمی آگاه کنند. مدل‌سازی تشخیصی همچنین می‌تواند منجر به بهبود در مدل‌سازی پیش‌بینی شود. با استفاده از مدل‌سازی وارون برای ارزیابی مدل‌های پایین به بالا انتشار گازهای گلخانه‌ای، می‌توان بهبودهایی را در مدل‌های پایین به بالا انجام داد و نتیجه ممکن است اطمینان بهتر در پیش‌بینی‌های چرخه آب و هوا-کربن باشد.

i. روش‌های مستقیم برای برآورد انتشار متان از پایش بالا به پایین

رویکرد مستقیم شامل استفاده از برآوردهای پایین به بالا از انتشار و مصرف، همراه با یک مدل ترازبری جوی برای شبیه‌سازی متان اتمسفر است که می‌تواند با داده پایش همسنگی شود. داده‌های مدل یا پایش شار را می‌توان برای تجویز انتشار گازهای گلخانه‌ای از تالاب‌های طبیعی و همچنین جذب متان در خاک‌های خشک (زمانی که خاک به عنوان یک مخزن عمل می‌کند) استفاده کرد. تفاوت‌های میان شبیه‌سازی‌ها و پایش مستقیم اطلاعاتی را در مورد شکاف‌های احتمالی در درک منابع متان محاسبه نشده ارائه می‌کند که برای رسیدن به توافق بهتر با پایش نیاز به تنظیماتی در فرآیندهای منبع/ مصرف مدل‌سازی شده دارد. نمونه این نوع رویکرد در مورد متان اتمسفر، شبیه‌سازی Fung و همکاران است [۱۰۲] که به طور جامع چندین بودجه ممکن متان (methane Inventories) را در برابر مشاهداتی مانند گرادیان نصف النهار و تغییرپذیری فصلی متان آزمایش کردند. آنها «بهترین» بودجه جهانی را یافتند که مجموعاً ۵۰۰ تراگرم در سال انتشار داشت و تلفات ناشی از جذب در خاک و مخازن شیمیایی در مجموع ۴۶۰ تراگرم در سال بود. عدم تعادل میان منابع و مصرف منجر به افزایش متان اتمسفر می‌شود که مطابق با رشد متان مشاهده شده در آن زمان است. فانگ و همکاران [۱۰۲] به این نتیجه رسیدند که انتشار انسانی مسئول حدود ۶۰ درصد از بودجه سالانه متان است (که اخیراً توسط Saunois و همکاران [۱۳۵] با استفاده از مجموعه‌ای از وارونگی‌های جهانی و داده‌های پایین به بالا پشتیبانی شد). جالب توجه است، آن‌ها همچنین دریافتند که چندین سناریو بودجه می‌تواند محدودیت‌های مشاهده‌ای را برآورده کند، یافته‌ای که پیامدهای مهمی برای رویکرد وارون دارد.

ii. استفاده از بازیابی‌های ماهواره‌ای در مدل‌های وارون

پایش میانگین ستونی متان از سکوه‌های ماهواره‌ای ممکن است به طور قابل توجهی پوشش مکانی و زمانی محدودیت‌های رصدی را افزایش دهد. داده‌های ماهواره‌ای را می‌توان در مدل‌های وارون جوی مانند پایش زمینی مورد استفاده قرار داد. در واقع، هر دو داده را می‌توان در مدل‌های وارون استفاده کرد که به اطمینان از سازگاری و اشاره به سوگیری‌های (biases) بالقوه در داده‌های ماهواره‌ای کمک می‌کند که معمولاً به دلیل تکنیک اندازه‌گیری غیرمستقیم دقت پایین‌تری دارند. نشان داده شده است که ابزارهای ماهواره‌ای کنونی دارای سوگیری‌های مداوم در فضا و زمان هستند (به عنوان مثال [۱۳۶، ۱۳۷]) که اگر قرار است داده‌های ماهواره‌ای در مدل‌های وارون جوی جذب شوند باید در نظر گرفته شوند. از مشاهدات سنجش از راه دور ستون متان با استفاده از طیف سنجی فوری (به عنوان مثال، شبکه مشاهده کل ستون کربن) برای شناسایی سوگیری‌ها در داده‌های ماهواره‌ای و توسعه طرح‌های تصحیح سوگیری استفاده شده است [۱۳۸، ۱۳۷]. ابزارهای پایش در چندین دهه مورد نیاز خواهد بود و باید مراقب بود که ابزارها قابل مقایسه

باشند. بررسی‌ها متعدد با موفقیت از داده‌های ماهواره‌ای در مدل‌های وارون جوی استفاده کرده‌اند [۱۰۲، ۱۳۷، ۱۳۹].
[۱۴۳] و بر پتانسیل کاهش عدم قطعیت انتشار متان در مقیاس منطقه‌ای و جهانی تأکید می‌کنند. برگاماشی و همکاران [۱۴۴] به توافق خوبی میان مدل‌های وارون که فقط از پایش شبکه سطحی استفاده می‌کنند و مدل‌های وارون با استفاده از پایش سطحی و بازیابی‌های تجدید نظر شده در مقیاس‌های بزرگ اشاره کردند. آنها همچنین پیشنهاد کردند که استفاده از بازیابی ماهواره‌ای و برآورد انتشار گازهای گلخانه‌ای در مقیاس شبکه به اطلاعاتی در مورد چگونگی تغییر انتشار گازهای گلخانه‌ای در اندازه‌های شبه قاره‌ای منجر می‌شود، نتیجه‌ای که بعداً توسط بوسکت و همکاران [۱۴۵] مورد تردید قرار گرفت.

iii. برآوردهای منطقه‌ای انتشار متان با استفاده از روش‌های از بالا به پایین

به جای افزایش وضوح عمودی-افقی مدل‌های جهانی، با افزایش وضوح افقی آنها که از نظر محاسباتی ارزان است کوششهایی برای افزایش وضوح مدل‌های ترابری جوی در برخی مناطق مورد بررسی شده است. برگاماشی و همکاران [۱۴۶، ۱۴۷] یک مدل جهانی با شبکه‌های تو در تو دو طرفه با وضوح ۱ درجه $\times$ ۱ درجه در اروپا و وضوح ۶ درجه $\times$ ۴ درجه در دامنه جهانی برای تخمین انتشار گازهای گلخانه‌ای به کار بردند. هر دو بررسی نشان دادند که انتشار گازهای گلخانه‌ای به طور قابل توجهی برای بخش‌هایی از اروپا در همسنجی با میزان گزارش شده توسط کنوانسیون چارچوب سازمان ملل متحد در مورد تغییر آب و هوا (UNFCCC) بالا است. آنها به ویژه میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای را بالاتر از میزان گزارش شده به وسیله EDGARv4 (۲۱ درصد) و UNFCCC (۴۰ درصد) برآورد کردند. ترنر و همکاران [۱۴۴] یک مدل جهانی با شبکه تو در تو با وضوح بالا برای آمریکای شمالی به کار برده و انتشار گازهای گلخانه‌ای ایالات متحده را ۴۰-۴۳ بالاتر از برآوردهای EDGAR, EPA (25-27 Tg/yr) گزارش کرده‌اند، یافته‌ای که با دیگر گزارش‌ها همخوان است [۱۱۲، ۱۳۵].

شبیه‌سازی دقیق اندازه‌گیری‌های نقطه‌ای با یک مدل با وضوح درشت به دلیل تنوع ناشی از منابع تولید محلی، توپوگرافی سطح و نوسان‌های جوی با فرکانس بالا دشوار است. به همین دلیل، برخی از بررسی‌های اخیر از مدل‌های منطقه‌ای استفاده کرده‌اند که حمل و نقل جوی را در وضوح‌های ۱۰ کیلومتر یا کمتر شبیه‌سازی می‌کنند. متداول‌ترین کار استفاده از مدل پاشش ذرات لاگرانژی است، مانند مدل‌های HYSPLIT [147] یا STILT [148] برای شبیه‌سازی مسیرهای وارون ذرات از مکان‌های اندازه‌گیری، پیگیری تماس تجمعی با لایه سطحی که در آن انتشار می‌تواند بر غلظت گونه‌های کمیاب در بسته‌های هوا تأثیر بگذارد. یک ماتریس تابع حساسیت سطح یا پاسخ ساخته می‌شود و از تکنیک‌های وارون برای تخمین منابع استفاده می‌شود، درست مانند پیش‌بینی هواشناسی از تحلیل‌های جهانی با وضوح بالا یا مدل‌های منطقه‌ای مانند مدل WRF برای محاسبه مسیر ذرات استفاده می‌شود [۱۴۹].

مزیت استفاده از مدل اتمسفر منطقه‌ای این است که ترابری را می‌توان با وضوح بالاتر شبیه‌سازی کرد و احتمالاً دقیق‌تر از مدل جهانی درشت‌تر است. عیب این است که شرایط مرزی در لبه دامنه باید مشخص شود و پوشش رصدی خوبی برای انجام دقیق این کار وجود ندارد. راه حل وابسته به شرایط مرزی برآورد شده است و گورجی و همکاران

[۱۵۰] دریافتند که استفاده از برآوردهای گوناگون از شرایط مرزی می‌تواند منجر به تفاوت در شارهای تخمینی شود که به اندازه شار خالص سالانه در منطقه مورد نظر است.

برگاماشی و همکاران [۱۴۶] از وارونگی جهانی با شبکه‌های تو در تو با وضوح بالا بر روی اروپا و مدل‌های وارون لاگرانژی برای برآورد انتشار متان اروپا استفاده کردند. آنها دریافتند که برآوردهای وارون به طور قابل توجهی بیشتر از برآوردهای موجودی از پایین به بالا است و پیشنهاد کردند که انتشار طبیعی از تالاب‌ها می‌تواند بیشتر از برآوردهای پایین به بالا باشد. هیچ تفاوت سیستماتیک میان وارونگی تودرتو شبکه جهانی و مدل‌های وارون لاگرانژی برجسته نشد. با این حال، مدل‌های وارون لاگرانژی از متان پس‌زمینه وارونگی‌های جهانی استفاده می‌کنند، در نتیجه یک منبع اصلی تفاوت میان این دو رویکرد را حذف می‌کند. مطالعه [۱۴۶] همچنین ارزش داشتن یک شبکه نسبتاً متراکم از اندازه‌گیری‌های شبه پیوسته را نشان داد. آنها توانستند از شبکه‌ای متشکل از ۱۸ جایگاه و همچنین جایگاه‌های اضافی با نمونه‌گیری گسسته کمتر استفاده کنند.

همچنین از مدلسازی وارون برای برآورد انتشار گازهای گلخانه‌ای در مقیاس شهری و حوضه نفت و گاز طبیعی استفاده شده است. برای مثال، لمب و همکاران [۱۳۳] از یک سامانه مدلسازی WRF-STILT و اندازه‌گیری‌های بررسی INFLUX برای برآورد انتشار متان برای ایندیاناپولیس استفاده کرد. آنها با استفاده از اندازه‌گیری‌های گرفته‌شده از هواپیما، تفاوت‌های قابل توجهی میان برآوردهای وارون خود و برآوردهای پایین به بالا و موازنه جرم پیدا کردند. آنها دریافتند که ۴۸ درصد از انتشار متان از منابع بیوژنیک بوده و بخش باقیمانده از سوخت‌های فسیلی، از جمله نشت پراکنده در سطح شهر است. جونگ و همکاران [۱۳۲] از یک مدل وارونگی بیزی برای نسبت دادن متان و انتشار ترکیبات آلی فرار اندازه‌گیری شده در منطقه خلیج سانفرانسیسکو استفاده کردند. نویسندگان نتیجه گرفتند که جاهای دفن پسماند بر کل انتشار غالب هستند و انتشار متان از سامانه‌های گاز طبیعی تقریباً ۰/۳-۰/۵ درصد کل گاز طبیعی مصرفی است. بارکلی و همکاران [۱۵۱] از مدل منطقه‌ای WRF در حالت اویلری (یعنی بدون محاسبه لاگرانژی حساسیت به منابع سطحی) برای برآورد انتشار از بخشی از حوضه مارسلوس استفاده کردند. آنها توافقی میان برآوردهای خود و برآوردهای موازنه جرم بر اساس پایش هواپیما و همچنین نرخ‌های نشت نسبت به کل تولید برای تأسیسات تولید و جمع‌آوری غیرمعارف یافتند که در همسنجی با سایر حوضه‌ها پایین بود (0.09 ± 0.36 %).

iv. رویکردهای موازنه جرم برای برآورد انتشار گازهای گلخانه‌ای از اندازه‌گیری‌های هواپیماهای منطقه-

ای

برخلاف مدلسازی مستقیم و وارون، مدل‌های مورد استفاده برای برآورد انتشار گازهای گلخانه‌ای از پایش هواپیماهای منطقه‌ای بسیار ساده‌تر هستند. هواپیما در بالا و پایین منطقه مورد مطالعه (برش عرضی) پرواز می‌کند. شارآلاینده‌های هوا به درون و بیرون منطقه را می‌توان با ضرب میانگین غلظت آلاینده هوا در طول برش عرضی در سرعت باد عمود بر منطقه مورد مطالعه، طول برش عرضی و ارتفاع اختلاط محاسبه کرد. سپس انتشار منطقه‌ای با کم کردن شار خروجی از منطقه از شار ورودی به منطقه برآورد می‌شود.

چندین انگاره در پیوند با این رویکرد برای برآورد انتشار گازهای گلخانه‌ای هست. از آنجایی که پروازها معمولاً در چند ساعت انجام می‌شوند و گردآوری داده‌ها در جهت بالا و پایین باد را می‌توان با فاصله ساعت‌ها از هم انجام داد، تخمین‌های انتشار فرض می‌کنند که سرعت باد، جهت باد و ارتفاع اختلاط در طول دوره نمونه‌برداری ثابت می‌مانند. از آنجایی که بیشتر پروازهای هواپیما در یک ارتفاع نمونه‌برداری می‌کنند یا فقط ماریچ‌های عمودی محدودی انجام می‌دهند، این روش همچنین فرض می‌کند که آلاینده‌های هوا (از جمله متان) به طور یکنواخت در سراسر برش عرضی پراکنده می‌شوند. این و دیگر انگاره‌ها، مانند منابع محدود در منطقه، معمولاً منجر به تخمین‌های عدم قطعیت برای پروازهای هواپیماهای فردی در محدوده ۲۰ تا ۴۰ درصد می‌شوند. [۱۵۲] شویتزکه و همکاران [۱۵۳] روش‌های موازنه جرم را با محاسبه صریح کسرهای مولی متان در سمت بالا در لایه مرزی در منطقه مورد مطالعه بهبود بخشیدند. علاوه بر این، عدم قطعیت‌ها با دوبرابر کردن تعداد برش‌های عرضی و کاربرد نیمرخ بادی کاهش یافت.

۷. سامانه‌های رصد چند مقیاسی

داده‌های دقیق ماهواره‌ای و زمینی برای برآورد انتشار گازهای گلخانه‌ای در اتمسفر باید مکمل دیگر رهیافت‌ها باشد و هدف بایستی کاربرد هم افزایانه این سامانه‌ها برای برآمدن بر کاستی‌های هر کدام از رهیافت‌ها باشد. بایستی پوشش گسترده و دقت کم سامانه‌های ماهواره‌ای با دقت زیاد و پوشش درازمدت سامانه‌های زمینی همسنگی شوند. میانگین‌های نیمکره‌ای و نوسان‌های دهه‌ای انتشار گازهای گلخانه‌ای را تنها با شبکه‌ای از نمونه‌برداری‌های دراز مدت درجا می‌توان به دست آورد. از سوی دیگر، پایش ماهواره‌ای توانایی ویژه‌ای برای نقشه‌برداری مکانی شیب‌های محلی متان اتمسفر در سراسر جهان فراهم می‌کند و فرآیندهای تولید و نرخ انتشار را آشکار می‌کند.

با بهبود وضوح مکانی و پوشش زمانی، داده‌های ماهواره‌ای ممکن است به شناسایی مناطقی که در آن بیشترین اختلاف بین فراوانی متان مشاهده شده و مورد انتظار (براساس موجودی) وجود دارد کمک کند. منطقه چهارگوشه در ایالات متحده (بخشی از استانهای کلرادو، نیو مکزیکو، آریزونا و یوتا) یک نمونه بارز از چگونگی شناسایی یک نقطه حساس منطقه‌ای از فضا است. بررسی‌های میدانی بعدی هم نمونه‌های درجا و هم داده‌های سنجش از دور هوابرد را به کار گرفت [۱۵۴-۱۵۶]. کاربرد داده‌های ماهواره‌ای برای شناسایی مناطق کلیدی ممکن است منجر به برآورد اختصاصی زمینی و/یا هوایی شارمنطقه‌ای برای تک تک منابع تولید متان شود. ایده‌آل آن است که برآورد ماهواره‌ای شار با اندازه‌گیری‌های روی زمین تکمیل شود. این به نوبه خود می‌تواند توسعه موجودی متان را در مقیاس‌های بزرگتر با شناسایی عوامل ناسازگاری در هر منبع تولید بهبود بخشد. این راهبرد چند مقیاسی می‌تواند دربرگیرنده اندازه‌گیری شار گازهای گلخانه‌ای در زمین تا برآورد آن از فضا باشد.

در پایان می‌توان گفت که داده‌های زمینی و فضایی با کیفیت، درازمدت و چند مقیاسی برای اندازه‌گیری و ردیابی انتشار متان در مقیاس منطقه‌ای مورد نیاز هستند.

۶-۴-۲ همسنجی رویکردهای پایین به بالا و بالا به پایین

رویکردهای بالا به پایین و پایین به بالا اطلاعات تکمیلی در مورد انتشار متان به دست می‌دهند. روش‌های پایین به بالا اطلاعاتی را در مورد مقادیر و الگوهای انتشار از منابع خاص ارائه می‌دهند و در نتیجه نوع اطلاعات لازم برای کاهش انتشار را ارائه می‌دهند با این حال، روش پایین به بالا ممکن است همه منابع را در نظر نگیرد و داده‌های فعالیت و عوامل انتشار نامشخص یا نادرست داشته باشند. برآوردهای از بالا به پایین شامل انتشار از همه منابع (حتی منابع ناشناخته) است زیرا آنها براساس پایش جوی هستند، اما ممکن است در نسبت دادن انتشار به منابع خاص مشکل داشته باشند و در معرض خطاهایی در ترازبری جوی باشند. رویکردهای بالا به پایین همچنین ممکن است نیاز به استفاده از برآوردهای انتشار قبلی برای محدود کردن راه‌حل‌ها به دلیل پوشش داده‌های پراکنده داشته باشند و همچنین ممکن است دارای سوگیری‌ها و خطاهایی باشند که منجر به برآوردهای انتشار از بالا به پایین مغرضانه شود. هر دو اندازه‌گیری از بالا به پایین و پایین به بالا که برای برآورد انتشار گازهای گلخانه‌ای استفاده می‌شوند نیز می‌توانند از نظر مکانی و زمانی پراکنده باشند و منجر به سوگیری شوند. به عنوان مثال، زمانی که از اندازه‌گیری‌های هواپیما برای به دست آوردن داده‌ها استفاده می‌شود، پروازها معمولاً به چند روز محدود می‌شوند، و اندازه‌گیری‌ها معمولاً در اواسط روز انجام می‌شوند که جو به خوبی مخلوط شده است. بنابراین، این اندازه‌گیری‌ها منجر به اطلاعاتی درباره منابع انتشار می‌شود که محدود به ساعات ظهر است، و این انتشار ممکن است متفاوت از زمان‌های دیگر روز باشد، که همسنجی مستقیم با موجودی‌های متان مانند GHGI را محدود می‌کند. اطلاعات تکمیلی ارائه شده توسط روش‌های بالا به پایین و پایین به بالا این فرصت را برای ترکیب نقاط قوت آنها در بررسی‌های اندازه‌گیری هماهنگ فراهم می‌کند. تنها تعداد محدودی از بررسی‌های بسیارهماهنگ انجام شده است که از هر دو رویکرد روش‌شناختی استفاده می‌کنند، با این حال جامع‌ترین این بررسی‌ها در مناطقی انجام شده‌اند که تحت سلطه انتشار نفت و گاز طبیعی هستند:

در سال ۲۰۱۳، صندوق دفاع از محیط زیست یک بررسی اندازه‌گیری هماهنگ از بالا به پایین و پایین به بالا در منطقه تولید نفت و گاز بارنت شیل در شمال تگزاس سازماندهی کرد. تیم‌های متعددی از محققین اندازه‌گیری‌های متان و اتان را در هواپیما انجام دادند که منجر به اندازه‌گیری انتشار گازهای گلخانه‌ای چند روزه از بالا به پایین شد. چندین تیم از محققین بررسی‌های زمینی در پایین انجام دادند و برآوردهای انتشار خاص جایگاه را برای صدها جایگاه نفت و گاز طبیعی، از جمله جایگاه‌های تولید و همچنین سایر منابع پایین دستی جمع‌آوری کردند. نیم‌رخ از میزان متان در منطقه ساخته شد که در برگیرنده همه داده‌های برآورد متان با روش‌های از بالا به پایین و از پایین به بالا بود [۱۵۷] که در آن برآوردها از هر دو رویکرد همگرا بودند، اما این هم‌گرایی بالا به دلیل (۱) هم افزایی بهبود داده‌های فعالیت برای برآوردهای پایین به بالا با شمارش دقیق تعداد تسهیلات محلی و (۲) کاربرد هم افزایانه نمونه‌گیری پیشرفته با یک مدل آماری برای برآورد دقیق تاسیساتی که انتشار بالایی داشتند، بود. در سال ۲۰۱۵ در منطقه تولید گاز طبیعی شیل در Fayetteville آرکانزاس، همسنجی از بالا به پایین و پایین به بالا با حمایت مالی DOE و صنعت انجام شد [۱۵۸، ۱۵۳، ۲۷-۱۶۰]. این بررسی کاربرد همزمان روش‌های از بالا به پایین و پایین به بالا را با دسترسی به جایگاه تولید و داده‌های عملیاتی از تولیدکنندگان اصلی گاز طبیعی در منطقه برای توسعه یک موجودی از پایین به

بالا با تفکیک مکانی- زمانی مشخص کرد. این تلاش بسته به ماهیت عملیات برنامه ریزی شده تولید گاز طبیعی که در روزهای خاص اتفاق می‌افتد، گوناگونی روزانه قابل توجهی در برآوردهای انتشار از پایین به بالا یافت. از آنجایی که عملیات روزانه در هر کدام از جایگاه‌ها متفاوت بود، گوناگونی فضایی قابل توجهی در انتشار روزانه وجود داشت. اندازه‌گیری‌های بالا به پایین گوناگونی روزانه در انتشار را تأیید کرد، و به طور کلی، بررسی‌ها تأیید کرد که دانستن امکانات جایگاه‌ها و برنامه‌های عملیاتی روزانه در همسنجی برآوردهای انتشار از بالا به پایین و پایین به بالا مهم هستند. بررسی اندازه‌گیری‌های هماهنگ و همزمان از بالا به پایین و پایین به بالا که در مناطق گوناگون برای برآورد انتشار متان انسانی انجام می‌شود، برای شناسایی کاستی‌های دانش ما از انتشار متان اتمسفر و اولویت بندی بهبود سیاهه انتشار بسیار مهم است. ارزیابی دقیق چنین داده‌هایی برای استفاده در موجودی‌های ملی متان برای اطمینان از ارزیابی‌های میانگین سالانه ضروری است.

نمودارهای ۷ و ۸ روند تغییرات انتشار متان را در بخش‌های مختلف اقتصاد جهان و ایران در بازه زمانی ۱۹۹۰-۲۰۲۰ نشان می‌دهند. انتشار جهانی متان بیشتر پیامد کنش‌های کشاورزی، انتشارهای فرار مانند نشتی از لوله‌های نفت و گاز و دیگر نشتی‌ها، و انتشار متان از پسماندها است. به خاطر سهم برجسته نفت و گاز در اقتصاد کلان ایران، انتشار متان از طریق گازهای فرار در ایران ۶ تا ۷ برابر بیشتر از انتشار متان در بخش کشاورزی است. غیر از ایران و مصر، بخش کشاورزی بزرگترین منتشرکننده گاز متان در کشورهای مورد بررسی در سال ۲۰۲۰ بود. گفتنی است که بخش کشاورزی هند بیش از ۵۰۰ میلیون تن متان (بر پایه معادل دی اکسید کربن) تنها در سال ۲۰۲۰ منتشر کرد که ۲۵ برابر انتشار متان از بخش کشاورزی ایران است. انتشار متان در بخش کشاورزی پاکستان ۵ برابر بیشتر از بخش کشاورزی ایران است (نمودار مربوط به سایر کشورهای مورد بررسی در گزارش حاضر در بخش پیوست ارائه شده است). جدول ۱۴ نیز میزان و سهم بخش کشاورزی و کل بخش‌های مختلف اقتصاد جهان و ایران در انتشار گاز متان در سال‌های ۱۹۹۰ و ۲۰۲۰ نشان می‌دهد. بخش کشاورزی کشورهای پاکستان (۸۳ درصد)، هند (۷۲ درصد) و ترکیه (۵۰ درصد) در سال ۲۰۲۰ به ترتیب بیشترین سهم در انتشار متان را دارند.

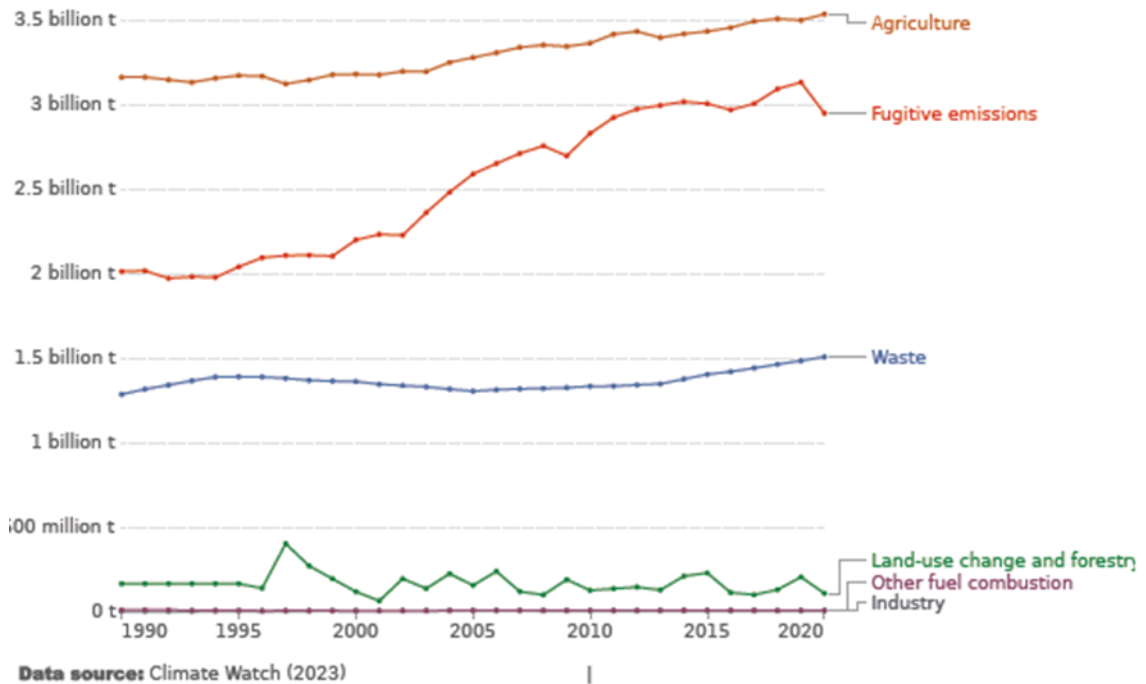
جدول ۱۴- میزان و سهم بخش کشاورزی و کل بخش‌های مختلف اقتصاد در انتشار گاز متان (میلیون تن معادل دی اکسید کربن) [۱۵].

کشور	کشاورزی		کل بخش‌های مختلف اقتصاد		سهم بخش کشاورزی از انتشار کل بخش‌ها (درصد)	
	۱۹۹۰	۲۰۲۰	۱۹۹۰	۲۰۲۰	۱۹۹۰	۲۰۲۰
ایران	۲۱/۳۹	۱۸/۲۴	۱۰۴/۵۱	۱۶۹/۳۵	۲۰/۴۷	۱۰/۷۷
هند	۴۳۳/۹۴	۵۰۸/۷۹	۵۳۶/۲۰	۷۰۴/۹۷	۸۰/۹۳	۷۲/۱۷
پاکستان	۶۰/۵۲	۱۴۰/۳۱	۷۳/۲۱	۱۶۸/۴۹	۸۲/۶۷	۸۳/۲۷
مکزیک	۵۵/۴۱	۶۱/۲۹	۱۰۳/۱۴	۱۴۶/۹۹	۵۳/۷۲	۴۱/۷۰
ترکیه	۲۱/۰۸	۲۵/۳۸	۳۸/۲۱	۵۰/۴۵	۲۱/۴۹	۵۰/۳۱
مصر	۱۱/۲۷	۹/۲۵	۳۴/۹	۶۲/۳۳	۳۲/۲۹	۱۴/۸۴

Methane emissions by sector, World

Methane (CH₄) emissions are measured in tonnes of carbon dioxide-equivalents¹.

Our World
in Data



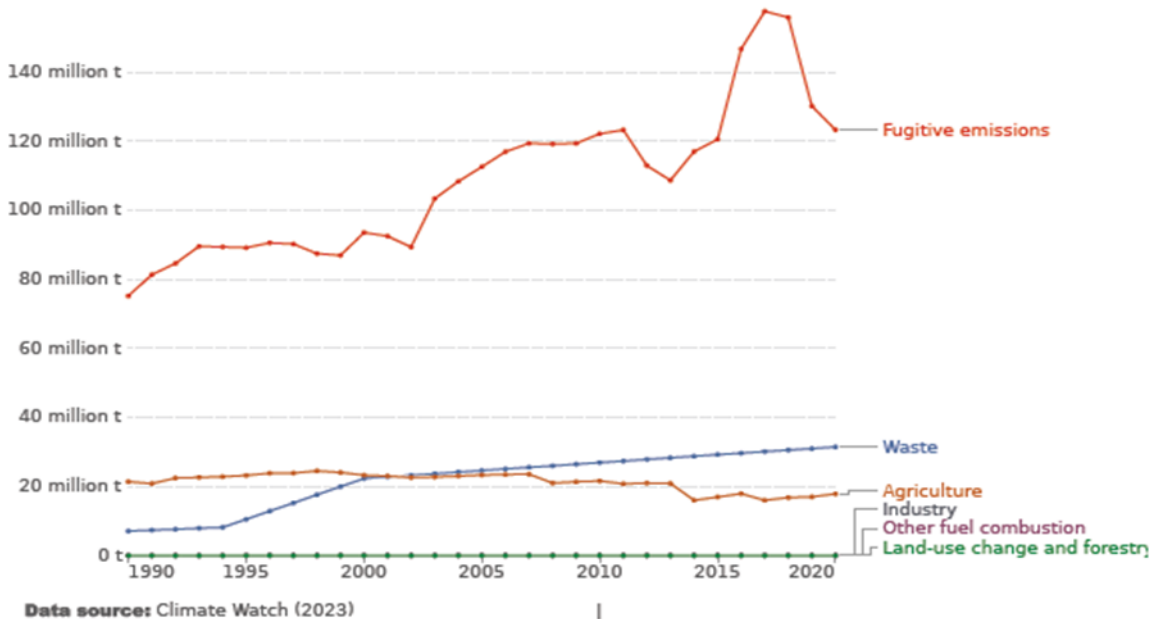
شکل ۷- انتشار متان در بخش‌های مختلف اقتصاد جهان در بازه زمانی ۱۹۹۰ و ۲۰۲۰ (معادل دی اکسید

کربن)

Methane emissions by sector, Iran

Methane (CH₄) emissions are measured in tonnes of carbon dioxide-equivalents¹.

Our World
in Data

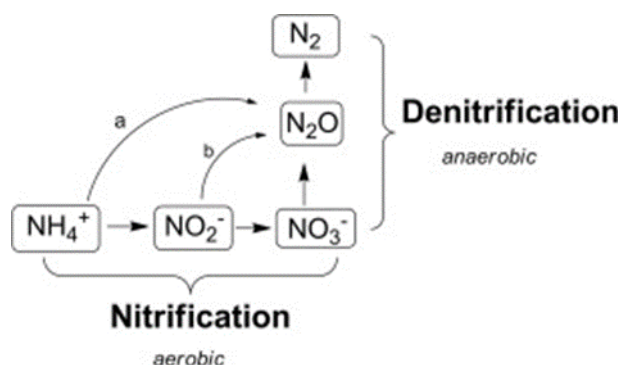


شکل ۸- انتشار متان در بخش‌های مختلف اقتصاد ایران در بازه زمانی ۱۹۹۰ و ۲۰۲۰ (معادل دی اکسید کربن)

۵-۲ روش‌های برآورد اکسید نیتروز

اکسید نیتروز (N_2O) یک گاز گلخانه‌ای قوی است. پتانسیل گرم شدن کره زمین (GWP) اکسید نیتروز ۲۹۸ برابر بیشتر از CO_2 در یک افق زمانی ۱۰۰ ساله است و تخمین زده می‌شود که اکسید نیتروز حدود ۶ درصد از اثر گرمایش جهانی ناشی از گازهای گلخانه‌ای را شامل می‌شود [۱۶۱، ۱۶۲] در استراتوسفر، N_2O اکسید شده و NO و N_2O تشکیل می‌دهد. این اکسیدهای نیتروژن تخریب ازن [۱۶۳] را کاتالیز و اکسید نیتروز را به مهم‌ترین تخریب‌کننده ازن در قرن بیست و یکم تبدیل می‌کنند [۱۶۴].

اکسید نیتروز یک واسطه در مسیرهای نترات زایی باکتریایی و نترات زدایی است، بنابراین انتشار اکسید نیتروز عمدتاً به دلیل تبدیل باکتریایی نیتروژن در خاک‌ها و اقیانوس‌ها است (شکل ۹ را ببینید). از زمان انقلاب صنعتی (۱۷۵۰ پس از میلاد)، سطوح اکسید نیتروز تقریباً ۲۰٪ افزایش یافته است، (از ۲۷۰ ppb به ۳۲۰ ppb) این افزایش به فعالیت‌های انسانی، به ویژه استفاده از کودهای مصنوعی و آلی نسبت داده می‌شود. سایر منابع مهم انتشار اکسید نیتروز فاضلاب انسانی و سوزاندن زیست توده و سوخت‌های زیستی است [۱۶۵-۱۶۷].



شکل ۹- مسیرهای میکروبی تولید (a) N_2O تولید N_2O از طریق نترات زایی از طریق هیدروکسیل آمین (b) تولید N_2O از طریق نیتریفیکاسیون نیتریفایر. شکل اصلاح شده از [۱۹].

بر اساس پروتکل کیوتو، کشورهای امضاکننده ملزم به تکمیل فهرست سالانه ملی گازهای گلخانه‌ای هستند که برای کامل بودن، باید شامل اکسید نیتروز باشد. محاسبه انتشار اکسید نیتروز یک کار پیچیده است. علاوه بر انتشار اکسید نیتروز از کشاورزی، انتشارات غیرمستقیم وجود دارد، مانند مواردی که ناشی از شسته شدن نیتروژن از مزارع کشاورزی به سیستم‌های آبی است که انتشار اکسید نیتروز از رودخانه‌ها و مصب‌ها را افزایش می‌دهد [۱۶۸، ۱۶۹]. علاوه بر این، سیستم‌های طبیعی می‌توانند به عنوان منابع مهم تولید و مصرف اکسید نیتروز عمل کنند [۱۷۰]. هیئت بین‌دولتی تغییرات آب و هوا (IPCC) دستورالعمل‌هایی را برای توسعه فهرست‌های ملی گازهای گلخانه‌ای [۱۷۱] تعیین کرده است که به موجب آن انتشار اکسید نیتروز از مدل‌هایی تعیین می‌شود که انتشار را به فعالیت‌هایی مانند استفاده از کود مرتبط می‌کند. زیربنای مدل‌ها عوامل انتشار هستند که از داده‌های تجربی تعیین می‌شوند. دقت مدل‌ها به کیفیت داده‌های آزمایشی که بر آن‌ها مبتنی هستند بستگی دارد [۱۷۰، ۱۷۲].

اندازه‌گیری انتشار گاز اکسید نیتروز به صورت تجربی یک موضوع پیش پا افتاده نیست. هنگام تلاش برای اندازه‌گیری انتشار اکسید نیتروز با دو چالش اصلی روبرو می‌شویم: اول، غلظت‌های پایین اکسید نیتروز در اتمسفر (320 ppb) تقریباً هزار بار کمتر از CO_2 ، و این غلظت‌های پایین خارج از محدوده تشخیص بسیاری از تکنیک‌های تحلیلی است. دوم، شارهای اکسید نیتروز اپیزودیک هستند و تغییرات زمانی و مکانی بسیار بزرگی را نشان می‌دهند، به دلیل فرآیندهای متعددی که هم اکسید نیتروز را تولید و هم مصرف می‌کنند. سرعت این فرآیندها تحت تأثیر طیف وسیعی از عوامل مانند دما، pH خاک، رطوبت و کربن آلی خاک قرار دارد. در حالی که ثبت شار چالش برانگیز است، بسیار مهم است که امکان تعیین کمیت دقیق انتشارات در سطح اکوسیستم فراهم شود [۱۷۳، ۱۷۴].

حجم زیادی از تحقیقات بر روی شار N_2O از خاک، فاضلاب و سیستم‌های آبی در حال انجام است. نه تنها مقدار انتشار اکسید نیتروز اندازه‌گیری شده بلکه مطالعات ایزوتوپی نیز انجام شده است و اطلاعات مهمی در مورد چرخه بیوژئوشیمیایی اکسید نیتروز ارائه کرده است [۱۷۵-۱۷۹]. اگرچه $^{14}\text{N}^{14}\text{N}^{16}\text{O}$ فراوان‌ترین گونه است (۹۹ درصد)، هم نسبت $^{15}\text{N}/^{14}\text{N}$ و هم موقعیت (^{15}N یا $^{15}\text{N}^{14}\text{N}^{16}\text{O}$ یا $^{14}\text{N}^{15}\text{N}^{16}\text{O}$) اطلاعات مفیدی را ارائه می‌دهند [۱۸۰-۱۸۳]. تجزیه فتولیتیک $\text{N}_2\text{-O}$ در استراتوسفر، مصرف اصلی اکسید نیتروز، منجر به غنی‌سازی ایزوتوپ‌های سنگین‌تر اکسید نیتروز (هر دو ^{18}O و ^{15}N) می‌شود [۱۸۴، ۱۸۵]. منابع میکروبی به طور کلی اکسید نیتروز منتشر می‌کنند که در ^{15}N و ^{18}O تخلیه می‌شود، در حالی که ترجیح سایت ($^{14}\text{N}^{15}\text{N}^{16}\text{O}$ یا $^{15}\text{N}^{14}\text{N}^{16}\text{O}$) می‌تواند نشان دهد که آیا اکسید نیتروز توسط نیتریفیکاسیون یا نترات زدایی باکتری‌ها تولید می‌شود (شکل ۱ را ببینید) [۱۸۰، ۱۸۲، ۱۸۶].

برای کمک به این مطالعات، نیاز شدیدی به روش‌های تحلیلی بهتر و روش‌های مقرون به صرفه برای اندازه‌گیری اکسید نیتروز در مناطق وسیع و بازه‌های زمانی طولانی وجود دارد. دستورالعمل‌های سازمان جهانی هواشناسی (WMO-GAW) برای اندازه‌گیری اکسید نیتروز، دقت کمتر از 0.1 ppb توصیه می‌کند [۱۸۷]. این نیاز سختگیرانه باعث توسعه روش‌های جدید برای اندازه‌گیری اکسید نیتروز شده است. علاوه بر این الزامات دقت، حسگر اکسید نیتروز ایده‌آل ارزان است و به راحتی قابل استفاده است تا تعداد زیادی اندازه‌گیری در مناطق وسیع انجام شود [۱۷۳، ۱۸۸].

علاوه بر اهمیت اکسید نیتروز به عنوان یک گاز گلخانه‌ای، همچنین نیاز به نظارت بر سطوح اکسید نیتروز در محیط‌های پزشکی، دندانپزشکی و دامپزشکی وجود دارد، جایی که اکسید نیتروز به طور معمول به عنوان بی‌حس‌کننده استفاده می‌شود. قرار گرفتن در معرض طولانی مدت شغلی با غلظت‌های بالا ($<112/5 \text{ ppm}$) اکسید نیتروز با آسیب DNA، سرکوب سیستم ایمنی، ناهنجاری‌های تولید مثل و کاهش باروری مرتبط است [۱۸۹]. در محیط‌های کاری، که در آن کارکنان در معرض اکسید نیتروز هستند، سطوح به طور ایده‌آل باید نظارت شود و در نتیجه از قرار گرفتن بیش از حد جلوگیری شود. مؤسسه ملی ایمنی و بهداشت شغلی (NIOSH) حد قرار گرفتن در معرض ۲۵ پی پی ام را به عنوان میانگین وزنی زمان (TWA) در طول دوره تجویز بیهوشی برای اطمینان از ایمنی شغلی توصیه می‌کند [۱۹۰، ۱۹۱].

همانطور که اشاره کردیم، بهبود اندازه گیری N_2O مهم است. در حالی که تعدادی بررسی در مورد انتشار N_2O وجود دارد [۱۷۳، ۱۸۸، ۱۹۲]، هیچ بررسی به طور خاص از روش‌های تحلیلی مورد استفاده برای اندازه‌گیری N_2O وجود ندارد که هم برای محققان علاقه‌مند به اندازه‌گیری N_2O و هم برای کسانی که در توسعه روش‌های تحلیلی جدید دخیل هستند، ارزشمند است. در اینجا، تکنیک‌های اندازه‌گیری N_2O را که در حال حاضر استفاده می‌شوند، مرور می‌کنیم و برخی از رویکردهای جدید را که اخیراً در ادبیات گزارش شده‌اند، توصیف می‌کنیم.

۲-۵-۱ روش‌های اندازه‌گیری اکسید نیتروز

i. روش‌های نمونه‌گیری

برای درک روش‌های تحلیلی مورد استفاده برای اندازه‌گیری اکسید نیتروز، برخی از روش‌های نمونه‌گیری را شرح می‌دهیم.

ii. روش‌های محفظه‌ای

محفظه‌ها رایج‌ترین روش برای اندازه‌گیری شار گاز از سطح خاک هستند که امکان تجمع گازهای مورد نظر را در حجم مشخصی فراهم می‌کنند. اندازه محفظه می‌تواند بسیار متفاوت باشد، از کمتر از ۱ متر مکعب تا بیش از ۱۵۰ متر مکعب. محفظه روی سطح خاک قرار می‌گیرد و برای مدتی بسته می‌شود، در طی آن، نمونه‌ها جمع‌آوری و برای تعیین تغییر غلظت اکسید نیتروز تجزیه و تحلیل می‌شوند [۱۹۳]. مزیت اتاقک‌ها این است که به راحتی مستقر می‌شوند و نیازی به استفاده از روش‌های تحلیلی بسیار دقیق یا سریع ندارند [۱۸۸، ۱۹۴].

از هر دو محفظه دستی (جایی که محفظه توسط اپراتور بسته و باز می‌شود) و اتاقک‌های خودکار (که در آن محفظه‌ها از طریق سیستم پنوماتیک باز و بسته می‌شوند) استفاده شده است. محفظه‌های دستی بسیار کار فشرده هستند و تعداد قرائت‌هایی را که می‌توان جمع‌آوری کرد محدود می‌کند، اما به دلیل ارزان بودن، مکان‌های فضایی بیشتری را می‌توان نمونه برداری کرد [۱۹۵، ۱۹۶]. استفاده از محفظه‌های خودکار امکان قرائت‌های بیشتری را در یک دوره مطالعه طولانی‌تر فراهم می‌کند، اما الزامات عملیاتی و هزینه آن‌ها به این معنی است که این روش فقط برای مناطق کوچک (کمتر از ۲۵ متر مربع) مناسب است [۱۹۷]. مهم است که در نظر داشته باشید که استفاده از اتاقک‌ها باعث اختلال در خاک و ریزاقلیم خاک می‌شود، بنابراین محفظه‌ها باید فقط برای مدت کوتاهی مستقر شوند. زمانی که محفظه‌ها باید بسته شوند با حد تشخیص (LOD) و دقت روش مورد استفاده برای اندازه‌گیری غلظت اکسید نیتروز تعیین می‌شود [۱۸۸، ۱۹۴، ۱۹۷].

iii. روش‌های ریزه‌واشناسی

روش‌های ریزه‌واشناسی برای اندازه‌گیری شار گاز در یک منطقه بزرگ (۱-۱۰ کیلومتر مربع) استفاده شده است [۱۷۳]. در این تکنیک‌ها، حسگرهای گاز بر روی برج‌ها قرار می‌گیرند که غلظت باد، دما و گاز را در یک یا چند نقطه بالاتر از سطح خاک یا پوشش گیاهی اندازه‌گیری می‌کنند [۱۸۸، ۱۹۸].

iv. کوواریانس گردابی

کوواریانس گردابی مستقیم‌ترین روش برای اندازه‌گیری شار روی سطح است [۱۹۵]. در کوواریانس گردابی، هدف اندازه‌گیری مستقیم نرخ انتقال عمودی گاز مورد نظر است. چگالی شار عمودی آنی در یک نقطه از جو حاصل ضرب سرعت عمودی باد (اندازه‌گیری شده با بادسنج سه بعدی) و غلظت گاز در همان نقطه (تعیین شده با یک واکاونده گاز) است [۱۹۴]. شارهای آنی در طول دوره‌های نمونه‌برداری به طور متوسط بین ۱۵ دقیقه تا ۱ ساعت محاسبه می‌شوند تا تمام اندازه‌های گردابی حمل و نقل موثر را شامل شود [۱۹۹].

کوواریانس گردابی روش ریزه‌واشناسی ترجیحی است، زیرا اندازه‌گیری مستقیم شار عمودی را ارائه می‌دهد که مستقل از پایداری اتمسفر است و به برخی از فرضیات ساده‌سازی شده در سایر روش‌های ریزه‌واشناسی نیاز ندارد [۲۸]. با این حال، کوواریانس گردابی نیاز به ابزار دقیق با پاسخ سریع دارد که در فرکانس‌های ۱۰ هرتز یا بالاتر کار می‌کنند. نیاز به آنالایزهای گاز سریع و حساس یک عامل محدود کننده در استفاده از اندازه‌گیری‌های کوواریانس گردابی است [۱۸۸، ۲۰۰، ۲۰۱].

v. تجمع گردابی

تجمع گردابی یک روش نمونه‌گیری مشروط است که به موجب آن هوای مرتبط با جریان‌های بالا و پایین با سرعتی متناسب با سرعت باد عمودی در دو ظرف جداگانه جمع آوری می‌شود [۲۰۰، ۲۰۲]. روش‌های انباشت گردابی از یک شیر برقی با واکنش سریع استفاده می‌کنند که امکان نمونه‌برداری از هوا را فراهم می‌کند و در نتیجه نیاز به تجزیه‌کننده گاز با پاسخ سریع را از بین می‌برد [۱۸۸]. گونه‌ای از تجمع گردابی، تجمع گردابی آرام است که در آن هوا با سرعت ثابت نمونه‌برداری می‌شود و بسته به جهت باد (بالا یا پایین) به سطوح مختلف هدایت می‌شود [۱۸۸].

vi. روش‌های گرادیان شار

در این رویکرد، شار عمودی با اندازه‌گیری غلظت گاز در دو یا چند ارتفاع مختلف و ثبت سرعت افقی باد به جای سرعت باد افقی و عمودی تعیین می‌شود، در نتیجه اندازه‌گیری‌های مورد نیاز را ساده می‌کند. شار عمودی به عنوان حاصلضرب انتشار آشفته (محاسبه شده از اندازه‌گیری سرعت باد و تلاطم) و گرادیان غلظت عمودی (تعیین شده از دو ارتفاع مختلف) یا از اندازه‌گیری تبادل انرژی در سطح و غلظت عمودی باد محاسبه می‌شود. گاز، دما و رطوبت هوا [۲۰۳]. برای دقت خوب با استفاده از روش‌های گرادیان شار، استفاده از ابزار دقیق معمول برای قرائت غلظت گاز از ارتفاعات مختلف مهم است [۱۸۸].

vii. شار افقی یکپارچه (IHF)

این تکنیک برای استفاده در مناطق کوچک (> ۱ هکتار) با شکل کاملاً مشخص مفید است. مشخصات سرعت باد افقی و غلظت گاز در مرکز محل آزمایش ساخته شده است [۲۰۴]. این روش به شار افقی گاز اجازه می‌دهد تا در ارتفاعات تا بالای ستون ساطع شده اندازه‌گیری شود، با این فرض که گاز در سطح تولید شده است و شارهای افقی را

می‌توان نسبت به ارتفاع ادغام کرد تا شار عمودی به دست آید. تکنیک‌های IHF شکاف بین روش‌های محفظه‌ای و روش‌های ریز هواشناسی کلاسیک را پر می‌کنند و نیازی به تجزیه‌کننده‌های گاز با پاسخ سریع ندارند [۱۸۸].

viii. تکنیک پراکندگی تصادفی لاگرانژی عقب مانده (bLs)

این تکنیک برای یک منطقه منبع کوچک و به خوبی تعریف شده مناسب است و از مدل لاگرانژی جریان هوا برای محاسبه شارهای سطحی از منطقه، با استفاده از اندازه‌گیری‌های سرعت باد، جهت باد و غلظت گاز در پایین باد استفاده می‌کند [۲۰۵]. این تکنیک را می‌توان برای اندازه‌گیری غلظت میانگین نقطه‌ای و خطی استفاده کرد و به ویژه برای اندازه‌گیری انتشار گازهای گلخانه‌ای از مزارع تصفیه شده یا سیستم‌های شدید تولید حیوانی مناسب است [۱۸۸].

ix. سکوه‌های متحرک

سکوه‌های متحرک، مانند کشتی‌ها [۲۰۰]، قطارها [۲۰۶] و هواپیماها [۲۰۷، ۲۰۸] ابزارهای مفیدی در مطالعات جوی هستند. سکوه‌های متحرک امکان اندازه‌گیری را در هر دو جهت افقی و عمودی با وضوح مکانی و زمانی بالا می‌دهند [۲۰۹]. ثابت شده است که اندازه‌گیری‌های هوابرد بسیار محبوب هستند [۲۰۷، ۲۱۰]. این سکوها روشی را برای مطالعه دینامیک انتقال اکسید نیتروز در تروپوسفر و حتی استراتوسفر ارائه کرده‌اند [۲۰۷، ۲۰۹، ۲۱۱].

به طور معمول، تکنیک‌های تجمع گردابی که در بالا توضیح داده شد در این اندازه‌گیری‌ها استفاده می‌شوند. نمونه‌ها را می‌توان جمع‌آوری کرد و بعداً در آزمایشگاه آنالیز کرد [۱۹۵، ۲۰۲] یا می‌توان در محل با استفاده از یک واکاونده سریع گاز نظارت کرد (زمان پاسخ از میلی‌ثانیه تا یک دقیقه مورد نیاز است). اجزای باد آبی روی سکوی متحرک اندازه‌گیری می‌شوند، بنابراین سرعت باد عمودی «واقعی» باید از روی حرکات سکوا اصلاح شود [۲۰۰]. ابزارهای مورد استفاده در اندازه‌گیری سکوی متحرک باید در برابر ارتعاشات و شرایط محیطی متغیر مانند دما، فشار و رطوبت مصون باشند [۲۰۷].

۲-۵-۲ روش‌های تحلیلی

روش‌های تحلیلی برای اندازه‌گیری N_2O را میتوان به سه گروه تقسیم کرد. کروماتوگرافی، نوری و آمپرومتریک.

i. روش‌های کروماتوگرافی

پرکاربردترین روش تحلیلی برای اندازه‌گیری اکسید نیتروز، کروماتوگرافی گازی (GC) با آشکارساز جذب الکترون (ECD) است. هزینه پایین روش‌های GC در مقایسه با سایر روش‌های تحلیلی یکی از مزیت‌های اصلی آنها است [۵۲]. علاوه بر این، داده‌های جمع‌آوری‌شده با استفاده از GC را می‌توان به راحتی با حجم وسیعی از داده‌هایی که قبلاً با استفاده از این تکنیک جمع‌آوری شده بود مقایسه کرد [۱۷۳، ۲۱۳، ۲۱۵] به طور کلی نمونه‌های گاز از محفظه‌های بسته جمع‌آوری می‌شوند. ساده‌ترین روش شامل جمع‌آوری دستی نمونه‌ها است که سپس در آزمایشگاه آنالیز می‌شوند. با این حال، در سال‌های اخیر، ابزارهای GC قابل حمل‌تر و خودکارتر شده‌اند و به آنها اجازه می‌دهند تا برای مدت

طولانی بدون سرنشین در صحرا کار کنند و نمونه‌های جمع‌آوری شده با استفاده از محفظه‌های خودکار را اندازه‌گیری کنند [۲۱۶]. GC همچنین در نظارت بر جو از برج‌های بلند استفاده شده است [۲۱۷-۲۱۹].

تکنیک‌های ECD متکی به استفاده از تزریق‌های بزرگ فضای بالای گاز (۵-۰/۵ میلی‌لیتر) از طریق ستون‌های پر شده، مانند Porapak Q یا Hayesep Q هستند. بخار آب و CO₂ هر دو می‌توانند باعث عدم دقت شوند. بنابراین نمونه‌ها باید از قبل آماده شوند [۲۱۲، ۲۲۰]. اگرچه کالیبراسیون‌ها باید تقریباً یک بار در هفته انجام شوند، اجرای استانداردهای مرجع برای تصحیح خطاهای رانش قویاً توصیه می‌شود. به طور کلی، یک استاندارد مرجع حداقل در هر ۳-۴ خواندن نمونه اجرا می‌شود. انتخاب گاز حامل نیز مهم است، زیرا پاسخ ECD به اکسید نیتروز با حضور آلاینده‌هایی مانند O₂ افزایش می‌یابد [۲۱۲، ۲۲۰]. به طور کلی، Ar یا N₂ با ۵٪ CH₄ گاز حامل ترجیحی است [۲۲۱، ۲۲۲]. WMO-GAW تعدادی توصیه برای اطمینان از دقت در اندازه‌گیری‌ها ارائه کرده است [۲۲۳]. اگر GC با یک آشکارساز یونیزاسیون شعله (FID) همراه باشد، می‌توان گازهای دیگر مورد نظر را همزمان با CO₂، CH₄ و CO اندازه‌گیری کرد. CO₂ و CO قبل از تجزیه و تحلیل باید با یک FID ابتدا به طور کاتالیستی به CH₄ تبدیل شوند [۲۱۷، ۲۲۴].

با استفاده از یک ECD، LOD های ۳۰ ppb دقت ۰/۴-۰/۱۸ ppb به دست آمده است. این LOD ها را می‌توان با استفاده از یک تکنیک استخراجی، مانند ریزاستخراج با فاز جامد (SPME) به ۱۸ ppb ارتقا داد [۲۲۵]. یکی از بزرگترین مزیت‌های GC این است که این روش به‌طور گسترده توسط تعداد زیادی از محققان مورد استفاده قرار گرفته است. این سیستم‌ها می‌توانند بدون سرنشین، در مکان‌های از راه دور در طی چندین سال اجرا شوند و ثابت کرده‌اند که بسیار قوی هستند [۲۱۴، ۲۱۷، ۲۱۸].

عیب اصلی تکنیک‌های GC زمان صرف شده برای اجرای نمونه‌ها (حدود ۴ تا ۶ دقیقه در هر نمونه) است. این تعداد قرائت‌هایی را که می‌توان انجام داد محدود می‌کند و می‌تواند در هنگام استفاده از روش‌های انباشتگی، مانند محفظه‌ها [۲۲۰، ۲۲۴] یک نقطه ضعف بزرگ باشد.

اگر سیستم GC به یک طیف‌سنج جرمی نسبت ایزوتوپی (IRMS) متصل باشد، می‌توان آنالیز ایزوتوپی اکسید نیتروز را انجام داد [۱۷۵، ۱۸۴]. با این حال، IRMS نمی‌تواند به طور مستقیم بین ایزومرهای با جرم یکسان، مانند ¹⁴N¹⁴N¹⁷O و ¹⁴N¹⁵N¹⁶O، ¹⁵N¹⁴N¹⁶O تمایز قائل شود. برای تعیین ترکیب ایزوتوپی انتخابی مکان، باید یک رویکرد غیرمستقیم اتخاذ شود که به موجب آن محتوای ¹⁵N قطعه و یون‌های مولکولی NO+ و اکسید نیتروز اندازه‌گیری می‌شود [۱۷۵، ۱۸۱، ۱۸۲]. لازم به ذکر است که گزارش اخیر از یک واکاونده عنصری اصلاح شده همراه با IRMS امکان اندازه‌گیری نسبت ایزوتوپی اکسید نیتروز را بدون استفاده از GC فراهم می‌کند [۲۲۶].

در حالی که استفاده از IRMS دارای دقت بسیار خوبی است (0/9-0/05 درصد)، اندازه‌گیری‌های با دقت بالا نیاز به تمرکز اولیه نمونه‌های هوا دارند. تا همین اواخر، نقطه ضعف اصلی این بود که اندازه بزرگ ابزارها مانع استفاده

^۱ . Solid Phase Microextraction^۲

آن‌ها در این زمینه می‌شد، اما پاتر و همکاران پیشرفت قابل توجهی را در اتوماسیون ابزار گزارش کرد که امکان انجام اندازه‌گیری‌های درجا با فرکانس بالا را فراهم کرد [۲۲۷].

ii. روش‌های نوری

مزیت اصلی روش‌های نوری نسبت به روش‌های کروماتوگرافی توانایی آن‌ها در انجام اندازه‌گیری‌های مداوم است. طیف را می‌توان در کسری از ثانیه به دست آورد، که تکنیک‌های نوری را به روش‌های ایده‌آل برای اندازه‌گیری شارهای گاز-گاز تبدیل می‌کند. به طور کلی، روش‌های نوری نیازهای واسنجی کمتری نسبت به روش‌های GC دارند. دو نوع اصلی طیف‌سنجی مربوط به اندازه‌گیری اکسید نیتروز هستند: طیف‌سنجی فروسرخ تبدیل فوری (FTIR) و طیف‌سنجی جذب لیزری [۲۰۸].

ناحیه Mid-IR (MIR), $4000\text{cm}^{-1}(2/5\mu\text{m})$ - $400\text{cm}^{-1}(25\mu\text{m})$ ، مرتبط‌ترین منطقه برای اندازه‌گیری اکسید نیتروز است [۲۲۸]. باز هم، جذب قوی آب و CO_2 می‌تواند منجر به از دست دادن اطلاعات طیفی شود و حساسیت روش‌های نوری را کاهش دهد. تعدادی راه‌حل مختلف توسعه یافته‌اند، از جمله حذف بخار آب و CO_2 از نمونه قبل از تجزیه و تحلیل یا به طور متناوب، جمع‌آوری پس‌زمینه و طیف‌های مرجع با همان غلظت تداخل‌ها [۲۲۹]. روش دیگر شامل محاسبه طیف مولکول‌های مداخله‌گر، مانند آب، و تفریق آنها است. پایگاه‌های داده مانند HITRAN [230] یا GEISA [231] پارامترهای محاسباتی را ارائه می‌دهند و گریفیث [۲۳۲] برنامه‌ای به نام MALT (انتقال لایه‌های جوی چندگانه) ایجاد کرده است که طیف‌های نظری را به شرط دانستن طول مسیر، رطوبت و دما محاسبه می‌کند.

مزیت دیگر طیف‌سنجی نوری امکان تمایز بین ایزوتوپ‌ولوگ‌هایی با جرم مولکولی یکسان (مانند $^{15}\text{N}^{14}\text{N}^{16}\text{O}$ و $^{14}\text{N}^{15}\text{N}^{16}\text{O}$) است. این ایزوتوپ‌های مختلف اکسید نیتروز دارای گذارهای چرخشی-ارتعاشی بسیار مشخصی هستند که بر خلاف IRMS امکان تجزیه و تحلیل طیفی مستقیم را فراهم می‌کند [۱۷۵].

طیف‌سنج‌های فروسرخ را می‌توان در هر یک از دو پیکربندی اصلی [۲۲۹، ۲۳۲]، یعنی سلول گاز بسته، که در آن نمونه گاز جمع‌آوری و به سلول جذب منتقل می‌شود، یا سلول مسیر، باز جایی که منبع نور در یک مسیر طولانی (~ 1000 متر) منتشر می‌شود به کار برد. پرتو بر روی یک آشکارساز جمع‌آوری می‌شود و طیف ترکیب هوا را در مسیر باز منعکس می‌کند [۲۳۳]. راه‌اندازی‌های مسیر باز برای نظارت مستمر در محل ایده‌آل هستند، اما جمع‌آوری نمونه‌های مرجع بسیار دشوار است و تجزیه و تحلیل داده‌ها بسیار پیچیده‌تر است [۲۲۹]. استفاده از یک سلول گاز بسته LOD های کمتری می‌دهد و جمع‌آوری طیف‌های مرجع و پس زمینه در مقایسه با مسیر باز FTIR نسبتاً ساده است [۲۳۴].

iii. طیف‌سنجی فروسرخ تبدیل فوری

FTIR از تابش فروسرخ باند پهن ناشی از یک منبع نورجسم سیاه استفاده می‌کند که کل طیف را پوشش می‌دهد. تابش منبع توسط تداخل‌سنج مایکلسون تنظیم می‌شود و تمام فرکانس‌های نوری به طور همزمان در تداخل

نگاشت اندازه‌گیری شده ثبت می‌شوند. این امکان، اندازه‌گیری تعدادی از گونه‌های مختلف گاز را به طور همزمان فراهم می‌کند، از جمله ایزوتوپولوگ‌ها. در حالی که طیف‌سنج‌های FTIR با وضوح پایین (1-1cm) می‌توانند برای تعیین دقیق غلظت کل اکسید نیتروز استفاده شوند، اندازه‌گیری‌های FTIR با وضوح بالا ($>0.05\text{cm}^{-1}$) امکان کمی‌سازی همزمان همه ایزوتوپ‌های اکسید نیتروز را فراهم می‌کنند [۲۳۵]. این امر FTIR با وضوح بالا را به یک رویکرد مکمل برای IRMS تبدیل می‌کند که نیازی به تبدیل شیمیایی ندارد و غیر مخرب است [۲۳۶-۲۳۸].

LOD های کمتر از ۱ ppb با استفاده از طیف‌سنجی FTIR به راحتی قابل دستیابی هستند. LOD ها را می‌توان با افزایش زمان میانگین‌گیری طیف بهبود بخشید. با افزایش میانگین زمان، نسبت سیگنال به نویز و LOD کاهش می‌یابد. دقت ۰/۱ ppb در مدت زمان میانگین ۱ دقیقه و ۰/۳ ppb در مدت زمان میانگین ۱۰ دقیقه گزارش شده است که الزامات GAW برای اندازه‌گیری‌های هوای پاک را برآورده می‌کند [۲۳۵، ۲۳۹].

ابزارهای FTIR برای تجزیه و تحلیل کمیاب گاز به صورت تجاری در دسترس هستند و به طور فزاینده‌ای قابل حمل شده‌اند که آن‌ها را برای استفاده در صحرا مناسب می‌کند. واسنجی بر اساس استانداردهای هوا معمولاً به صورت روزانه یا هفتگی انجام می‌شود. این ابزار همچنین به منبع برق، حفاظت از آب و هوا و کنترل دما نیاز دارد.

iv. طیف‌سنجی جذب لیزر فروسرخ

طیف‌سنجی لیزر فروسرخ اساس سریع‌ترین آنالیزورها برای اندازه‌گیری‌های غلظت گاز کمیاب اتمسفر است [۴۸]. برخلاف FTIR، که در آن کل طیف اندازه‌گیری می‌شود، در طیف‌سنجی لیزری از یک طول موج منفرد استفاده می‌شود و معمولاً مربوط به یک خط چرخشی/ارتعاشی گونه‌های هدف است. خط لیزر باریک بر روی خط جذب گونه هدف تنظیم می‌شود و جذب در سراسر خط (بر اساس شدت یا زمان حلقه پایین) یکپارچه می‌شود. انتخاب یک خط جذب حساسیت قابل توجهی می‌دهد، اما همچنین به این معنی است که تنها یک یا دو گاز کمیاب را می‌توان اندازه‌گیری کرد [۲۴۱، ۲۳۳، ۲۴۰].

کلید طراحی موفقیت‌آمیز اندازه‌گیری‌های جذب لیزری، شناسایی یک ویژگی جذب مناسب و جدا شده برای گونه هدف است. مهم است که لیزری در دسترس باشد که در محدوده فرکانس مورد نیاز قابل تنظیم باشد. برای اندازه‌گیری اکسید نیتروز، معمولاً حدود ۴ میکرومتر استفاده می‌شود [۲۲۸]. با توجه به اینکه خطوط جذب در اثر برخورد گسترده می‌شوند، اندازه‌گیری‌ها معمولاً در فشارهای پایین (۱۰ تا ۶۰ میلی‌متر جیوه) انجام می‌شوند، جایی که عرض خط باریک گونه‌های جذب‌کننده انتخاب‌پذیری را بهبود می‌بخشد [۲۱۳].

v. لیزرهای دیود سرب نمک

لیزرهای دیود سرب نمک به طور سنتی برای پایش کمیاب گاز اتمسفر استفاده می‌شوند و می‌توانند به طور دقیق با طول موج مورد نیاز برای اندازه‌گیری اکسید نیتروز تنظیم شوند [۲۴۰]. عیب اصلی لیزرهای دیود سرب نمک این است که کار با آنها در صحرا سخت است. آن‌ها در دمای کمتر از ۱۰۰ کلوین کار می‌کنند و بنابراین نیاز به خنک‌سازی

دارند. معمولاً برای این کار از یخچال‌های نیتروژن مایع یا هلیوم چرخه بسته استفاده می‌شود. علاوه بر این، عملکرد لیزر به دانش و تجربه اپراتور بالاتری نسبت به سایر فناوری‌ها نیاز دارد [۲۲۸].

vi. لیزرهای آبشاری کوانتومی (QCL)

از زمان اولین نمایش QCL در سال ۱۹۹۴ [۸۲]، ثابت شده است که آن‌ها در توسعه ابزار دقیق طیف سنجی mid-IR با دقت بالا بسیار مهم هستند. کاربرد QCL ها با سرعت بسیار بالایی در حال توسعه است [۲۰۹، ۲۴۳، ۲۴۴]. برخلاف نیمه رساناهای معمولی، QCL ها با روی هم قرار دادن لایه های متناوب نیمه رساناها ساخته می‌شوند. فوتون‌ها با انتقال الکترونیکی بین دو حالت برانگیخته در نوار رسانایی تولید می‌شوند [۲۴۵]. یک الکترون قادر است با عبور از ساختار QCL باعث گسیل چندین فوتون شود و به QCL ها قدرت خروجی بالاتری بدهد (میلی‌وات به وات در مقایسه با بیش از ۰/۱ میلی‌وات برای لیزرهای سرب نمک) [۲۰۹، ۲۴۱]. روش ساخت آن‌ها همچنین به این معنی است که QCL ها همچنین می‌توانند در یک محدوده تنظیم گسترده (صدها عدد موج) عمل کنند [۲۴۶].

قدرت بالاتر QCL ها به دلایل مختلفی بسیار مفید است. اول، نسبت سیگنال به نویز اندازه‌گیری‌ها را بهبود می‌بخشد، دوم قدرت بالا و خلوص طیفی QCL ها به آنها اجازه می‌دهد تا در تجزیه و تحلیل ایزوتوپی استفاده شوند [۲۴۷، ۲۴۸]، اگرچه یک مرحله پیش تمرکز لازم است [۲۴۹، ۲۵۰]. سوم، سطوح توان بالاتر آنها به QCL ها اجازه می‌دهد تا با حفره‌های نوری با ظرافت بالا استفاده شوند (برای جزئیات بیشتر به بخش ۳، ۲، ۴ مراجعه کنید) [۲۲۸].

جذابیت اصلی QCL ها توانایی آنها برای عملکرد در دمای نزدیک اتاق با حداقل رانش است، در نتیجه نیاز به خنک کننده ندارد. این باعث می‌شود که QCL ها بسیار قابل حمل تر و برای عملیات مناسب تر از لیزرهای خنک شونده برودتی باشند. در حوزه عملیات دمای اتاق است که پیشرفت‌های بزرگی حاصل شده است [۲۰۹].

در ابتدا، عملیات دمای اتاق با استفاده از QCL ها در حالت پالسی به دست آمد [۲۴۵، ۲۵۱]. با این حال، پیشرفت‌های مهندسی اخیر به QCL ها اجازه داده است تا در حالت موج پیوسته بدون خنک‌سازی برودتی کار کنند، اما در عوض از کنترل دمای ترموالکتریک خنک‌کننده (Peltier) استفاده کنند [۲۵۲]. توانایی کارکرد QCL ها در حالت موج پیوسته، قدرت بالاتر و پهنای خطوط لیزری باریک‌تر را در ناحیه طیفی که جذب‌های مولکولی قوی‌تر هستند، فراهم می‌کند، در نتیجه تمایز گونه‌های هدف را از ویژگی‌های جذب تداخلی در نزدیکی بهبود می‌بخشد. QCL های پالسی عموماً ارزانتر و قابل حمل تر هستند و این ممکن است منجر به ترجیح آن‌ها نسبت به لیزرهای موج پیوسته شود [۲۴۴، ۲۵۳]. QCL ها را می‌توان از چندین شرکت خریداری کرد. تعدادی از محققان از لیزرهای تجاری در توسعه سیستم‌های خود برای انجام اندازه‌گیری‌های اکسید نیتروز استفاده کرده‌اند [۱۹۹، ۲۵۴-۲۵۹].

vii. سلول‌های چندگذر

حساسیت روش‌های نوری را میتوان با افزایش طول مسیر تا حد زیادی بهبود بخشید. در حالی که نمونه‌های با غلظت‌های بالا را می‌توان با استفاده از طول مسیر کوچک (۱۰ تا ۲۵ سانتی‌متر) اندازه‌گیری کرد، برای اندازه‌گیری

گازهای کمیاب موجود در جو، مانند اکسید نیتروز، طول مسیر تا ۱۰۰ متر مورد نیاز است برای به دست آوردن LODهای چند ppbv که برای اندازه‌گیری شار اکسید نیتروز مورد نیاز است [۲۲۹]. از سلولهای چندگذرمانند White Herriot- معمولاً برای به دست آوردن طول مسیرهای طولانی استفاده می‌شوند.

در حالی که سلولهای چند گذر حساسیت طیف سنج را بهبود می‌بخشند، اما از نظر اندازه دارای یک نقطه ضعف بزرگ هستند که باعث می‌شود طیف سنج‌های حجیم‌تر و کمتر برای استفاده در صحرا مناسب باشند. علاوه بر این، سلولهای چندگذر از آینه‌هایی با دیافراگم بزرگ با سطوح غیرکریه‌ای استفاده می‌کنند که تولید آنها پرهزینه است و نسبت به تغییرات هم‌ترازی بسیار حساس است، و باعث می‌شود که مقاومت کمتری داشته باشند و به ارتعاشات حساس‌تر شوند [۲۲۸، ۲۴۶].

viii. حفره‌های نوری با ظرافت بالا

اخیراً، در تلاش برای غلبه با برخی از محدودیت‌های سلولهای چندگذر، تعدادی تکنیک مختلف برای انجام طیف‌سنجی جذبی با حساسیت بالا با استفاده از یک حفره نوری با ظرافت بالا توسعه داده شده است [۲۰۸]. حفره‌های نوری با ظرافت بالا از آینه‌های دی الکتریک بسیار بازتابنده و کم‌تلفات استفاده می‌کنند که اجازه می‌دهد مقدار زیادی انرژی نور در حفره جمع شود. آینه‌های دی الکتریک کم تلفات به نور اجازه می‌دهند تا از حفره نوری نشت نکند تا جذب گاز در داخل حفره را مشخص کند [۲۶۰].

با استفاده از حفره‌های نوری با ظرافت بالا، ابزارهای بسیار قابل حمل و کاربر پسند با طول مسیر موثر، صدها متر در دستگاہی به اندازه لپ‌تاپ توسعه یافته‌اند [۲۶۰، ۲۶۱]. دو تکنیک حفره با ظرافت بالا مربوط به اندازه‌گیری‌های اکسید نیتروز، طیف‌سنجی حلقه به پایین حفره (CRDS) و طیف‌سنجی خروجی حفره یکپارچه خارج از محور (OA-ICOS) است.

ix. طیف‌سنجی حلقه به پایین حفره (CRDS)

در CRDS ابتدا نور لیزر روشن می‌شود و در این مدت شدت نور به دلیل تداخل سازنده افزایش می‌یابد. سپس لیزر خاموش می‌شود و کاهش تصاعدی در نشت نور به خارج از حفره اندازه‌گیری می‌شود. اگر گونه‌ای که در حفره وجود دارد طول موج نور لیزر را جذب کند، پوسیدگی سریع‌تر از گونه غایب خواهد بود و امکان تجزیه و تحلیل کمی فراهم می‌کند. مدت زمان کاهش نور تا $e/1$ شدت اولیه به عنوان زمان حلقه پایین شناخته می‌شود. از زمان حلقه به پایین، غلظت آنالیت‌ها در حفره را می‌توان تعیین کرد [۲۰۸، ۲۶۱].

با توجه به اینکه CRDS به جای شدت مطلق جذب، میزان فروپاشی شدت را اندازه‌گیری می‌کند، CRDS حساسیت را بهبود بخشیده است و اندازه‌گیری‌ها تحت تأثیر نوسانات شدت لیزر قرار نمی‌گیرند، زیرا زمان حلقه به پایین به دامنه مطلق انتشار لیزر بستگی ندارد. نقطه ضعف CRDS این است که شرایط سختگیرانه رزونانس حفره و الکترونیک تشخیص با سرعت بالا مورد نیاز است [۲۴۶، ۲۶۲].

X. طیف‌سنجی حفره-خروجی یکپارچه خارج از محور (OA-ICOS)

در مقایسه با CRDS، طیف‌سنجی جذبی تقویت‌شده با حفره یا OA-ICOS روش ساده‌تری برای اندازه‌گیری تغییرات جذب ارائه می‌دهد. در OA-ICOS، نور لیزر با زاویه غیرصفر وارد حفره با ظرفیت بالا می‌شود و چگالی بالایی از حالت‌های حفره عرضی ایجاد می‌کند [۲۴۶،۲۶۱]. خروجی حفره هنگام تنظیم لیزر در محدوده طول موج مورد نظر اندازه‌گیری می‌شود. این بدان معنی است که تراز دقیق پرتو و الزامات حفره دقیق مورد نیاز نیست. چیدمان خارج از محور اجازه می‌دهد تا از طیف وسیعی از شرایط بروز استفاده شود و واکاونده‌ها کمتر مستعد تغییرات در تراز آینه‌ها هستند و به حسگرها اجازه می‌دهد کارکرد ساده‌تر و قوی‌تر برای کار در صحرا داشته باشند [۸۶،۱۰۲،۱۰۳].

هر دو روش تشخیص CRDS و OA-ICOS به صورت تجاری در دسترس هستند و این واکاونده‌های گاز دارای حساسیت تا دقت ۰/۵ ppb در ۱ هرتز هستند. ابزارهای تجاری موجود با استفاده از طیف‌سنجی حفره‌ای با ظرفیت بالا همچنین قادر به اندازه‌گیری ایزوتوپ‌ومرهای ۱۵N اختصاصی سایت بدون هیچ‌گونه پیش‌غلظت و با دقت ۱ درصد هستند.

xi. تشخیص گاز کمیاب با فوتوآکوستیک (PA)

یک طیف‌سنج فوتوآکوستیک (PAS) از یک منبع نور مانند QCL، یک سلول PA و یک میکروفون حساس تشکیل شده است که امواج صوتی حاصل از جذب تابش لیزر را اندازه‌گیری می‌کند [۲۴۳،۲۶۱،۲۶۴]. برخلاف سایر تکنیک‌های جذب میانی فرو سرخ، PAS یک تکنیک غیرمستقیم است که در آن تأثیر روی محیط جذب‌کننده تشخیص داده می‌شود و نه جذب مستقیم نور. محیط جاذب یک منطقه اضافی برای معرفی گزینش‌پذیری به تکنیک می‌دهد، بنابراین PAS گزینش‌پذیری بهتری نسبت به روش‌های مستقیم دارد. مزیت اصلی تشخیص PA این است که نسبت به ابزارهایی مانند سلول‌های چند گذر به تنظیم ساده‌تری نیاز دارد که باعث می‌شود راه‌اندازی به طور بالقوه قابل حمل‌تر باشد. یکی دیگر از جذابیت‌های PAS این است که می‌توان در فشار اتمسفر کار کرد. این مزایا آن را برای اندازه‌گیری درجا ایده آل می‌کند [۲۶۵،۲۶۶]. تعدادی از گروه‌ها روی اندازه‌گیری اکسید نیتروز با یک طیف‌سنج PA QCL برای تشخیص اکسید نیتروز و متان کار کرده‌اند که در آن بهترین LOD تجربی برای اکسید نیتروز در دمای اتاق ۷ppb است [۲۵۶]. در حال حاضر، عامل محدود کننده در حساسیت PAS، توان لیزر است که می‌تواند در دمای اتاق تولید شود. با پیشرفت‌های سریع در QCL ها، حساسیت PAS باید بهبود یابد [۲۵۶]. جزئیات پیشرفت در روش‌های IR PAS را می‌توان در بررسی‌های اخیر یافت [۲۶۶،۲۶۷].

xii. روش‌های آمپرومتریک

حسگرهای آمپرومتریک الکتروشیمیایی به طور کمی غلظت اکسید نیتروز را با اندازه‌گیری جریان تولید شده از کاهش اکسید نیتروز در یک الکتروود تعیین می‌کنند. از مزایای اصلی تشخیص گاز با استفاده از سنجش الکتروشیمیایی می‌توان به حساسیت، سادگی، سهولت استفاده و صرفه جویی در ساخت دستگاه اشاره کرد. هزینه کم ابزارهایی که این

حسگر را به کار می‌برند بسیار وسوسه کننده است [۲۶۸]. تعدادی از محققان استفاده از این تکنیک‌ها را برای اندازه‌گیری اکسید نیتروز و دیگر گازهای بیهوشی مورد بررسی قرار داده‌اند [۲۶۹، ۲۷۰].

موفق‌ترین حسگر الکتروشیمیایی برای اندازه‌گیری اکسید نیتروز محلول، یک میکرو حسگر تجاری غیر حساس به اکسیژن است که توسط Andersen و همکارانش توسعه یافته است [۲۷۱]. الکترو داری LOD ۵/۰ میکرومولار (22ppb) است [۲۶۸، ۲۷۱]. این حسگرهای الکتروشیمیایی توسط دانشمندان برای تعیین کمیت اکسید نیتروز در رسوبات خاک [۲۷۲]، کارخانه‌های تصفیه فاضلاب [۲۷۳] و حتی پرمافراست‌های در حال آب شدن [۲۷۴]، که در آن GC به طور سنتی استفاده می‌شود، استفاده شده است.

قرار گرفتن طولانی مدت در معرض اکسید نیتروز نسبتاً بالا منجر به رانش حسگر می‌شود، بنابراین میکرو سنسور نباید برای پایش طولانی مدت استفاده شود [۲۷۱]. جنی و همکاران [۲۷۵] یک مطالعه مهم در مورد وابستگی دما و تداخل NO در اندازه‌گیری اکسید نیتروز انجام داد. این مطالعه به جزئیات چگونگی اصلاح این اثرات می‌پردازد و در نتیجه استفاده از الکترودهای اکسید نیتروز را بهینه می‌کند.

۲-۵-۳ روش‌های جدید در حال توسعه

i. زیست حسگرهای آمپرومتریک

رویکرد زیست حسگر آمپرومتریک با استفاده از آنزیم نیتروژن اکسید ردوکتاز - که نیتروژن زدایی انجام می‌دهد، ساخته شده است. یک مطالعه، اکسید نیتروز محلول را در محدوده غلظت ۰/۱ میلی مولار (۴/۴ پی پی ام) تا ۸ میلی مولار (۳۵۲ پی پی ام) اندازه‌گیری کرد [۲۷۶]. جالب توجه است که در حضور اکسیژن، آنزیم هنوز از نظر کاتالیزوری فعال بود و امکان اندازه‌گیری غلظت‌های پایین اکسید نیتروز را فراهم می‌کرد، اما بالای محدوده تشخیص خطی به ۱ میلی مولار کاهش یافت. در حالی که این تحقیق در مراحل اولیه توسعه است و حساسیت به دست آمده برای اندازه‌گیری - های شار اکسید نیتروز در حال حاضر نامناسب است، حسگرهای زیستی می‌توانند راهی پربار برای انجام کارهای بیشتر باشند.

ii. فیبرهای نوری

سیلوا و همکاران در کوششی برای پایش درجای اکسید نیتروز در محل کار، مانند سالن‌های عمل [۲۷۷] استفاده از یک تحلیلگر فیبر نوری را بررسی کردند. واکاونده (آنالیزور) یک SPME (ریزاستخراج با فاز جامد) را گنجانده است که در آن آنالیت بر روی یک فیبر نوری پوشیده شده با دی متیل پلی سیلوکسان جذب می‌شود که در آن تشخیص اکسید نیتروز انجام می‌شود. برای تجزیه و تحلیل درجا، از پمپ خلاء برای نمونه برداری هوا استفاده شد. زمان پاسخ فیبر نوری ۲۴۰ ثانیه گزارش شده است. این زمان پاسخ سریعتر از زمان به دست آمده با استفاده از SPME-GC-MS است که در آن زمان‌های ۳۶۰ ثانیه به دست آمد. محدوده خطی ۱/۸-۰/۲ ppb برای اکسید نیتروز گزارش شده است، اما این ممکن است برای اندازه‌گیری در اتاق‌های عمل - که سطوح N₂O به طور قابل توجهی بالاتر است -

بسیار حساس باشد [۲۷۸]. با توجه به محدوده تشخیص کم، این رویکرد می‌تواند برای اندازه‌گیری شار اکسیدنیتروز از خاک به عنوان جایگزین سریع‌تری برای روش‌های GC مفید باشد.

iii. سطوح SnO_2 اصلاح شده

یکی دیگر از راه‌های امیدوارکننده برای تشخیص اکسید نیتروز، استفاده از سطوح SnO_2 اصلاح شده است که اکسید نیتروز با آن تعامل دارد [۲۷۹]. دو نمونه اولیه حسگر بر اساس نوع ترکیبی پتانسیل [۲۸۰] و حسگرهای نیمه رسانا [۲۸۱] گزارش شده است. حسگرهای نمونه اولیه برای تشخیص اکسید نیتروز در هوا استفاده شدند و نویسندگان تشخیص ۱۱۰-۳۰۰ ppm اکسید نیتروز را در ۵۰۰ درجه سانتیگراد گزارش کردند. این حسگرها می‌توانند برای تشخیص اکسید نیتروز در محل کار یا احتمالاً در اتاق‌های بسته استفاده شوند.

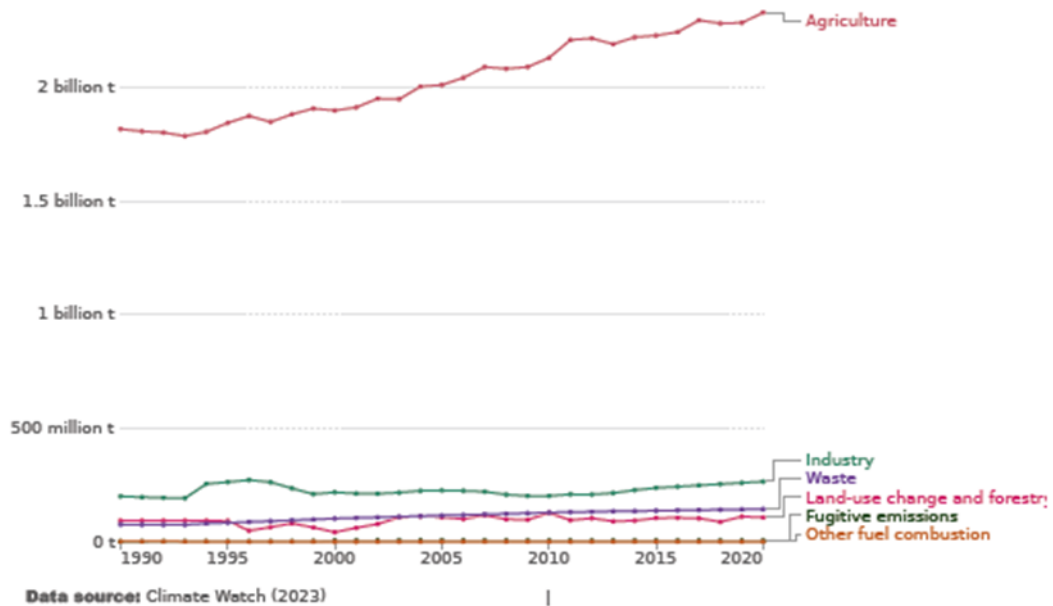
نمودارهای ۱۰ و ۱۱ انتشار اکسید نیتروز را در بخش‌های مختلف اقتصاد جهان و ایران را نشان می‌دهند (نمودار مربوط به سایر کشورهای مورد بررسی در گزارش حاضر در بخش پیوست ارائه شده است). مطابق این نمودارها بخش کشاورزی بزرگترین منتشرکننده اکسید نیتروز در جهان و کشورهای مورد بررسی در سال ۲۰۲۰ بود. به خاطر نقش عمده کشاورزی در هند، این کشور با انتشار ۲۵۰ میلیون تن اکسید نیتروز حدود ۱۰ درصد انتشار جهانی این گاز را دارد. پس از آن پاکستان و مکزیک هستند که به ویژه پاکستان، بخش کشاورزی بزرگی دارد و انتشار زیادی نیز دارد (سه برابر انتشار اکسید نیتروز در بخش کشاورزی ایران). به خاطر بزرگ‌تر بودن بخش کشاورزی ترکیه انتشار اکسید نیتروز در ترکیه ۲ برابر انتشار این گاز در بخش کشاورزی ایران است.

جدول ۱۵ میزان و سهم بخش کشاورزی و کل بخش‌های مختلف اقتصاد جهان و ایران در انتشار اکسیدنیتروز در سال‌های ۱۹۹۰ و ۲۰۲۰ نشان می‌دهد. بخش کشاورزی کشورهای پاکستان، هند و ترکیه و مکزیک در سال ۲۰۲۰ به‌ترتیب بیشترین سهم در انتشار اکسیدنیتروز (بیش از ۸۵ درصد) را دارند. سهم بخش کشاورزی ایران در انتشار اکسیدنیتروز حدود ۴۵ درصد است.

Nitrous oxide emissions by sector, World

Nitrous oxide (N₂O) emissions are measured in tonnes of carbon dioxide equivalents³.

Our World
in Data

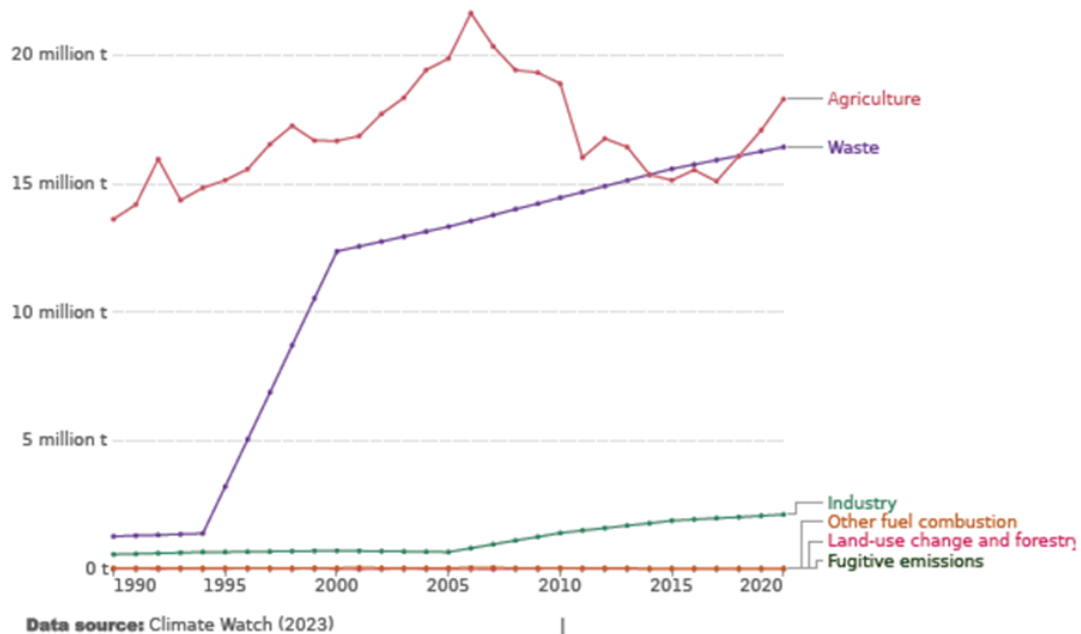


شکل ۱۰- انتشار اکسید نیتروز در بخش‌های مختلف اقتصاد جهان در بازه زمانی ۱۹۹۰ و ۲۰۲۰ (معادل دی اکسید کربن).

Nitrous oxide emissions by sector, Iran

Nitrous oxide (N₂O) emissions are measured in tonnes of carbon dioxide equivalents³.

Our World
in Data



شکل ۱۱- انتشار اکسید نیتروز در بخش‌های مختلف اقتصاد ایران در بازه زمانی ۱۹۹۰ و ۲۰۲۰ (معادل دی اکسید کربن)

جدول ۱۵- میزان و سهم بخش کشاورزی و کل بخش‌های مختلف اقتصاد در انتشار گاز اکسیدنیتروز (میلیون تن معادل دی اکسید کربن) [۱۵].

کشور	کشاورزی		کل بخش‌های مختلف اقتصاد		سهم بخش کشاورزی از انتشار کل بخش‌ها (درصد)	
	۱۹۹۰	۲۰۲۰	۱۹۹۰	۲۰۲۰	۱۹۹۰	۲۰۲۰
ایران	۱۳/۶۲	۱۷/۹۱	۱۶/۵۱	۳۹/۴	۸۲/۵	۴۵/۴۶
هند	۱۳۲/۰۷	۲۴۲/۶۳	۱۴۷/۰۰	۲۸۳/۰۱	۸۹/۸۴	۸۵/۷۳
پاکستان	۲۵/۲۵	۶۱/۶۵	۲۷/۷۵	۶۹/۴۱	۹۰/۹۹	۸۸/۸۲
مکزیک	۳۳/۳۴	۳۷/۹۸	۳۸/۸۱	۴۴/۶۱	۸۵/۹۱	۸۵/۱۴
ترکیه	۲۳/۰۴	۳۲/۵۴	۲۶/۸۱	۳۸/۱۹	۸۵/۹۴	۸۵/۲۱
مصر	۹/۴۵	۱۳/۲۰	۱۲/۵۲	۱۹/۹۴	۷۵/۴۸	۶۶/۲۰

نکته اصلی واکاوی‌های گسترده این بخش آن است که ناهمخوانی‌های بسیاری میان داده‌های اندازه‌گیری شده بزرگ مقیاس صحرایی^۱ و میزان انتشار گزارش شده توسط نهادهای رسمی مانند IPCC و UNFCCC^۲ که به ندرت داده‌های اندازه‌گیری شده را به کار می‌برد، هست. این ناهمخوانی‌ها در هر دو سطح جهانی و ملی و برای همه منابع انتشار وجود دارد. بسیاری از گزارش‌های ارسالی رسمی گازهای گلخانه‌ای به UNFCCC برای سال‌ها به روزرسانی نشده‌اند (مانند ایران که تازه‌ترین گزارش انتشار گازهای گلخانه‌ای در سال ۲۰۱۰ انجام شده است) و حتی برای آنهایی که شده‌اند بسیاری هنوز به اندازه کافی دقیق نیستند تا نمای روشنی از انتشار گازهای گلخانه‌ای بدهند. یکی از توصیه‌های این پژوهش آن است که تا آنجایی که می‌شود از اندازه‌گیری‌های صحرایی بزرگ مقیاس برای گزارش انتشار گازهای گلخانه‌ای استفاده شود و به برآوردهای تقریبی IPCC و UNFCCC اکتفا نشود.

^۱ . large-scale field measurements

^۲ . United Nations Framework Convention on Climate Change

فصل سوم

برآورد انتشار گازهای گلخانه‌ای در بخش

کشاورزی ایران

۳- برآورد انتشار گازهای گلخانه‌ای در بخش کشاورزی ایران

گازهای گلخانه‌ای با جذب انرژی و کاهش سرعت فرار آن به فضا، زمین را گرم می‌کنند و اثرات متفاوتی بر گرم شدن زمین دارند. تفاوتی که این گازها با یکدیگر دارند عبارتند از توانایی آنها در جذب انرژی «بازده تابشی» و مدت زمان ماندن آنها در جو (که به عنوان «طول عمر» آنها نیز شناخته می‌شود).

از سال ۱۹۹۰، هیئت بین دولتی تغییرات آب و هوایی (IPCC) از پتانسیل گرمایش جهانی (GWP) برای مقایسه اثرات گرمایش جهانی گازهای مختلف استفاده می‌کند. به طور خاص، این اندازه‌گیری است که نشان می‌دهد انتشار یک تن گاز در یک دوره زمانی معین، نسبت به انتشار یک تن دی‌اکسیدکربن (CO_2) چه مقدار انرژی جذب می‌کند. هر چه GWP بزرگتر باشد، یک گاز معین در مقایسه با CO_2 در آن بازه زمانی بیشتر زمین را گرم می‌کند. دوره زمانی معمولاً برای GWP ها ۱۰۰ سال است. GWP ها واحد اندازه‌گیری مشترکی را ارائه می‌دهند که به تحلیلگران اجازه می‌دهد تا تخمین‌های انتشار گازهای مختلف را جمع‌آوری کنند (به عنوان مثال، فهرستی از گازهای گلخانه‌ای ملی تهیه کنند) و به سیاست‌گذاران اجازه می‌دهد فرصت‌های کاهش انتشار را در بخش‌ها و گازها مقایسه کنند.

CO_2 ، طبق تعریف، بدون در نظر گرفتن دوره زمانی مورد استفاده، دارای $\text{GWP}=1$ است زیرا گازی است که به عنوان مرجع استفاده می‌شود. CO_2 برای مدت بسیار طولانی در سیستم آب و هوایی باقی می‌ماند: انتشار CO_2 باعث افزایش غلظت CO_2 در جو می‌شود که هزاران سال طول می‌کشد. تخمین زده می‌شود متان $27-30 = \text{GWP}$ در طول ۱۰۰ سال داشته باشد. متان منتشر شده امروز به طور متوسط حدود یک دهه دوام می‌آورد که زمان بسیار کمتری نسبت به CO_2 است اما متان نیز انرژی بسیار بیشتری نسبت به CO_2 جذب می‌کند. اثر خالص طول عمر کوتاه‌تر و جذب انرژی بیشتر در GWP منعکس می‌شود. GWP متان همچنین برخی از اثرات غیرمستقیم را به همراه دارد، مانند این واقعیت که متان پیش‌ساز ازن است و ازن خود یک GHG است. N_2O دارای $\text{GWP} = 273$ برای یک مقیاس زمانی ۱۰۰ ساله است. N_2O منتشر شده امروزه به طور متوسط بیش از ۱۰۰ سال در جو باقی می‌ماند. کلروفلوئوروکربنها (CFCs)، هیدروفلوئوروکربنها (HFCs)، هیدروکلروفلوروکربنها (HCFCs)، پرفلوئوروکربنها (PFCs) و هگزا فلوراید گوگرد (SF_6) گاهی اوقات گازهایی با GWP بالا نامیده می‌شوند، زیرا برای مقدار معینی از جرم، گرمای قابل ملاحظه‌ای بیشتر از CO_2 به دام می‌اندازند. (GWP برای این گازها می‌تواند هزاران یا ده ها هزار باشد).

EPA و سایر سازمان‌ها مقادیر GWP را به‌روزرسانی می‌کنند. این تغییر می‌تواند ناشی از برآوردهای علمی به روز شده از جذب انرژی یا طول عمر گازها یا تغییر غلظت اتمسفر GHGها باشد که منجر به تغییر در جذب انرژی یک تن اضافی گاز نسبت به گاز دیگر می‌شود. در جدیدترین گزارش IPCC، روش‌های متعددی برای محاسبه GWP براساس نحوه محاسبه تأثیر گرمایش آینده بر چرخه کربن ارائه شده است.

EPA برآوردهای GWP در آخرین ارزیابی علمی IPCC را نمایانگر به‌روزترین یافته‌های دانشی می‌داند و در ارتباطات علمی آنها را به کار می‌برد. GWP های ذکر شده در بالا از ششمین گزارش ارزیابی IPCC، منتشر شده در سال ۲۰۲۱ هستند. فهرست انتشارات و مخازن گازهای گلخانه‌ای (موجودی) هر کشوری بایستی مطابق با استانداردهای

بین المللی گزارش‌دهی گازهای گلخانه‌ای تحت کنوانسیون چارچوب سازمان ملل متحد در مورد تغییرات آب و هوا (UNFCCC) باشد. دستورالعمل‌های UNFCCC اکنون نیاز به استفاده از مقادیر GWP از پنجمین گزارش ارزیابی (AR5) IPCC منتشر شده در سال ۲۰۱۳ دارد. فهرست همچنین انتشارات را بر حسب جرم نشان می‌دهد، به طوری که می‌توان معادل CO₂ را با استفاده از هر GWP و مجموع انتشار را با استفاده از IPCC جدیدتر محاسبه کرد.

بسیاری از کشورها از GWP یکصد ساله به عنوان معیاری برای تأثیر نسبی گازهای گلخانه‌ای مختلف استفاده می‌کند. با این حال، جامعه علمی تعدادی معیار دیگر را ایجاد کرده است که می‌تواند برای مقایسه یک GHG با دیگری استفاده شود. این معیارها ممکن است بر اساس بازه زمانی، نقطه پایانی آب و هوای اندازه‌گیری شده یا روش محاسبه متفاوت باشد. به عنوان مثال، GWP بیست ساله گاهی اوقات به عنوان جایگزینی برای GWP صد ساله استفاده می‌شود. درست مانند GWP صد ساله بر اساس انرژی جذب شده توسط یک گاز در طول ۱۰۰ سال، GWP بیست ساله بر اساس انرژی جذب شده در طول ۲۰ سال است. این GWP گازهایی با طول عمر کمتر را در اولویت قرار می‌دهد، زیرا اثراتی را که بیش از ۲۰ سال پس از وقوع انتشار اتفاق می‌افتد در نظر نمی‌گیرد. از آنجایی که همه GWP ها نسبت به CO₂ محاسبه می‌شوند، GWP ها بر اساس یک بازه زمانی کوتاه‌تر برای گازهایی با طول عمر کمتر از CO₂ بزرگتر و برای گازهایی با طول عمر بیشتر از CO₂ کوچکتر خواهند بود. به عنوان مثال، برای CH₄ که عمر کوتاهی دارد، GWP ۱۰۰ ساله ۲۷-۳۰ بسیار کمتر از GWP ۲۰ ساله ۸۱-۸۳ است. برای CF₄، با طول عمر ۵۰۰۰ سال، GWP ۱۰۰ ساله ۷۳۸۰ بزرگتر از GWP ۲۰ ساله ۵۳۰۰ است.

معیار جایگزین دیگر، پتانسیل دمای جهانی (GTP) است. در حالی که GWP اندازه‌گیری گرمای جذب شده در یک دوره زمانی معین به دلیل انتشار یک گاز است، GTP اندازه‌گیری تغییر دما در پایان آن دوره زمانی (باز هم نسبت به CO₂) است. GTP پیچیده‌تر از GWP است، زیرا نیازمند مدل‌سازی میزان واکنش سیستم آب و هوا به افزایش غلظت گازهای گلخانه‌ای (حساسیت آب و هوا) و سرعت واکنش سیستم (تا حدی براساس نحوه جذب گرما توسط اقیانوس) است.

۱-۳ برآورد انتشار گازهای گلخانه‌ای در بخش‌های انرژی و کشاورزی ایران

در این گزارش برای تبدیل هر تن نفت، گاز، زغال سنگ، متان و اکسید نیتروز به گاز معادل دی اکسید کربن، ضرایب تبدیل گازهای گلخانه‌ای از گزارش پنجم IPCC به کار گرفته شده‌اند [۲۸۷]. با به کارگیری میزان نفت، گاز و زغال سنگ مصرفی در ایران از جدول‌های ۱-۱۰ میزان دی اکسید کربن منتشر شده از این منابع را چنین می‌توان برآورد کرد [۹، ۱۰].

1. Oil consumption in Iran (2023)

$$2136000 \text{ bbl/day} * 365 \text{ days/year} * 4.3\text{e-4} \text{ mt CO}_2/\text{bbl} * 1\text{e-6} \text{ mmt/mt} = 335.245 \text{ Mt CO}_2/\text{YR}$$

2. Gas consumption in Iran (2023) per EIA

$$277 \text{ (bcm)} * 35.315 \text{ (bcf/bcm)} * 0.055 \text{ (Mmt CO}_2/\text{bcf)} = 538 \text{ Mt CO}_2/\text{YR}$$

3. Coal consumption in iran (2022) per EIA

0.049e15 BTU = 1765331.5 tons of Hard Coal

CO₂ Emissions from coal:

$$1765331.5(\text{ton}) * 1000(\text{kg/ton}) / 0.4536 (\text{pound/kg}) * 9.07\text{e-}4 (\text{ton CO}_2/\text{pound}) =$$

3.5 Mt CO₂/YR

Total CO₂ emissions from Energy Consumption in Iran

$$538 + 335.25 + 3.5 = 876 \text{ Mt CO}_2/\text{YR}$$

در سال ۲۰۲۳ انرژی های فسیلی در ایران بیش از ۸۷۶ میلیون تن CO₂ منتشر کرده است.

برای برآورد انتشار گازهای گلخانه‌ای در بخش کشاورزی ایران در سال ۲۰۲۳ بایستی چند منبع انتشار را در

نظر گرفت:

۱- بر پایه گزارش دیده بان اقلیم میزان اکسید نیتروز منتشر شده از کاربرد کودهای شیمیایی و آلی در بخش

کشاورزی (تمامی کودهای نیتراتی که ۷-۸ نوع آن در ایران استفاده می‌شود) ایران ۱۸/۳ میلیون تن معادل CO₂ است [۱۵].

۲- میزان متان منتشر شده از ۷ میلیون گاو در بخش کشاورزی ایران [۲۸۸] بیش از ۲۰ میلیون تن معادل

CO₂ است. میزان انتشار متان از هر گاو به طور میانگین ۹۵ کیلوگرم در سال (۲۸۹) و از هر هکتار شالیزار ۴۵ کیلوگرم در سال برآورد می‌شود (۲۹۰):

Methane produced per cow annually = 154 - 264 pounds/Year (210 pounds/Year)

$$7\text{e}6 \text{ cow} * 210 \text{ pounds/Year} * 0.4536 \text{ kg/pounds} / 1000 = 666792 \text{ tons methane/Year} * 30 \text{ CO}_2/\text{methane} = 20 \text{ Mt CO}_2\text{-eq}$$

۳- منبع دیگر در انتشار متان در بخش کشاورزی، شالیزارهای ایران است که ۷۹۰ هزار هکتار [۲۸۸] برآورد

میشود (فرض می‌شود که تنها یک برداشت در سال انجام می‌گردد):

Methane produced by one hectare of paddy field per season per year = 32 - 58 kg (45kg avg)

$$79\text{e}4 \text{ hec} * 45 \text{ kg/hec/yr} * 1\text{e-}3 \text{ ton/kg} = 35.5\text{e}6 \text{ tons/Year} * 30 \text{ CO}_2\text{-eq/methane} = 1.0665 \text{ MTon CO}_2\text{-eq/YR}$$

برآورد میزان انتشار متان در این پژوهش با برآورد دیده بان اقلیم [۱۵] همخوان است.

۴- دیگر منبع انتشار گازهای گلخانه‌ای در بخش کشاورزی ایران ۵۰ هزار بشکه در روز گازوئیل تحویلی به این

بخش [۲۸۹] برای سوخت تراکتورها (۵۹۰،۰۰۰)، کمباین‌ها (۲۰،۰۰۰)، و تیلرها (۲۰۸،۰۰۰) است [۲۹۱]:

$$5\text{e}4(\text{bbl/day}) * 365 (\text{days/year}) * 0.43 * 1\text{e-}6 (\text{MT CO}_2/\text{bbl}) = 8 \text{ MT CO}_2/\text{YR}$$

۵- منبع دیگر انتشار گازهای گلخانه‌ای در بخش کشاورزی ایران میزان برق تحویلی به این بخش است که ۱۴/۳ درصد از برق مصرفی کشور (۳۱۷ تراوات ساعت) است (در سطح مزرعه بدون لحاظ تلفات):

$$317e9 \text{ (kWh)} * 4.17e-4 * 1e-6 \text{ (MT CO}_2\text{/kWh-YR)} * 0.143 = 19 \text{ Mt CO}_2\text{/YR}$$

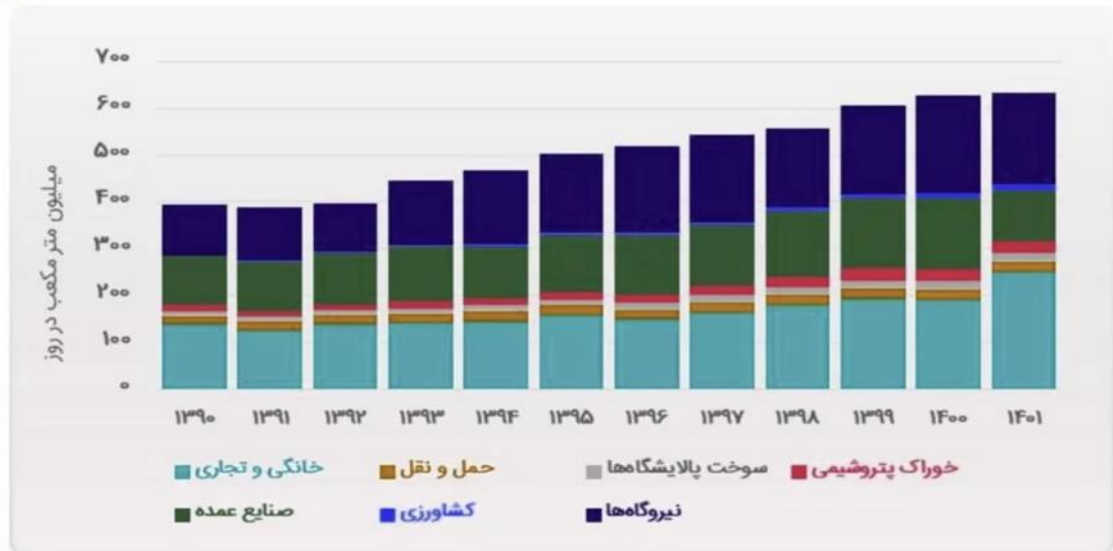
۶- دیگر منبع انتشار گازهای گلخانه‌ای در بخش کشاورزی ایران میزان گاز تحویلی به این بخش است که ۲ درصد از گاز مصرفی کشور (۲۷۷ بیلیون متر مکعب) است (شکل ۱۲) [۲۹۲]:

$$277 \text{ (bcm)} * 35.315 \text{ (bcf/bcm)} * 0.02 * 0.055 \text{ (metric ton CO}_2\text{/Mcf-YR)} = 11 \text{ Mt CO}_2\text{/YR}$$



سهم مصرف گاز طبیعی در بخش‌های مختلف اقتصادی از سال ۱۳۹۰ تا ۱۴۰۱

واحد: میلیون مترمکعب در روز



Source: 1400 ترانزنامه هیدروکربوری و VCMStudy Analytics

VCMStudy.ir

شکل ۱۲- سهم مصرف گاز طبیعی در بخش‌های مختلف اقتصاد ایران.

با افزودن این برآوردها و بدون در نظر گرفتن رها شدن CO_2 از زمین‌های کشاورزی، میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای در بخش کشاورزی ایران ۷۸ میلیون تن معادل CO_2 است که بیش از ۲ برابر برآوردهای دیده‌بان اقلیم و کمیسیون اروپا است. با در نظر گرفتن مقدار و درصد انتشار گازهای گلخانه‌ای در بخش‌های مختلف کشاورزی آمریکا [۱۷] و برون‌یابی و تعمیم آن به ایران و با به‌کارگیری برآورد انتشار گازهای گلخانه‌ای از زمین‌های کشاورزی ایران در گزارش ملی سوم UNFCCC در سال ۲۰۱۰ که ۱۹/۳ میلیون تن بود (جدول ۲/۱۳ از [۲۹۳]). این پژوهش انتشار گازهای گلخانه‌ای از زمین‌های کشاورزی ایران را ۲۵ میلیون تن برآورد می‌کند (جدول ۱۶). با افزودن آزاد شدن کربن خاک بر اثر کشت و کار کشاورزی، چرای دام‌ها در مراتع و سوزاندن بازمانده‌های گیاهی به ۷۸ میلیون تن محاسبه شده در بالا، این پژوهش انتشار گازهای گلخانه‌ای در بخش کشاورزی ایران را ۱۰۳ میلیون تن معادل CO_2 برآورد می‌کند که ۱۰ درصد انتشار گازهای گلخانه‌ای ایران در سال ۲۰۲۳ است.

جدول ۱۶- برآورد میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای از بخش‌های مختلف کشاورزی ایران (میلیون تن معادل دی اکسید کربن)

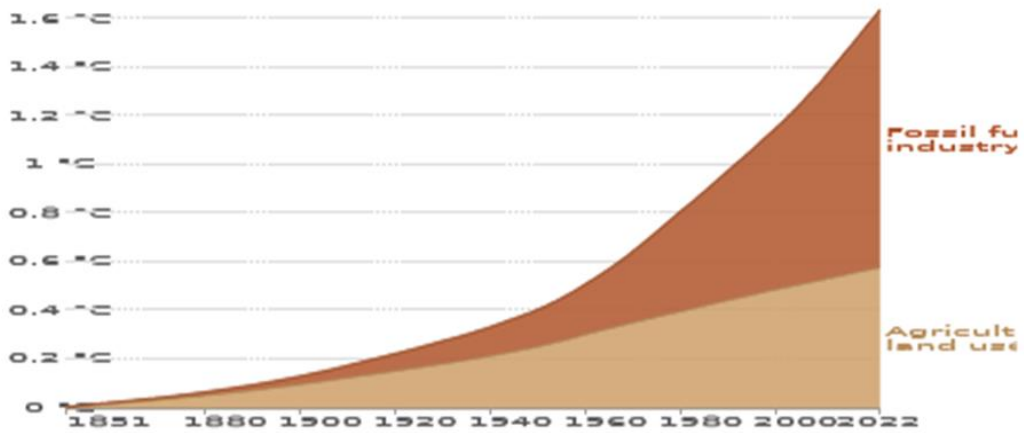
ردیف	منبع انتشار	میزان انتشار
۱	تخمیر روده‌ای دام‌ها	۲۰
۲	مصرف برق کشاورزی معادل ۱۴/۳ درصد از کل برق کشور	۱۹
۳	کاربرد کودهای شیمیایی و آلی در کشاورزی (تمامی ۷-۸ نوع کود نیتراتی)	۱۸/۳
۴	مصرف گاز طبیعی معادل ۲ درصد گاز مصرفی کشور	۱۱
۵	مصرف سوخت‌های فسیلی شامل ۵۰ هزار بشکه گازوئیل در روز برای ماشین‌آلات کشاورزی	۸
۶	شالیزارها (با لحاظ وسعت ۷۹۰ هزار هکتار و فرض یک برداشت در سال)	۱
۷	انتشار غیرمستقیم ناشی از آزادسازی کربن خاک، چرای دام‌ها و سوزاندن بقایای گیاهی	۲۵
جمع کل		۱۰۲/۳

افزایش گازهای گلخانه‌ای تاثیر ویرانگری بر اقلیم جهان گذاشته است که پیامدهای آن افزایش میانگین دمای جهانی به میزان ۱/۶۱ درجه سانتی‌گراد، ذوب شدن یخچال‌ها، کاهش بارندگی در برخی جاها و افزایش آن در جاهای دیگر، افزایش تبخیر از سطح زمین، خشک شدن دریاچه‌ها و رودخانه‌ها و تخلیه سفره‌های آب زیرزمینی است. این پیامدها در ایران شدیدتر بوده به طوری که میانگین افزایش دمای تجمعی در ایران ۱/۸ درجه سانتیگراد بوده است [۲۴].

نمودار ۱۳ افزایش تجمعی میانگین دمای زمین در بازه زمانی ۱۸۵۱-۲۰۲۲ را نشان می‌دهد که پیامد انتشار گازهای گلخانه‌ای از «سوخت‌های فسیلی و صنعت» و «کشاورزی و تغییر کاربری زمین» است که سهم آنها به ترتیب ۱/۰۴ و ۰/۵۵ درجه سانتی‌گراد تا سال ۲۰۲۱ است. از ۱/۶۱ درجه افزایش میانگین دمای جهانی، آمریکا با ۰/۲۸ چین با ۰/۲، روسیه با ۰/۱، هند با ۰/۰۸، برزیل با ۰/۰۸، اندونزی با ۰/۰۶، آلمان با ۰/۰۵، بریتانیا با ۰/۰۴، ژاپن و کانادا هر کدام با ۰/۰۳ و فرانسه و ایران و مکزیک و استرالیا و آفریقای جنوبی هر کدام با ۰/۰۲ بیشترین سهم را در افزایش میانگین دمای جهان به میزان کنونی داشته‌اند [۱۵]. شش کشور آمریکا، چین، روسیه، هند، برزیل، اندونزی نیمی از افزایش میانگین دمای جهان به میزان کنونی را داشته‌اند. جالب است که در برزیل و اندونزی بخش کشاورزی و تغییر کاربری زمین بیشتر از سوخت‌های فسیلی و صنعت در افزایش میانگین دمای زمین نقش داشته‌اند.

Global warming contributions from fossil fuels and agriculture, 1851 to 2022

The global mean surface temperature change as a result of carbon dioxide, methane, and nitrous oxide.



Data sources: IPCC AR6 WGII (2022)

Note: This does not include cooling impacts from sulphur dioxide.

شکل ۱۳ - افزایش تجمعی میانگین دمای زمین در بازه زمانی ۱۸۵۱ - ۲۰۲۱ [۱۵].



فصل چهارم

راهبردهای کاهش انتشار گازهای

گلخانه‌ای در بخش کشاورزی

۴- راهبردهای کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای در بخش کشاورزی

بر پایه برآوردها و ارزیابی‌های نگارنده، که در جدول‌های ۱۷ و ۱۸ گردآوری شده‌اند، بخش کشاورزی ایران با به کارگیری ۴ میلیون نفر از نیروی کار کشور و تولید ۱۰۷ میلیون تن فرآورده‌های کشاورزی سهمی ۳۹ میلیارد دلاری در اقتصاد کلان ایران دارد که این میزان حدود ۱۰ درصد GDP کشور ایران است. در آماده کردن این جدول‌ها افزون بر برآوردهای کارشناسی از میزان تولید فرآورده‌های کشاورزی [۲۸۸]، بهای جهانی فرآورده‌های کشاورزی و همچنین سهم کشاورزی، صنعت و خدمات در اقتصاد کلان کشورها، بر پایه به‌روزترین آمارها، به کار گرفته شده است.

جدول ۱۷- تولید فرآورده‌های کشاورزی گوناگون و ارزش آن‌ها در اقتصاد کلان ایران [۲۸۸].

فرآورده کشاورزی	تولید (میلیون تن)	بها (بیلیون دلار)
گندم	۱۰	۳
گوشت قرمز	۰/۹	۵
شیر	۱۱/۶۵	۲/۵
گوشت مرغ	۲/۶	۵
تخم مرغ	۱/۲۳	۱
صید	۱	۳/۵
باغبانی	۲۰	۱۰
سبزی و صیفی	۱۵	۵
برنج	۲	۱/۵
شکر	۱/۵	۱
بقیه	۴۱	۱/۵
جمع	۱۰۷	۳۹

جدول ۱۸- سهم کشاورزی، صنعت و خدمات در تولید ناخالص داخلی اسمی (بیلیون دلار) چند کشور

کشور	تولید ناخالص داخلی اسمی (بیلیون دلار)	خدمات (%)	صنعت (%)	کشاورزی (%)
آمریکا	۲۵۴۶۰	۸۰	۱۹/۱	۰/۹
چین	۱۷۹۶۰	۵۱/۶	۴۰/۵	۷/۹
آلمان	۴۰۷۰	۶۸/۶	۳۰/۷	۰/۷
ژاپن	۴۲۳۰	۶۸/۷	-	۱/۱
هند	۳۳۸۰	۶۱/۵	۳۰/۲	۱۵/۴
بریتانیا	۳۰۷۰	۷۹/۲	۲۳/۱	۰/۷
فرانسه	۷۸۸۰	۷۸/۸	۱۹/۱	۱/۷
برزیل	۱۹۲۰	۷۲/۷	۲۰/۷	۶/۶
ایتالیا	۲۰۱۰	۷۳/۹	۲۴	۲/۱
کانادا	۲۱۴۰	۷۰/۲	۲۸/۲	۱/۶
کره جنوبی	۱۶۷۰	۵۸/۳	۳۹/۵	۲/۲
ترکیه	۹۰۶	۶۰/۷	۳۲/۵	۶/۸
ایران	۳۸۸	۵۵	۳۵	۱۰

هر چند بخش کشاورزی سهمی ۱ تا ۲ درصدی در GDP کشورهای گروه ۷ دارد اما انتظار می‌رود نقش عمده‌ای در اقتصاد کلان ایران در دهه‌های پیش رو داشته باشد. همچنین فرصت‌های زیادی برای کاهش انتشار GHG در این بخش هست و توسعه کم کربن کشور بدون کاهش معادل کربن در این بخش نشدنی است. در این پروژه سیاست‌ها و راهبردهای کاهشی کشورهای دیگر بررسی شده سپس راهبردها و سیاست‌های کاهشی کارآمد گوناگونی برای کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای در بخش کشاورزی ایران پیشنهاد شده‌اند.

۱-۴ سیاست‌ها و راهبردهای کاهشی کشورهای مورد بررسی

در این بخش سیاست‌ها و راهبردهای پیشنهادی پنج کشور هند، مکزیک، ترکیه، پاکستان، مصر و ایران براساس گزارش‌های ملی ارائه شده این کشورها به کنوانسیون چارچوب سازمان ملل متحد درباره تغییر اقلیم (UNFCCC) گردآوری و ارائه شده است. همچنین میزان انتشار GHG این کشورها در سال‌های ۲۰۰۵ و ۲۰۲۳ به شرح زیر می‌باشد [۸]:

- کشور هند از ۲۱۲۰ میلیون تن در سال ۲۰۰۵ تا ۴۱۳۳ میلیون تن معادل دی‌اکسیدکربن در سال ۲۰۲۳،
- کشور مکزیک از ۶۲۴ میلیون تن در سال ۲۰۰۵ تا ۷۱۲ میلیون تن معادل دی‌اکسیدکربن در سال ۲۰۲۳،
- کشور ترکیه از ۳۲۸ میلیون تن در سال ۲۰۰۵ تا ۶۰۶ میلیون تن معادل دی‌اکسیدکربن در سال ۲۰۲۳،
- کشور پاکستان از ۳۲۸ میلیون تن در سال ۲۰۰۵ تا ۵۳۲ میلیون تن معادل دی‌اکسیدکربن در سال ۲۰۲۳،
- کشور مصر از ۲۵۶ میلیون تن در سال ۲۰۰۵ تا ۳۳۶ میلیون تن معادل دی‌اکسیدکربن در سال ۲۰۲۳،
- کشور ایران از ۶۵۱ میلیون تن در سال ۲۰۰۵ تا ۹۹۷ میلیون تن معادل دی‌اکسیدکربن در سال ۲۰۲۳.

۱-۱-۴ هند

از آنجا که انتشار گازهای گلخانه‌ای بخش کشاورزی در هند به‌عنوان «انتشار بقا»^۱ شناخته می‌شود و برای تأمین امنیت غذایی و تغذیه‌ای حیاتی است، در بیانیه داوطلبانه هند، فعالیت‌های کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای بخش کشاورزی لحاظ نشده است. با این حال، هند اقدامات متعددی را برای بهبود بهره‌وری انرژی و توسعه کم‌کربن در بخش کشاورزی آغاز کرده است که شامل موارد زیر می‌باشد [۲۹۴]:

مدیریت تقاضای کشاورزی (AgDSM):

به‌دلیل افزایش مکانیزاسیون در بخش کشاورزی هند، تقاضا برای انرژی رو به رشد است. مدیریت تقاضای کشاورزی یکی از ابتکارات هند برای بهینه‌سازی مصرف انرژی در بخش کشاورزی است. با وجود عدم تعهد رسمی هند در بخش کشاورزی به UNFCCC، این کشور برنامه AgDSM را برای جایگزینی پمپ‌های کم‌بازده با پمپ‌های پربازده اجرا کرده است. این اقدام منجر به صرفه‌جویی قابل‌توجه در مصرف انرژی و کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای شده که همراه با

^۱ . Survival emission

^۱ . Agriculture Demand Side Management

برنامه‌های آموزشی برای کشاورزان اجرا می‌شود. در قالب برنامه AgDSM، جایگزینی کامل ۲/۱ میلیون پمپ کشاورزی ناکارآمد پیش‌بینی شده است و تا تاریخ ۳۱ مارس ۲۰۲۲، تعداد حدود ۸۰ هزار پمپ کشاورزی کارآمد نصب شده‌اند که منجر به صرفه‌جویی انرژی به میزان ۶/۶ گیگاوات ساعت و کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای به میزان حدود پنج هزار تن معادل دی‌اکسیدکربن شده است.

مأموریت ملی کشاورزی پایدار (NMSA):

مأموریت ملی کشاورزی پایدار ابتکار دولت هند برای تبدیل کشاورزی به سیستمی پایدار از نظر زیست محیطی و تاب‌آور در برابر تغییرات اقلیمی است. این مأموریت با هدف افزایش راندمان کاربرد آب، به‌ویژه در مناطق دیم، از طریق اقدامات زیر می‌باشد:

- توسعه دیم‌زارها: توسعه مناطق دیم در قالب مأموریت ملی کشاورزی پایدار، با ترویج سیستم‌های کشاورزی یکپارچه، به افزایش بهره‌وری و کاهش ریسک‌های ناشی از تغییرات اقلیمی کمک می‌کند. این برنامه با ترکیب کشاورزی، دامداری و فعالیت‌های جانبی، فرصت‌های درآمدی متنوعی برای کشاورزان ایجاد می‌کند.
- طرح فرعی دارکشتورزی: این طرح از سال ۲۰۱۶ برای افزایش کاشت درختان همراه با محصولات کشاورزی به منظور بهبود درآمد و معیشت کشاورزان خرده‌پا اجرا شده است. این برنامه همچنین با هدف حفظ و تثبیت اکوسیستم‌ها و افزایش تاب‌آوری کشاورزی در برابر تغییرات اقلیمی و افزایش پوشش درختی در مناطق آسیب‌پذیر فعالیت می‌کند.
- طرح ملی بامبو: این طرح که در سال ۲۰۱۸ بازسازی و راه‌اندازی مجدد شد، با هدف توسعه و ایجاد زنجیره کامل ارزش در بخش بامبو برای اتصال تولیدکنندگان به مصرف‌کنندگان اجرا می‌شود. این طرح شامل توسعه نهال‌کاری، ایجاد امکانات جمع‌آوری، فرآوری، بازاریابی، تقویت کسب‌وکارهای کوچک و متوسط، آموزش مهارت‌ها و برندینگ است و هدف آن افزایش سطح زیر کشت بامبو در زمین‌های دولتی و خصوصی غیر جنگلی برای افزایش درآمد کشاورزان و ارتقای پوشش سبز و ظرفیت جذب کربن است.

طرح Pradhan Mantri Krishi Sinchayee Yojana (PMKSY):

این طرح که از سال ۲۰۱۵-۲۰۱۶ آغاز شده، با هدف جایگزینی روش‌های سنتی آبیاری غرقابی با سیستم‌های آبیاری میکرو انجام می‌شود که مصرف برق برای پمپاژ آب را کاهش داده و کارایی مصرف آب را بهبود می‌بخشد.

طرح فرعی مکانیزاسیون کشاورزی (SMAM):

این طرح با هدف مدیریت پسماندهای کشاورزی در محل و افزایش دسترسی کشاورزان خرد به ماشین‌آلات راه‌اندازی شد. این برنامه از طریق ایجاد مراکز اجاره‌ای تجهیزات کشاورزی، هزینه مالکیت ماشین‌آلات را کاهش داده و مکانیزاسیون را گسترش می‌دهد.

¹ . National Mission for Sustainable Agriculture

¹ . Sub-Mission on Agriculture Mechanization

کاهش مصرف انرژی و انتشار گازهای گلخانه‌ای در کشت برنج:

– برنامه تنوع کشت^۱ با توجه به مصرف بالای انرژی و نیاز شدید به آبیاری در کشت برنج، و در پی آن کاهش سطح آب‌های زیرزمینی در ایالت‌هایی مانند پنجاب، هاریانا و اوتار پرادش، برنامه‌ای برای تنوع‌بخشی کشت و جایگزینی برنج با سایر محصولات در نظر گرفته شده است. این برنامه با ترویج کشت جایگزین به‌ویژه حبوبات، علاوه بر بهبود حاصلخیزی خاک و کاهش انتشار متان، به مقابله با افت عملکرد، کاهش کیفیت خاک و گسترش آفات ناشی از تداوم کشت برنج کمک می‌کند.

– سیستم افزایش بهره‌وری برنج^۲ (SRI) با صرفه‌جویی قابل توجه در مصرف بذر، آب و هزینه‌ها، عملکرد برنج را افزایش داده و انتشار گاز متان را کاهش می‌دهد. این روش در قالب برنامه ملی امنیت غذایی در ۱۹۳ منطقه از ۲۴ ایالت هند اجرا می‌شود تا بهره‌وری، درآمد کشاورزان و حاصلخیزی خاک را بهبود بخشد.

– کشت مستقیم برنج^۳ (DSR) یکی از روش‌های نوین کاشت این محصول است که با هدف حذف مراحل خزانه‌گیری، پادلینگ و نشاکاری انجام می‌شود. در سیستم DSR سطح مزرعه همواره در حالت اشباع نگه داشته می‌شود و از غرقاب کردن جلوگیری می‌گردد؛ این موضوع موجب می‌شود که در شرایط محدودیت منابع آبی، سطح قابل کشت افزایش و به دلیل چرخه‌های متناوب خشک و خیس شدن زمین، انتشار گاز متان به‌طور قابل توجهی کاهش پیدا می‌کند. همچنین میزان مصرف آب کمتر شده و در نتیجه صرفه‌جویی در مصرف انرژی نیز حاصل می‌شود.

ماموریت توسعه یکپارچه باغبانی (MIDH):

این ماموریت با هدف رشد هماهنگ بخش باغبانی و ایجاد زنجیره‌های تولید و بازاریابی در ۳۸۴ شهرستان هند اجرا شده است. این برنامه با افزایش سطح زیرکشت و مدیریت پس از برداشت، به جذب قابل توجه کربن و بهبود پایداری محیط‌زیستی کمک کرده است.

استفاده از انرژی خورشیدی در کشاورزی:

این طرح از سال ۲۰۱۹ در هند اجرا شده است و هدف آن کاهش وابستگی کشاورزی به سوخت دیزل و افزایش درآمد کشاورزان از طریق تأمین امنیت انرژی و آب است. این برنامه سه بخش اصلی دارد که شامل راه‌اندازی نیروگاه‌های خورشیدی یا تجدیدپذیر به ظرفیت ۱۰ گیگاوات روی زمین‌های بایر و رها شده با هدف فروش برق به شبکه، نصب ۲ میلیون پمپ خورشیدی مستقل تا ۷/۵ اسب‌بخار برای کشاورزان، استفاده از انرژی خورشیدی برای ۱/۵ میلیون پمپ کشاورزی متصل به شبکه که به کشاورزان اجازه می‌دهد برق تولیدی را برای آبیاری استفاده و مازاد آن را به شبکه بفروشند. این طرح همچنین استفاده از سلول‌های خورشیدی ساخت داخل را الزامی کرده و چند ایالت هند پروژه‌های آزمایشی موفق‌تری پیش از اجرای این طرح انجام داده‌اند.

¹ . Crop diversification programme

¹ . System of Rice Intensification

¹ . Direct Seeded Rice Cultivation

² Mission for Integrated Development of Horticulture

۲-۱-۴ مکزیک

در دو دهه اخیر، بخش کشاورزی مکزیک جایگاه اقتصادی خود را از دست داده و جای خود را به بخش‌های صنعت و خدمات داده است. با این حال، ذرت همچنان یکی از اصلی‌ترین محصولات کشاورزی مکزیک است، زیرا نقش مهمی در تأمین امنیت غذایی دارد؛ هرچند تولید آن به شدت تحت تأثیر تغییرات اقلیمی به‌ویژه خشکسالی قرار گرفته است. مطالعات میدانی و مشارکتی نشان داده‌اند که در اختیار قرار دادن پیش‌بینی‌های اقلیمی به‌موقع می‌تواند در افزایش تاب‌آوری کشاورزان برای مقابله با اثرات تغییر اقلیم مؤثر باشد. نتایج مدل‌سازی‌ها نیز نشان می‌دهد که استفاده از ارقام دیررس‌تر ذرت می‌تواند راهکار مؤثری برای سازگاری با شرایط جدید اقلیمی باشد و بهره‌برداری بهتری از فصل رشد طولانی‌تر فراهم کند. برای افزایش تاب‌آوری بخش کشاورزی راهکارهای دیگری نیز پیشنهاد شده‌اند از جمله آبیاری قطره‌ای برای مقابله با کم‌آبی، احداث گلخانه‌های کوچک برای کشت محصولات ارگانیک با ارزش اقتصادی بالا مانند گوجه‌فرنگی و فلفل، و تولید کمپوست خانگی برای استفاده در زمین‌های آزمایشی نیز می‌توانند بهره‌وری مزارع کوچک را افزایش داده و به پایداری بیشتر سیستم‌های کشاورزی کمک کنند [۲۹۵].

۳-۱-۴ ترکیه

سهم بخش کشاورزی در تولید ناخالص داخلی (GDP) ترکیه در سال ۱۹۶۰ برابر با ۵۴ درصد بود و در آن سال‌ها ترکیه به عنوان یک کشور بر پایه کشاورزی شناخته می‌شد. به تدریج سهم بخش کشاورزی در اقتصاد ترکیه کاهش یافت به‌طوری که در سال‌های ۲۰۰۰ به زیر ۱۰ درصد رسید و تا سال ۲۰۲۲، سهم بخش کشاورزی در تولید ناخالص داخلی ترکیه به حدود ۶ درصد کاهش یافته و انتظار می‌رود این روند کاهشی در سال‌های آینده نیز ادامه یابد. از آنجا که در زمان تصویب پروتکل کیوتو ترکیه هنوز عضو UNFCCC نبود، در ضمیمه B پروتکل نیز قرار نگرفت و بنابراین مشمول هیچ هدف کمی الزام‌آور برای کاهش یا محدودسازی انتشار گازهای گلخانه‌ای نشد. ترکیه در اکتبر ۲۰۱۵، سهمیه مشارکت تعیین‌شده ملی خود (INDC) را به دبیرخانه UNFCCC ارائه داد. در این سند ترکیه متعهد شد که تا سقف ۲۱ درصد از میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای در سناریوی ادامه وضع موجود (Business as Usual-BAU) تا سال ۲۰۳۰ بکاهد. دوره اجرایی این تعهد از سال ۲۰۲۰ تا ۲۰۳۰ تعیین شده است. در جدول ۱۹ مقایسه‌ای میان سناریوهای پایه^۱ (WoM)، کاهش انتشار و میزان واقعی انتشار در سال ۲۰۲۰ ارائه شده است. سناریوی کاهش انتشار^۲ (WM) شامل برآورد انتشار گازهای گلخانه‌ای در بازه زمانی ۲۰۱۲ تا ۲۰۳۰ است که براساس سیاست‌ها و اقدامات کاهشی پیش‌بینی‌شده در نخستین مشارکت تعیین‌شده ملی (NDC) ترکیه تدوین شده‌اند. همان‌طور که دیده می‌شود میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای بخش کشاورزی ترکیه در دو سناریو پایه و کاهش انتشار در سال ۲۰۲۰ (میزان ۵۱/۵۶ میلیون تن معادل دی‌اکسیدکربن) و ۲۰۳۰ (میزان ۵۹/۲۸ میلیون تن معادل دی‌اکسیدکربن) تغییری نکرده است. میزان واقعی انتشار گازهای گلخانه‌ای ترکیه در سال ۲۰۲۰ حدود ۷۳/۱۶ میلیون تن معادل دی‌اکسیدکربن گزارش شده است که حدود ۴۲ درصد بیشتر از سناریوی کاهش انتشار می‌باشد درحالی که میزان انتشار واقعی ثبت شده بخش‌های دیگر اقتصاد نسبت به سناریو کاهش انتشار حدود ۲۰ تا ۳۰ درصد کمتر می‌باشد. همه‌گیری ویروس کرونا و وضعیت اقتصادی در سال‌های اخیر تأثیر چشم‌گیری بر کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای گذاشته‌اند. شکل ۱۴ نشان می‌دهد که بین سال‌های ۲۰۱۷ تا ۲۰۱۹، انتشار گازهای گلخانه‌ای ترکیه کاهش یافته است. اگرچه انتشار کل

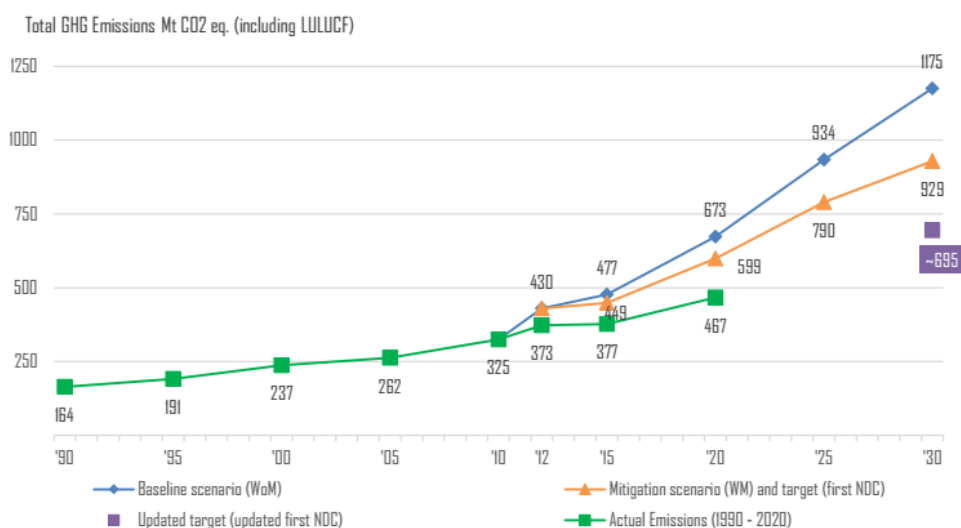
^۲ . Without Measures Scenariorh

^۲ . With Measures Scenariorh

گازهای گلخانه‌ای در فاصله سال‌های ۲۰۱۹ تا ۲۰۲۰ افزایش یافته اما این افزایش محدود بوده است. به‌عنوان مثال، به‌دلیل محدودیت‌های سفر و قرنطینه‌های ناشی از کرونا، انتشار گازهای گلخانه‌ای در بخش حمل‌ونقل کاهش داشته است. بخش بزرگی از کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای در ترکیه در سال ۲۰۲۰ نه به دلیل اجرای سیاست‌های اقلیمی مؤثر، بلکه به‌دلیل شرایط غیرعادی ناشی از همه‌گیری کرونا و رکود اقتصادی بوده است. این مسئله نشان می‌دهد که برای دستیابی پایدار به کاهش انتشار، نیاز به تحول ساختاری و سیاست‌گذاری فعال اقلیمی وجود دارد [۲۹۶].

جدول ۱۹- مقایسه سناریوی پایه، سناریوی کاهش انتشار و میزان واقعی انتشار گازهای گلخانه‌ای ترکیه (میلیون تن معادل دی‌اکسیدکربن) [۲۹۶]

سال	۲۰۲۰			۲۰۳۰		
بخش	سناریو پایه (WoM)	سناریو کاهش انتشار (WM)	میزان واقعی انتشار	اختلاف سناریو (WoM) و (WM) (%)	سناریو پایه (WoM)	سناریو کاهش انتشار (WM)
انرژی (شامل ترابری)	۵۳۸/۸۹	۴۹۹/۳۴	۳۶۷/۵۸	-۲۶	۹۴۳/۵۵	۷۳۸/۲۷
ترابری	۱۰۱/۱۹	۱۰۱/۱۱	۸۰/۶۸	-۲۰	۱۳۶/۵۱	۱۳۵/۹۹
فرآیندهای صنعتی (IPPU)	۹۴/۷۵	۹۴/۷۹	۶۶/۷۶	-۳۰	۱۶۹/۷۵	۱۶۹/۷۵
کشاورزی	۵۱/۵۶	۵۱/۵۶	۷۳/۱۶	۴۲	۵۹/۲۸	۵۹/۲۸
جنگلداری/LULUCF	-۴۰/۱۹	-۷۰/۰۴	-۵۶/۹۵	-۱۹	-۳۸/۷۰	-۶۹/۷۱
مدیریت پسماند	۲۷/۹۰	۲۳/۶۱	۱۶/۴۰	-۳۱	۴۰/۹۰	۳۱/۴۰



شکل ۱۴- برآورد میزان انتشار کل گازهای گلخانه‌ای ترکیه در دو سناریو پایه و کاهش انتشار با لحاظ LULUCF (میلیون تن دی‌اکسیدکربن معادل) [۲۹۶]

در چارچوب سیاست‌های کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای در بخش کشاورزی، ترکیه مجموعه‌ای از اقدامات و مقررات را به شرح زیر تدوین و اجرا کرده است [۲۹۶]:

– کنترل مصرف کودهای نیتراتی:

یکی از مهم‌ترین اقدامات تصویب آیین‌نامه‌ای با عنوان «حفاظت از منابع آبی در برابر آلودگی ناشی از نیترات‌های بخش کشاورزی»^۲ است که با هدف مدیریت پایدار مصرف کودهای نیتراتی اجرا شده است. این آیین‌نامه شامل راه‌اندازی سامانه پایش اطلاعات نیترات، شناسایی مناطق آسیب‌پذیر به نیترات و تهیه برنامه‌های اقدام در این مناطق است. انتظار می‌رود اجرای این سیاست ضمن کاهش مصرف نیترات در بخش کشاورزی، سهم مؤثری در کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای این بخش در ترکیه ایفا کند.

– مصرف کود براساس آنالیز:

ترکیه از طریق مجموعه‌ای از سیاست‌ها و برنامه‌ها، مصرف بهینه کودهای شیمیایی را با هدف کاهش انتشار گاز اکسیدنیتروز در بخش کشاورزی دنبال می‌کند. آیین‌نامه کنترل کود شیمیایی^۴، نظارت بر تولید، واردات و مصرف کودها را در چارچوب استانداردهای فنی تسهیل می‌کند. در قالب برنامه گسترش مصرف کود براساس آنالیز^۵، حمایت مالی برای آزمایش‌های خاک و دریافت مشاوره فنی در اختیار کشاورزان قرار می‌گیرد. همچنین، در برنامه کنترل مصرف کود^۶، راهنمایی‌های تخصصی در خصوص نوع، میزان و زمان مصرف کود ارائه شده و آموزش‌های تخصصی برای مهندسان کشاورزی اجرا شده است. علاوه بر این، پژوهش‌هایی برای توسعه کودهای کنترل‌شده و استفاده از کودهای آلی انجام گرفته که همگی در جهت کاهش مصرف بی‌رویه کود شیمیایی، حفظ حاصلخیزی خاک و کاهش آلودگی محیط‌زیست مؤثر بوده‌اند.

– یکپارچه‌سازی اراضی:

ترکیه در چارچوب قانون حفاظت از خاک و کاربری اراضی^۷، از تقسیم اراضی کشاورزی به قطعات کوچک جلوگیری می‌کند تا بهره‌وری زمین، آب، انرژی و کود افزایش و انتشار گازهای گلخانه‌ای کاهش یابد. این اقدام باعث بهبود روش‌های آبیاری، کاهش استفاده از ماشین‌آلات و صرفه‌جویی در سوخت می‌شود. مطالعات نشان داده‌اند که یکپارچه‌سازی اراضی، مسافت روزانه رفت‌وآمد کشاورزان را به‌طور متوسط ۲۶ کیلومتر کاهش داده و به کاهش انتشار CO₂ و N₂O کمک می‌کند. تا اوایل ۲۰۲۲، بیش از ۶ میلیون هکتار از ۸/۵ میلیون هکتار هدف‌گذاری شده، تحت این طرح قرار گرفته است.

– برنامه محیط زیستی ÇATAK:

یکی از مهم‌ترین نمونه‌های برنامه‌های کشاورزی-محیط‌زیستی در ترکیه، برنامه حفاظت از اراضی کشاورزی بر پایه معیارهای زیست‌محیطی ÇATAK^۸ است. این برنامه با هدف بهبود کیفیت خاک و آب، حفظ منابع طبیعی تجدیدپذیر، مقابله با فرسایش، کاهش اثرات منفی کشاورزی، ترویج کشاورزی با حداقل خاک‌ورزی، و استفاده بهینه از آب و انرژی اجرا می‌شود. از جمله اهداف آن افزایش آگاهی کشاورزان در زمینه محیط‌زیست، و نیز کاهش هزینه‌های تولید برای ارتقای درآمد آن‌هاست و انتظار می‌رود با کاهش انتشار گازهای CH₄ و CO₂، در مقابله با اثرات تغییر اقلیم

^۲ . By-Law on Protection of Waters Against Pollution Caused by Nitrates from Agricultural Sources

^۳ . By-Law on Chemical Fertilizer Control

^۴ . Programme of Extending Analysis Based Fertilizer Use

^۵ . Fertilizer Usage Control Programme

^۶ . Soil Conservation and Land Use and Changes

^۷ . Environmentally Based Agricultural Land Protection Programme

مؤثر باشد. تا سال ۲۰۱۹، این برنامه در ۵۸ استان اجرا شده و به حدود ۱۹۰ هزار کشاورز در سطح ۷۲۱ هزار هکتار، مجموعاً بیش از ۷۳۴ میلیون لیر ترکیه حمایت مالی پرداخت شده است.

– استفاده پایدار از پسماندهای کشاورزی:

ترکیه برای حرکت به سوی رشد سبز، از پسماندهای کشاورزی به‌ویژه کود دامی به‌عنوان منبع زیست‌توده در نیروگاه‌ها استفاده می‌کند که این اقدام به کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای در بخش کشاورزی کمک کرده است.

– کاهش انتشار از دامداری‌ها:

فعالیت‌های مرتبط با قوانین مراتع، پرورش دام، خدمات دامپزشکی، سلامت گیاهان، غذا و خوراک دام، و ایجاد مناطق صنعتی تخصصی کشاورزی به طور مستقیم به کاهش انتشار گاز متان در بخش دام‌پروری کمک می‌کنند.

– برنامه حمایت از سرمایه‌گذاری‌های توسعه روستایی:

این برنامه در ۸۱ شهر ترکیه با هدف کاهش استفاده بی‌رویه از آب، انرژی و کود در کشاورزی اجرا می‌شود و با ترویج استفاده از ماشین‌آلات و تجهیزات نوین آبیاری، به حفظ کیفیت و کمیت منابع خاک و آب، افزایش بهره‌وری تولید و کاهش نیاز به نیروی کار کمک می‌کند. همچنین از سال ۲۰۱۳ با استفاده گسترده از روش‌های آبیاری مدرن در حدود ۷۵۰ هزار هکتار از اراضی، بهره‌وری افزایش یافته و اثرات منفی آبیاری‌های بی‌رویه کاهش یافته است. استفاده از انرژی خورشیدی برای سیستم‌های آبیاری کشاورزی نیز در حال توسعه است که با وجود هزینه اولیه بالاتر، هزینه‌های عملیاتی و سوخت را به طور چشمگیری کاهش می‌دهد.

۴-۱-۴ پاکستان

کشاورزی ستون فقرات اقتصاد پاکستان است که ۱۹/۵٪ از تولید ناخالص داخلی را تشکیل می‌دهد، ۴۲/۳٪ نیروی کار را به کار گرفته و مواد خام لازم برای چندین بخش دارای ارزش افزوده را فراهم می‌کند. برای کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای در بخش کشاورزی پاکستان، چندین راهکار اولویت‌بندی شده‌اند که از نظر پتانسیل کاهش انتشار، منافع توسعه پایدار و هزینه اجرا بررسی شده‌اند. بهبود مدیریت آبیاری و منابع آب، مدیریت مصرف آب در کشت برنج با استفاده از ارقام کم‌آب‌بر، و اجرای دارکشت‌ورزی از مهم‌ترین اقدامات با پتانسیل بالای کاهش انتشار و هزینه معقول هستند که در اسناد استراتژیک مختلف نیز تأکید شده‌اند. علاوه بر این، استفاده از کود سبز، بهبود مدیریت کود دامی و محدود کردن سوزاندن بقایای کشاورزی نیز به عنوان راهکارهای مؤثر با هزینه پایین‌تر و منافع زیست‌محیطی قابل توجه شناخته شده‌اند [۲۹۷].

در مقابل، برخی گزینه‌ها مانند استفاده از مخلوط خوراک و افزودنی‌های خاص برای کاهش متان در دام‌ها، مصرف بهینه‌تر کودهای شیمیایی و معرفی محصولات اصلاح ژنتیکی شده، پتانسیل خوبی دارند اما به دلیل نیاز به تحقیقات بیشتر، عدم قطعیت در میزان اثرگذاری و هزینه‌های بالای اجرای اولیه، فعلاً در اولویت‌های تحقیقاتی قرار دارند و نیازمند توسعه و ارزیابی بیشتر قبل از پیاده‌سازی گسترده هستند. این رویکرد امکان می‌دهد تا ضمن بهره‌گیری از راهکارهای مؤثر و قابل اجرا در کوتاه‌مدت، زمینه برای اقدامات نوآورانه و بلندمدت نیز فراهم شود [۲۹۷].

بخش کشاورزی در مصر، منبع عمده‌ای از انتشار گازهای گلخانه‌ای است و حدود ۱۶ درصد از کل این انتشارها را تشکیل می‌دهد و منبع معیشت برای بیش از یک‌سوم نیروی کار کشور است. با ادامه روند افزایش تقاضا برای غذا و خوراک دام، انتظار می‌رود زمین‌های طبیعی و تالاب‌ها به اراضی کشاورزی تبدیل شوند که موجب تشدید انتشار گازهای گلخانه‌ای خواهد شد. در حال حاضر، بسیاری از شیوه‌های کشاورزی رایج در مصر ناپایدار و همراه با انتشار بالای گازهای گلخانه‌ای هستند. سازمان خواربار و کشاورزی ملل متحد پیشنهاد می‌دهد که کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای در این بخش، بیش از آنکه مبتنی بر کاهش مطلق باشد، باید بر بهبود بهره‌وری و کارایی متمرکز شود. راهکارهای پیشنهادی کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای در بخش کشاورزی مصر شامل موارد زیر می‌باشد [۲۹۸]:

- کاهش انتشار گاز متان ناشی از شالیزارها: از طریق کاهش سطح زیر کشت برنج، استفاده از ارقام زودرس، توسعه ارقام مقاوم به خشکی، اعمال آبیاری نوبتی به جای غرقاب دائمی، توسعه ارقام مقاوم به خشکی، تولید برنج به صورت هوازی (بدون غرقاب دائم)، توسعه ارقام پرمحصول متناسب با شرایط مختلف اقلیمی برنج، استفاده از تناوب زراعی خشک و خشکه‌کاری، بهبود روش‌های آبیاری و کاهش اتلاف و هدررفت منابع آبی.
- کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای ناشی از مصرف کود: کاهش مصرف و به‌کارگیری هدفمند کودهای شیمیایی از طریق مدیریت بهینه تغذیه گیاهی، موجب کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای به‌ویژه اکسیدنیتروز می‌شود.
- توسعه مدیریت پسماندهای کشاورزی به منظور کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای: یکی از راهکارهای پیشنهادی برای کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای در بخش کشاورزی، استفاده از روش ورمی‌کمپوست است. این روش با بهره‌گیری از کرم‌های خاکی برای تبدیل پسماندهای آلی به کود، موجب کاهش تجزیه بی‌هوازی مواد آلی و در نتیجه کاهش انتشار گازهایی مانند متان و اکسیدنیتروز می‌شود. ورمی‌کمپوست به عنوان یک تکنیک پایدار و دوستدار محیط زیست، می‌تواند نقش مؤثری در مدیریت پسماند و کاهش آلاینده‌های جوی ایفا کند.
- تالاب‌ها و مزارع پرورش ماهی: توسعه شیلات و آبی‌پروری باید همراه با ملاحظات زیست‌محیطی و اقلیمی صورت گیرد تا پایداری منابع و کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای تضمین شود.
- زیست انرژی: استفاده از منابع زیستی برای تولید انرژی یکی از راهکارهای مؤثر برای کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای در بخش کشاورزی است. مهم‌ترین فرصت‌های کاهش انتشار در حوزه زیست‌انرژی شامل تولید بیوگاز، تولید برق، تولید اتانول و تولید بیوپچار است. این اقدامات در کنار هم می‌توانند نقش مهمی در گذار به کشاورزی کم‌کربن و پایدار ایفا کنند.
- کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای در تولیدات دامی: این کار از طریق بهبود تغذیه، استفاده از فناوری‌های نوین در خوراک‌دهی، اصلاح نژاد و مدیریت مناسب فضولات دامی امکان‌پذیر است.
- دارکشت‌ورزی: این روش با جذب کربن و ذخیره آن در اعماق خاک، ضمن کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای باعث افزایش تنوع زیستی و بهبود کیفیت خاک می‌شود.

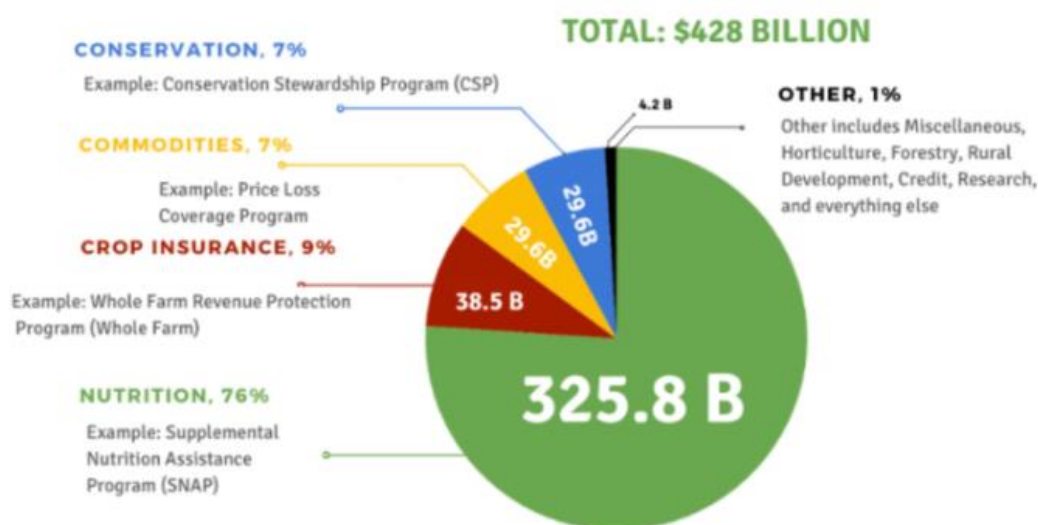
- **ترویج روش‌های بهبود پس‌از برداشت و کاهش ضایعات غذایی:** بهبود فرآیندهای پس‌از برداشت و افزایش ارزش افزوده محصولات، همچنین مدیریت بهتر ضایعات غذایی برای کاهش هدررفت و حفظ منابع ضروری است.
- **سیستم‌های کشاورزی کم‌انتشار:** این سیستم‌ها شامل کشاورزی اکولوژیک، کشاورزی ارگانیک، کشاورزی حفاظتی و مدیریت یکپارچه زراعی است که با هدف کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای و حفظ پایداری محیط‌زیست انجام می‌شوند.

۲-۴ سیاست‌ها و راهبردهای کاهش‌ی آمریکا

در همسنگی با این کشورها، آمریکا با تصویب و اجرای قانون‌های کاهش‌ی ارزنده، توانسته است میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای را (از جمله در بخش کشاورزی) از ۷۱۲۳ میلیون تن در سال ۲۰۰۵ به ۵۹۶۱ میلیون تن در سال ۲۰۲۳ برساند. دو سیاست عمده‌ای که برای این کاهش و کاهش‌های بیشتر در سال‌های پیش رو اندیشیده و به کار گرفته شده‌اند عبارتند از:

۱-۲-۴ لایحه مزرعه (Farm Bill)

یکی از قانون‌هایی که با هدف حمایت از تولید فرآورده‌های کشاورزی، کاهش فرسایش خاک، بیمه محصولات کشاورزی، توسعه کاربرد انرژی‌های تجدیدپذیر و کاهش گازهای گلخانه‌ای در بخش کشاورزی ایالات متحده تصویب شده است، «لایحه مزرعه» (Farm Bill) نام دارد [۲۹۹] که هر ۵ یا ۶ سال با بودجه افزایشی تمدید می‌گردد. آخرین قانون مزرعه از سپتامبر ۲۰۱۸ تا سپتامبر ۲۰۲۳ را می‌پوشاند. بودجه تصویب شده آن برای ۵ سال از ۲۰۱۸ تا ۲۰۲۳ بیش از ۴۲۸ میلیارد دلار بود (شکل ۱۵). لایحه مزرعه ۲۰۱۸ دارای دوازده بند است و بخش‌های زیر را پشتیبانی مالی می‌کند:



شکل ۱۵- اثرات هزینه‌ای مستقیم آخرین لایحه مزرعه در بازه زمانی ۲۰۱۹-۲۰۲۳

بند ۱: این بند، حمایت از قیمت و درآمد کشاورزانی را پوشش می‌دهد که به‌طور گسترده به تولید و تجارت محصولات فاسدشدنی مانند ذرت، سویا، گندم و برنج، و همچنین لبنیات و شکر می‌پردازند. این بند همچنین شامل کمک‌های مربوط به بلایای طبیعی در بخش کشاورزی نیز می‌شود.

بند ۲: این بند، برنامه‌هایی را پوشش می‌دهد که به کشاورزان کمک می‌کند تا راهبردهای حفظ منابع طبیعی را در مراتع و زمین‌های زراعی اجرا کنند. همچنین، پشتیبانی مالی از کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای شامل برنامه‌های کاهشی برای کشاورزان و برنامه‌های پژوهشی دانشگاه‌ها و سازمان‌های تحقیقاتی ذیل این بند انجام می‌شود.

بند ۳: برنامه‌های صادرات مواد غذایی و کمک غذایی بین‌المللی را پوشش می‌دهد.

بند ۴: این بند، برنامه کمک تغذیه تکمیلی (که پیش‌تر به عنوان کوپن غذا شناخته می‌شد) و همچنین انواع برنامه‌های تغذیه‌ای کوچک‌تر را برای کمک به آمریکایی‌های کم‌درآمد جهت تأمین غذای خانواده‌هایشان پوشش می‌دهد.

بند ۵: برنامه‌های وام فدرال را پوشش می‌دهد که برای کمک به کشاورزان برای دسترسی به اعتبار مالی (از طریق وام‌های مستقیم و همچنین ضمانت‌های وام) طراحی شده‌اند.

بند ۶: برنامه‌هایی را پوشش می‌دهد که به رشد اقتصادی روستایی از طریق رونق کسب و کار، مسکن و زیرساخت‌های روستایی کمک می‌کند.

بند ۷: پشتیبانی مالی از پژوهش، آموزش و ترویج کشاورزی در آزمایشگاه‌های فدرال و پژوهش‌های وابسته به دانشگاه‌های ایالتی تا آموزش برای نسل بعدی کشاورزان و دامداران.

بند ۸: این بند، برنامه‌های حفاظتی ویژه جنگل را پوشش می‌دهد و به کشاورزان و جوامع روستایی کمک می‌کند تا به عنوان پاسداران منابع جنگلی عمل کنند، که نتیجه آن افزایش پوشش گیاهی و کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای است.

بند ۹: شامل برنامه‌هایی است که رشد و فراوری محصولات را برای سوخت زیستی تشویق می‌کنند. به کشاورزان، دامداران و صاحبان مشاغل کمک می‌کنند تا سیستم‌های انرژی تجدیدپذیر را نصب کنند. همچنین از پژوهش‌های انرژی حمایت می‌کنند. این بند هم از کاهش گازهای گلخانه‌ای پشتیبانی مالی می‌کند.

بند ۱۰: این بند، بازار کشاورزان و برنامه‌های غذایی محلی، بودجه برای پژوهش‌ها و زیرساخت‌ها برای میوه‌ها، سبزیجات و سایر محصولات باغی، و برنامه‌های صدور گواهینامه و کشاورزی ارگانیک را پوشش می‌دهد.

بند ۱۱: این بند، بیمه محصولات کشاورزی را به کشاورزان ارائه می‌دهد تا از ضرر در عملکرد، درآمد محصول یا درآمد کل مزرعه محافظت کنند. همچنین، این بند به آژانس مدیریت ریسک وزارت کشاورزی ایالات متحده اختیار می‌دهد تا به تحقیق، توسعه و اصلاح سیاست‌های بیمه بپردازد.

بند ۱۲: این بند ترکیبی از بندهای یازده گانه است و همچنین شش حوزه حمایتی و ترویجی را شامل می‌شود که عبارتند از: کشاورزان و دامداران، گروه‌های آسیب‌پذیر اجتماعی در بخش کشاورزی آمریکا، ایمنی و توسعه نیروی کار در بخش کشاورزی و سلامت دام

کنگره قانون مزرعه کنونی را برای سال ۲۰۲۴ تمدید کرده است. برای بازه زمانی ۲۰۲۵ تا ۲۰۳۰ لایحه مزرعه دیگری با بودجه بیشتر پیشنهاد و تصویب خواهد شد.

۲-۲-۴ قانون کاهش تورم (Inflation Reduction Act)

هدف این قانون کاهش کسری بودجه و بهای داروها و سرمایه‌گذاری در انرژی‌های پاک است. این قانون در ۱۶ آگوست ۲۰۲۲ تصویب شده و در بندهای ۲۱۰۰۱ و ۲۱۰۰۲ آن ۲۰ میلیارد دلار برای توسعه راهبردهای کاهش‌ی جهت کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای سه گانه بخش کشاورزی به وزارت کشاورزی آمریکا- افزون بر بودجه سالانه - در بازه زمانی ۲۰۲۳-۲۰۲۶ پرداخت می‌شود [۳۰۰، ۳۰۱]. تبصره‌های دوم و سوم بند ۲۱۰۰۱ به وزیر کشاورزی آمریکا اختیار می‌دهد که مبالغ زیر را به توسعه راهبردهای کاهش گازهای گلخانه‌ای دی اکسید کربن، متان و نیتروژن اکسید در بخش کشاورزی اختصاص دهد [۳۰۰]:

(A)- برای سال‌های مالی ۲۰۲۳ تا ۲۰۲۶:

۱- مبلغ ۲۵۰ میلیون دلار برای سال مالی ۲۰۲۳

۲- مبلغ ۵۰۰ میلیون دلار برای سال مالی ۲۰۲۴

۳- مبلغ یک میلیارد دلار برای سال مالی ۲۰۲۵

۴- مبلغ یک میلیارد و ۵۰۰ میلیون دلار برای سال مالی ۲۰۲۶

(B)- ذیل تبصره H از بند XII قانون 10-3871 C مبالغ زیر برای جذب کربن و کاهش دی اکسید کربن، متان

و اکسید نیتروز در بخش کشاورزی اختصاص داده می‌شود:

۱- مبلغ ۱۰۰ میلیون دلار برای سال مالی ۲۰۲۳

۲- مبلغ ۲۰۰ میلیون دلار برای سال مالی ۲۰۲۴

۳- مبلغ ۵۰۰ میلیون دلار برای سال مالی ۲۰۲۵

۴- مبلغ ۶۰۰ میلیون دلار برای سال مالی ۲۰۲۶

(IV)- زیر تبصره I از قانون 10-3871 C به وزارت کشاورزی آمریکا اجازه داده می‌شود مبالغ زیر را صرف پروژه‌ها

و پژوهش‌های کاهش گازهای گلخانه‌ای در بخش کشاورزی کند:

۱- مبلغ ۲۵۰ میلیون دلار برای سال مالی ۲۰۲۳

۲- مبلغ ۸۰۰ میلیون دلار برای سال مالی ۲۰۲۴

۳- مبلغ یک میلیارد و ۵۰۰ میلیون دلار برای سال مالی ۲۰۲۵

۴- مبلغ ۲ میلیارد و ۴۰۰ میلیون دلار برای سال مالی ۲۰۲۶

در بند ۲۱۰۰۲ نیز مبالغی برای کاهش گازهای گلخانه‌ای در بخش کشاورزی آمریکا در قالب قانون کاهش تورم به وزارت کشاورزی اختصاص داده شده است [۳۰۱].

با بررسی سیاست‌ها و راهبردهای کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای در شش کشور منتخب شامل هند، مکزیک، ترکیه، پاکستان، مصر و ایالات متحده آمریکا، می‌توان نتیجه گرفت که بسیاری از این سیاست‌ها با شرایط اقلیمی، اقتصادی و ساختار بخش کشاورزی ایران همخوانی نداشته و قابلیت اجرا یا اثربخشی لازم را در کشور ندارند. برای مثال، راهبرد توسعه اراضی دیم در هند، به دلیل محدودیت منابع آبی و الگوی بارندگی در ایران، عملاً قابل اجرا نیست. در حال حاضر، اراضی دیم در ایران تنها حدود ۱۰ درصد از کل تولیدات کشاورزی را شامل می‌شوند و ۹۰ درصد تولیدات مربوط به اراضی آبی (فاریاب) است. همچنین، طرح ملی بامبو که در هند در حال اجراست، به دلیل فقدان شرایط اکولوژیک مناسب در ایران، قابلیت پیاده‌سازی ندارد.

از سوی دیگر، با توجه به مساحت محدود شالیزارهای کشور در مقایسه با هند، پاکستان، مصر و سایر کشورهای جنوب شرق آسیا، و سهم اندک انتشار گازهای گلخانه‌ای از این اراضی در ایران، اجرای سیاست‌های کاهش انتشار در این حوزه تأثیر قابل توجهی بر کل انتشار گازهای گلخانه‌ای کشور نخواهد داشت.

در مکزیک نیز بخش کشاورزی سهم محدودی در تولید ناخالص داخلی دارد و محصول غالب آن ذرت است؛ محصولی که سطح زیرکشت آن در ایران قابل توجه نیست. در ترکیه نیز ارزیابی‌ها نشان می‌دهد که به‌رغم اجرای برخی سیاست‌های کاهشی در بخش کشاورزی، اثربخشی این سیاست‌ها چشمگیر نبوده است.

با توجه به شرایط خاص ایران، لازم است سیاست‌ها و راهبردهایی انتخاب و طراحی شوند که متناسب با ظرفیت‌ها، منابع، و اولویت‌های بومی کشور باشند. در بخش‌های بعدی، به بررسی این سیاست‌ها و پیشنهادها قابل اجرا در ایران خواهیم پرداخت.

۳-۴ سیاست‌های پیشنهادی برای کاهش گازهای گلخانه‌ای

بخش کشاورزی ایران با سهم قابل توجهی از انتشار گازهای گلخانه‌ای نقش مهمی در تغییرات اقلیمی دارد. فقدان مشوق‌های زیست‌محیطی، مدیریت ناکارآمد پسماند، و مصرف بی‌رویه نهاده‌ها از جمله دلایل اصلی تداوم این روند هستند. مجموعه‌ای از سیاست‌های قابل اجرا برای کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای بخش کشاورزی ایران در چارچوب توسعه پایدار و افزایش تاب‌آوری اقلیمی به شرح زیر پیشنهاد می‌شود:

- (۱) طرحی از سوی اتاق بازرگانی، صنایع، معادن و کشاورزی ایران به مجلس ارائه شود تا مجلس آن را به صورت قانون تصویب کند و در آن پیشنهاد شود که درصدی از GDP کشور برای کاهش گازهای گلخانه‌ای در همه بخش‌های اقتصادی کشور اختصاص داده شود (مانند طرح کاهش تورم ایالات متحده آمریکا).
- (۲) طراحی یک برنامه ملی برای شناسایی، توانمندسازی و حمایت هدفمند از کشاورزانی که از شیوه‌های کشاورزی پایدار و کم‌کربن بهره می‌برند. این نظام می‌تواند شامل ارائه حمایت‌های مالی و فنی و آموزشی به کشاورزانی باشد که اقداماتی نظیر خاک‌ورزی حفاظتی (خاک‌ورزی صفر)، استفاده از کودهای آلی، و بهره‌گیری از سامانه‌های آبیاری هوشمند را در مزرعه پیاده می‌کنند. این برنامه با هدف الگوسازی و گسترش تجرب موفق در سطح ملی اجرا شود.
- (۳) قوانین بازدارنده برای ممنوعیت سوزاندن بازمانده‌های گیاهی در مزارع وضع شود و همزمان تسهیلات و حمایت‌های لازم برای استفاده از بازمانده‌های گیاهی برای کمپوست‌سازی و تولید کود آلی، به‌ویژه در سطح روستاها و مزارع کوچک فراهم شود.
- (۴) الزام کشاورزان به انجام آزمون خاک و دریافت نسخه کودی علمی، شرط بهره‌مندی از یارانه‌های دولتی کود شیمیایی قرار گیرد تا از این طریق مصرف کود بهینه شود، انتشار گاز اکسید نیتروز کاهش یابد و بهره‌وری مصرف نهاده‌ها در سطح مزرعه افزایش یابد.
- (۵) بودجه دولتی برای تأمین و تجهیز ماشین‌آلات مورد نیاز کشاورزی حفاظتی از طریق تعاونی‌های مکانیزاسیون در سطح شهرستان‌ها و روستاها با هدف کاهش مصرف سوخت، حفظ ساختار خاک و کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای ناشی از عملیات خاک‌ورزی تخصیص یابد.
- (۶) یارانه و مشوق‌های مالی برای گسترش استفاده از فناوری‌های کم‌کربن و بهره‌ور در بخش کشاورزی، از جمله تجهیز چاه‌ها و ادوات کشاورزی به سامانه‌های انرژی تجدیدپذیر (مانند پنل‌های خورشیدی)، سیستم‌های هوشمند آبیاری، و ماشین‌آلات با مصرف سوخت بهینه، با هدف کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای و افزایش تاب‌آوری بخش کشاورزی تخصیص یابد.

۴-۴ راهبردهای کاهشی پیشنهادی برای کاهش گازهای گلخانه‌ای

افزون بر سیاست‌های کاهشی، راهبردهای کاهشی زیر در کشورهای گوناگون برای کاهش کربن در بخش کشاورزی پیشنهاد، آزموده و به کار گرفته شده‌اند:

۱-۴-۴ افزایش کارایی انرژی در بخش کشاورزی با به کارگیری منابع انرژی تجدیدپذیر

برآوردها نشان می‌دهد که انتشار گازهای گلخانه‌ای ناشی از استفاده از سوخت‌های فسیلی در بخش کشاورزی به ۱/۶ میلیارد تن CO₂ در سال ۲۰۲۰ رسید [۳۰۲]. همچنین، صرفه‌جویی در مصرف انرژی در بخش کشاورزی از طریق افزایش کارایی انرژی، با افزایش تقاضا برای انرژی در این بخش، ممکن است خنثی شود. پژوهش‌ها و بررسی‌ها در زمینه افزایش کارایی انرژی در بخش کشاورزی محدود بوده‌اند، اما می‌توان به استفاده از پمپ‌های آب جایگزین در هند به عنوان نمونه اشاره کرد [۳۰۲].

بیشتر انتشار گازهای گلخانه‌ای ناشی از استفاده از انرژی در بخش کشاورزی، مربوط به مصرف انرژی در سطح مزرعه (On-Farm Energy Use) برای تولید برق و گرما است. بیشترین کاهش این گازها نیز می‌تواند با استفاده از انرژی‌های خورشیدی و بادی در این بخش به دست آید. هرچند، کاهش گازهای گلخانه‌ای ناشی از مصرف دیزل در ماشین‌های سنگین کاشت، داشت و برداشت دشوار است و نیاز به جایگزینی دیزل با باتری‌ها و سلول‌های سوخت هیدروژنی دارد که از انرژی بادی و خورشیدی تأمین می‌شوند. با توجه به تفاوت‌های عمده در تولید کشاورزی بین ایران و کشورهای توسعه‌یافته، برخی از راهبردهای کاهش مصرف انرژی در ماشین‌های کشاورزی و پمپ‌های آب در سطح مزرعه که در کشورهای پیشرفته آزموده و به کار گرفته شده‌اند، در حال حاضر در ایران قابل اجرا نیستند. در این راستا، راهبردهای زیر برای کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای در این زمینه پیشنهاد می‌شود.

- به کارگیری پنل‌های خورشیدی برای تولید برق و گرما برای پمپ‌های آب و گلخانه‌ها در سطح مزرعه و همچنین در گاوداری‌ها و مرغداری‌ها

- کاربرد منابع تجدیدپذیر بادی، خورشیدی و هیدروژنی برای تولید کودهای نیتراتی که بسیار انرژی‌بر هستند این راهبرد می‌تواند تا ۸۵ درصد از انتشار گازهای گلخانه‌ای ناشی از کودهای نیتراتی را کم کند. خوشبختانه بخاطر نیاز دیگر بخش‌های اقتصاد، پژوهش گسترده‌ای درباره تولید هیدروژن از برق ناشی از انرژی خورشیدی انجام می‌گیرد و هزینه تولید نیز کاهش یافته است [۳۰۳].

- سازمان‌های پژوهشی و سرمایه‌گذاران بخش خصوصی باید از پروژه‌های تولید نیتروژن با استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر پشتیبانی مالی کنند. این پروژه‌ها بهتر است با پژوهش‌های تولید هیدروژن از انرژی‌های تجدیدپذیر ارتباط برقرار کنند.

- دولت باید قوانین مناسبی برای مدیریت انتشار گازهای گلخانه‌ای از کارخانه‌های تولید کود با استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر اجرا کند.

۴-۴-۲ کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای با افزایش کارایی کاربرد نیتروژن (NUE در زمین‌های کشاورزی)

کودهای شیمیایی و آلی باعث انتشار ۱/۶ گیگاتن معادل دی اکسید کربن در سال ۲۰۱۰ شد که تقریباً همه آن ناشی از ساخت، ترابری و کاربرد کودهای نیتراتی است. راهبرد کلیدی در کاهش انتشار اکسید نیتروز در زمین‌های کشاورزی پوشش‌دار کردن کودهای نیتراتی و کاربرد آن در اندازه کم اما در دفعات مکرر است نه مصرف زیاد و یکباره آن، زیرا که گیاهان کمتر از نیمی از نیتروژن به کار گرفته شده در زمینه‌ای کشاورزی را مصرف می‌کنند و باقیمانده آن باعث آلوده شدن آب‌های سطحی و زیرزمینی شده یا به صورت گاز -شامل اکسید نیتروز- به جو زمین وارد می‌شوند. ایران از کشورهایی است که کارایی کاربرد نیتروژن در آن کمتر از ۴۰٪ است [۳۰۲]. راهبردهای کاهشی زیر برای کاهش انتشار گازهای نیتروژنی به جو زمین پیشنهاد می‌گردد:

- واگذاری کارخانه‌های تولید کود شیمیایی به بخش خصوصی

- وادار کردن کارخانه‌های کودهای نیتروژنی به تولید کودهای نیتروژنی با NUE بالا مانند اوره با پوشش گوگردی و اوره با رهایش کند^۹ به جای اوره معمولی و تشویق کشاورزان به کاربرد آن‌ها. هند نمونه خوبی در این باره است که در سال ۲۰۱۵ سیاست کاهشی اوره^{۱۰} را برگزید. این سیاست ویژگی‌های زیر را دارد [۳۰۴]: (i) در حال حاضر ۳۲ واحد تولید اوره در این کشور وجود دارد که از این تعداد، ۳۰ واحد از گاز طبیعی به عنوان سوخت استفاده می‌کنند و دو واحد باقی‌مانده از نفتا به عنوان سوخت بهره می‌برند (ii). برنامه‌ریزی مواد اولیه (MRP) اوره توسط دولت هند در حال حاضر ۲۶۸ روپیه برای هر کیسه ۵۰ کیلوگرمی اوره است (iii). دولت هند به واحدهای تولید اوره یارانه می‌دهد تا هزینه‌های ثابت و متغیر (مانند هزینه کیسه، آب و برق برای ادامه سفارش‌های بیشتر) جبران شود (iv). به واحدهای تولید اوره، سقف مصرف انرژی هدف از ۵/۵ تا ۶/۵ گیگا کالری برتن داده شده و بر اساس آن پایش می‌شوند

- پشتیبانی از پژوهش‌هایی که درباره بازدارندگی زیستی نترات زایی^{۱۱} اجرا میشوند.

- پشتیبانی مالی از همکاری پژوهشگران و کشاورزانی که علاقه‌مند به کاربرد فناوری‌های نوآورانه در کودهای نیتراتی با NUE بالا هستند.

۳-۴-۴ گزینه‌های واقع‌گرایانه برای افزایش جذب کربن در خاک

راهبردهای کاهشی زیر برای نگه‌داشت کربن در خاک پیشنهاد می‌گردد:

- جلوگیری از تغییر کاربری اکوسیستم‌هایی با ذخیره کربن بالا، مانند جنگل‌ها که با جذب دی‌اکسید کربن به کاهش گازهای گلخانه‌ای کمک می‌کنند، و همچنین افزایش حاصلخیزی زمین‌های کشاورزی و چمنزارها که از طریق افزایش کربن در ریشه‌ها و بقایای گیاهی، موجب بهبود ظرفیت ذخیره‌سازی کربن در خاک می‌شوند:

به خاطر چالشی بودن کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای در بخش کشاورزی بیشترین پژوهش‌های دانشگاهی، سیاست‌ها و راهبردها به ذخیره کردن کربن در خاک‌های کشاورزی پرداخته‌اند. در این زمینه دو رویکرد در پیش گرفته شده‌اند: (۱) افزودن کربن به خاک، که به روش‌ها و فناوری‌های آن در بخش سوم پرداخته شد، (۲) جلوگیری از کم شدن کربن در خاک. بررسی پژوهش‌ها و تک‌نگاره‌های چاپ شده نشان از دشوار بودن ذخیره کربن در خاک دارد. [۳۰۸-۳۰۵]. برخی از کشت و کارهای کشاورزی مانند خاکورزی صفر (کاشت بذر بدون شخم‌زدن زمین) که گمان میرفت از هدر رفتن کربن خاک جلوگیری می‌کند اکنون روشن شده که کمکی به ذخیره کربن به ویژه در ژرفای پایین خاک نمی‌کند. همچنین کشاورزان هر چند سال یکبار خاک رویی را شخم زده و کربن ذخیره شده را آزاد می‌کنند [۳۰۵]. افزودن مالچ و کودهای جانوری به زمین‌های کشاورزی که راهبرد مدیریتی برای افزایش ذخیره کربن در خاک است باعث ذخیره کربن در جای دیگری از زیست‌بوم می‌گردد. گذاشتن بازمانده‌های گیاهی بر روی زمین به جای خوراک دام هرچند به ذخیره کربن خاک می‌افزاید اما دام‌ها برای خوراک نیاز به منبع دیگری از کربن دارند که از کشت زمین در جای دیگر تهیه می‌شود که خود باعث آزاد شدن آن به جو زمین می‌گردد. همچنین میکروب‌ها برای

⁹ . Slow-Released Urea

¹⁰ . New Urea Policy

¹¹ . Biological Nitrification Inhibition

درهم شکستن بازمانده‌های گیاهی و کمک به افزایش ذخیره کربن خاک نیاز به نیتروژن زیاد به عنوان خوراک دارند که بیشتر زمین‌ها به ویژه در جاهای خشک و نیمه خشک جهان آن را ندارند [۳۰۵]. دانشمندان دریافته‌اند هنوز دانش درخوری درباره سازوکارهای ذخیره کربن در خاک ندارند. نشانه‌هایی هست که زمین‌های کشاورزی به جای ذخیره کربن آن را با سازوکارهایی که هنوز نمی‌دانیم از دست می‌دهند.

– کوشش برای افزایش ذخیره کربن در جاهایی که باروری زمین‌های کشاورزی برای امنیت غذایی بسیار مهم است و افزایش دارکشتورزی^۳ که باعث افزایش مقدار کربن زمین می‌گردد. دارکشتورزی کاربرد همزمان درختان، درختچه‌ها و گیاهان کشاورزی است. در دارکشتورزی از درختان، درختچه‌ها و بوته‌ها در سامانه‌های کشاورزی بهره می‌گیرند یا اینکه در جنگل‌هایی که هدف تولید فراوان چوب نیست به کشاورزی و باغبانی می‌پردازند (شکل ۱۶). این تلفیق عمدی کشاورزی و جنگلداری دارای مزایای متعددی است، مانند افزایش عملکرد محصولات غذایی، افزایش درآمد کشاورزان، افزایش تنوع زیستی، بهبود ساختار و سلامت خاک، کاهش فرسایش خاک و جذب کربن. درختان می‌توانند چوب، میوه، دانه و سایر محصولات مفید و با ارزش اقتصادی تولید کنند. این شیوه به ویژه در مناطق گرمسیری رایج است اما به دلیل مزایای آن (به عنوان مثال چرخه مواد مغذی برای کاهش خشکسالی)، در ایالات متحده و اروپا نیز اجرا می‌شود. دارکشتورزی در مواردی با کشت درهم همانندی‌هایی دارد، اما می‌تواند جنگل‌های زراعتی چندلایه بسیار پیچیده‌تر شامل صدها گونه را نیز شامل شود.



شکل ۱۶- نمونه‌ای از اجرای دارکشتورزی

۴-۴-۴ به کارگیری شیوه‌های مدیریتی و گونه‌هایی از برنج که گازهای گلخانه‌ای کمتری در شالیزار منتشر می‌کنند

حدود ۱۰ درصد از انتشار گازهای گلخانه‌ای در بخش کشاورزی در جهان در سال ۲۰۱۰ ناشی از کاشت برنج در شالیزارها بود [۳۰۲]. بررسی و پژوهش نشان می‌دهد که راهبردهای کاهشی ارزنده‌ای برای کاهش انتشار گازهای

^۳Agroforestry

گلخانه‌ای در شالیزارها می‌توان به کار گرفت که کاهش مصرف آب و افزایش عملکرد در واحد سطح را نیز در پی داشته باشد. اما باید در نظر داشت که کل متان منتشر شده از شالیزارهای ایران حتی یک میلیون تن (کمتر از ۱ درصد) هم نیست. مؤسسه‌های پژوهشی مانند موسسه تحقیقات برنج باید به بهسازی ژنتیکی برنج و تولید واریته‌هایی که متان کمتری منتشر می‌کنند بپردازد (برخی از واریته‌های برنج متان کمتری تولید می‌کنند [۳۰۹-۳۱۰] ولی تاکنون پژوهشگران این واریته‌ها را در برنج‌های تجاری نیازموده‌اند)، هرچند در بیلان نهایی، تفاوت معناداری میان برنج‌هایی که گازهای گلخانه‌ای کمتری تولید می‌کنند و واریته‌های با تولید بالای گازهای گلخانه‌ای در شالیزارهای ایران مشاهده نمی‌شود. راهبردهای کاهش زیر پیشنهاد می‌شود:

- افزایش عملکرد در واحد سطح باعث کاهش انتشار گاز متان در شالیزارها می‌شود زیرا که تولید این گاز به زمین زیر کشت برنج بیشتر بستگی دارد تا به مقدار تولید. افزایش عملکرد، باعث کمتر یا ثابت شدن زمین زیر کشت برنج و کاهش انتشار متان می‌گردد.

- هر چند جمع‌آوری کاه و کولش برنج پس از برداشت باعث کاهش تولید متان در شالیزار می‌گردد اما در ایران کاه و کولش را برای افزودن نیترات به زمین‌های کشاورزی می‌سوزانند که باعث آلودگی هوا و انتشار GHG می‌گردد، هر چند که مقدار آن $0.3 - 0.4$ درصد GHG کشاورزی است. توصیه پژوهش حاضر این است که کاه و کولش سوزانده نشده و در سطح خاک رها شوند که برای جلوگیری از فرسایش خاک که در ایران بسیار زیاد است نیز می‌تواند مفید باشد. البته کاه و کولش نقش چندانی در انتشار گازهای گلخانه‌ای در بخش کشاورزی ایران ندارد و سوزاندن یا برداشت آن‌ها تأثیر قابل توجهی در افزایش انتشار گازهای گلخانه‌ای نخواهد داشت. کاهش بازه زمانی آبیگری در شالیزارها باعث کاهش رشد باکتری‌های تولید کننده متان می‌شود. پایین آوردن سطح آب در شالیزار در میانه فصل رشد باعث افزایش کارایی مصرف آب نیز می‌گردد. بررسی‌ها نشان می‌دهد که این شیوه باعث کاهش ۹۰ درصدی آزاد شدن متان در شالیزارها در ژاپن و چین شده است [۳۰۸-۳۰۹]. نگرانی دیگر درباره پایین آوردن سطح آب در شالیزارها در میانه فصل افزایش انتشار اکسید نیتروز است که نشان‌دهنده اهمیت به کارگیری توانمان بازدارنده‌های نیترات زایی و کاهش سطح آب در شالیزارها است.

۴-۵- به کارگیری فناوری‌های نوین در کاهش تخمیر روده‌ای دام‌ها در کشاورزی

نیمی از انتشار گازهای گلخانه‌ای در بخش کشاورزی، مربوط به تخمیر روده‌ای دام‌ها در دامپروری است که بخش عمده آن تولید گاز متان توسط میکروب‌ها در دستگاه گوارش دام‌ها است. افزایش کارایی تولید شیر و گوشت با واکسن‌ها و میکروب‌های بهگزینی شده، نه تنها باعث کاهش تولید متان توسط دام‌ها شده بلکه با کاهش فشار بر منابع آب و خاک باعث ذخیره بیشتر کربن در خاک‌های کشاورزی خواهد شد. اما چالش اصلی در این مورد این است که باکتری‌های دستگاه گوارش نشخوار کنندگان به این گونه واکسن‌ها و میکروب‌های به‌گزینی شده مقاوم شده و به تولید متان ادامه می‌دهند.

استفاده از 3Nitrooxypropanol به عنوان افزودنی برای کاهش انتشار متان روده از گاوهای شیری مورد مطالعه قرار گرفته است. 3Nitrooxypropanol (به اختصار 3NOP) یک ترکیب آلی مصنوعی با فرمول $\text{HOCH}_2\text{CH}_2\text{CH}_2\text{ONO}_2$ است. این ماده، مونونیترات استر ۱،۳-پروپانیدیول بوده و به عنوان یک بازدارنده آنزیم عمل می‌کند که به ویژه متیل کوآنزیم ردوکتاز (MCR) را هدف قرار می‌دهد، آنزیمی که مرحله نهایی تولید متان را در دستگاه گوارشی نشخوارکنندگان کاتالیز می‌کند [۵۵]. هنگامی که به خوراک نشخوارکنندگان افزوده می‌شود، با مهار فعالیت MCR به طور قابل توجهی (۳۰ درصد) انتشار متان را کاهش می‌دهد که معادل کاهش ۱/۲ تن دی اکسید کربن معادل در هر گاو در سال است [۳۱۱، ۳۱۲]. یک متاآنالیز شامل داده‌های حاصل از مطالعات متعدد تأیید کرد که مکمل‌های 3NOP منجر به کاهش ۲۴ درصدی انتشار متان روده‌ای می‌شود، بدون اینکه اثرات نامطلوبی بر مصرف ماده خشک (DMI) یا تولید شیر مشاهده شود [۳۱۳].

راهبردهای کاهشی که برای کاهش تولید متان در دستگاه گوارش نشخوارکنندگان در کشورهای پیشرفته پیشنهاد، آزموده و به کار گرفته می‌شوند در زمان کنونی در ایران به کاربردن نیستند زیرا که از هفت میلیون گاو و گوساله کشور در سال ۱۴۰۱ تنها یک میلیون و ششصد و بیست هزار گاو و گوساله صنعتی و بقیه دورگ (۴۳۰۰۰۰۰) و بومی (۱۱۲۸۰۰۰) بودند [۲۸۸]. دامداری‌های بومی و سنتی در طول زمان یا باید از اقتصاد بازار حذف شوند، یا به واحدهای صنعتی تبدیل گردند که در آن‌ها از هورمون‌ها و کاهنده‌های تخمیر روده‌ای استفاده می‌شود. برای دامداری‌های صنعتی راهبردهای ویژه زیر پیشنهاد می‌شود:

– ارائه یارانه و تشویق‌های مالی و کاهش مالیات واحدهای تولیدی که کاهنده‌های تخمیر روده‌ای مانند 3NOP را به کار می‌گیرند و متان کمتری تولید می‌کنند.

– فراهم کردن پشتیبانی مالی دولتی و بخش خصوصی برای پژوهش درباره کاهنده‌های نوین تخمیر روده‌ای در نشخوارکنندگان

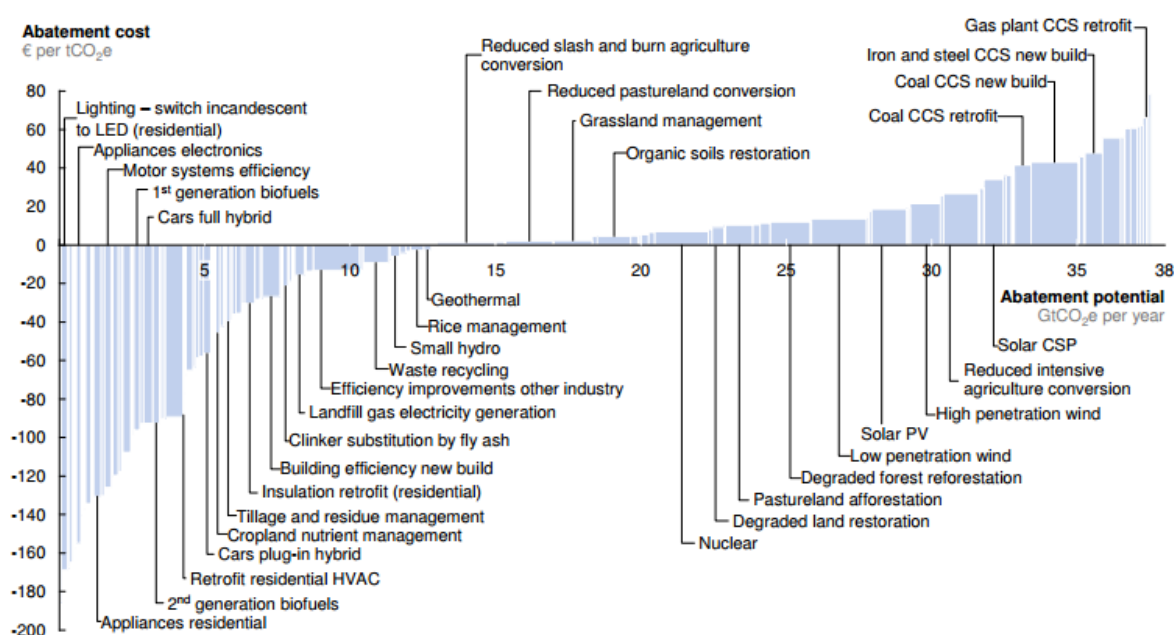
۴-۵ بررسی هزینه روش‌های کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای

تصمیم‌گیری در خصوص انتخاب راهکارهای کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای بدون اطلاع از هزینه هر واحد کاهش انتشار میسر نیست. اما با توجه به اینکه امکان برآورد هزینه هر راهکار برای مجری طرح فراهم نبود بدین منظور از نمودار جهانی هزینه کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای^۳ که توسط شرکت Mckinsey & Company منتشر شده است استفاده شد (نمودار ۱۷). این نمودار راهکارهای مختلف کاهش انتشار را بر اساس هزینه به ازای هر تن معادل CO_2 رتبه‌بندی می‌کند و میزان کاهش قابل دستیابی را نمایش می‌دهد. این نمودار به سیاست‌گذاران کمک می‌کند تا بفهمند کدام راهکارها با هزینه کمتر بیشترین کاهش انتشار را دارند و چگونه می‌توان سرمایه‌گذاری‌ها را در زمینه کاهش انتشار اولویت‌بندی کرد. هر راهکار یا اقدام به صورت یک ستون بالای محور افقی یا زیر آن نشان داده می‌شود. ستون‌های بالای محور افقی نشان‌دهنده هزینه آن راهکار هستند و هرچه ارتفاع ستون بیشتر باشد بیان‌گر هزینه بیشتر آن راهکار است. ستون‌های زیر محور افقی نشان‌دهنده صرفه‌جویی مالی آن راهکار هستند و هرچه ارتفاع ستون به

³ . Global GHG abatement cost curve beyond BAU (Business as Usual)

سمت پایین بیشتر باشد، میزان صرفه‌جویی آن راهکار بیشتر است. برای مقایسه بهتر، هزینه‌ها یا صرفه‌جویی‌ها به صورت سالانه بیان می‌شوند. عرض هر ستون نشان‌دهنده حجم پتانسیل کاهش انتشار سالانه است که معمولاً براساس تن معادل CO_2 بیان می‌شود [۳۱۴].

همان‌طور که در نمودار ۱۷ دیده می‌شود از میان راهکارهای بخش کشاورزی راهکارهای مدیریت تغذیه در اراضی زراعی،^{۳۴} مدیریت شخم و بقایای گیاهی^{۳۵} و مدیریت شالیزارها^{۳۶} تنها هزینه‌بر نخواهند بود بلکه باعث صرفه‌جویی مالی نیز می‌شوند. راهکارهای کاهش کشاورزی مبتنی زمین‌سوزی،^{۳۷} کاهش تغییر کاربری مراتع،^{۳۸} مدیریت مراتع و چراگاه‌ها،^{۳۹} احیای خاک‌های آلی،^{۴۰} احیای اراضی تخریب‌شده،^{۴۱} درخت‌کاری در مراتع،^{۴۲} احیای جنگل‌های تخریب‌شده و^{۴۳} کاهش تبدیل به کشاورزی فشرده یا متمرکز^{۴۴} نیز به ترتیب دارای کمترین هزینه می‌باشند [۳۱۴].



شکل ۱۷- نمودار هزینه کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای جهانی فراتر از وضع موجود [۳۱۴]

سخن پایانی

بر پایه برآوردها و ارزیابی‌های نگارنده:

- ۳ . Cropland nutrient management
- ۳ . Tillage and residue management
- ۳ . Rice management
- ۳ . Reduced slash and burn agriculture conversion
- ۳ . Reduced pastureland conversion
- ۳ . Grassland management
- ۴ . Organic soil restoration
- ۴ . Degraded land restoration
- ۴ . Pastureland afforestation
- ۴ . Degraded forest restoration
- ۴ . Reduced intensive agriculture conversion

(۱) بخش کشاورزی ایران ۱۴/۳ درصد از ۳۱۷ تراوات ساعت [۹] برق مصرفی سالانه کشور را مصرف می‌کند که باعث انتشار ۲۰ میلیون تن CO_2 سالانه در کشور می‌شود.

(۲) میزان گاز مصرف شده در بخش کشاورزی ۲ درصد مصرف گاز کشور در سال ۲۰۲۳ است یعنی برابر با ۲۷۷ میلیارد متر مکعب [۹] که ۱۱ میلیون تن گاز دی اکسید کربن منتشر کرده است.

(۳) روزانه ۵۰ هزار بشکه گازوئیل برای سوخت تراکتورها، کمباین‌ها و تیلرها به بخش کشاورزی داده می‌شود که سالانه حدود ۸ میلیون تن گاز دی اکسید کربن منتشر می‌کند. بنابراین کاربرد انرژی‌های فسیلی در بخش کشاورزی حدود ۳۸ میلیون تن گاز دی اکسید کربن سالانه منتشر می‌کند که این معادل است با کل برآورد گازهای گلخانه‌ای تولید شده در بخش کشاورزی به وسیله شاخه پژوهشی کمیسیون اروپا و دیدبان اقلیم. با افزودن متان و اکسید نیتروز منتشر شده از دام‌ها و شالیزارها و کودهای شیمیایی و آلی و با در نظر گرفتن آزاد شدن کربن خاک در کشت و کارهای کشاورزی، چرای دام‌ها در مراتع و جنگل زدایی، میزان انتشار دی اکسید کربن در بخش کشاورزی ایران بیشتر از ۱۰۳ میلیون تن معادل CO_2 است.

(۴) بخش کشاورزی ایران حدود ۳ درصد از کل انرژی مصرفی کشور را مصرف می‌کند.

راهبردهایی که در این پروژه پس از بررسی ژرف و گسترده پژوهش‌های انجام شده در دیگر کشورها درباره کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای در کشاورزی پیشنهاد شده‌اند ضمن کاهش آلودگی آب و خاک ایران به توسعه کم کربن کشور کمک شایانی خواهد کرد، بویژه:

- به کارگیری راهبردهای کاهش پیشنهاد شده در این پروژه باعث افزایش کارایی کاربرد کودهای نیتراتی شده و از هدر رفت نیترات به گونه NO_3 و آلودگی آب‌های زیرزمینی کشور جلوگیری خواهد کرد.

- سازوکارهای بازدارندگی زیستی نیترات زدایی که در این پروژه پیشنهاد شده است، باعث کاهش انتشار برخی گازهای شیمیایی خطرناک نیتروژن مانند NO و N_2O به جو زمین شده و از آلودگی هوای کشور و گرمایش جهانی خواهد کاست.

- راهبردهای پیشنهادی در این پروژه از افزایش میانگین دمای کشور در بلند مدت خواهد کاست یا آن را پایدار خواهد کرد. امید است سازوکارهای پیشنهاد شده با کاهش میانگین دمای کشور بر افزایش بارش برف و باران و کاهش تبخیر در بلند مدت کمک کند.

- امید است راهبردها، سیاست‌ها، و سازوکارهای کاهش پیشنهاد شده در این پروژه با کاهش انتشار گونه‌های شیمیایی نیتروژن مانند NO و N_2O و گاز متان از شالیزارهای کشور به کاهش آلودگی هوا، کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای و کاهش میانگین دمای کشور در بلند مدت کمک کند همچنان که در کشورهای چین و ژاپن، هند و آمریکا کمک کرده است (تلفات کودهای نیتروژنی در زمین‌های کشاورزی ایران بیش از ۷۰ درصد است).

- راهبردهای کاهشی پیشنهاد شده در این پروژه با کاهش انتشار متان در بخش دامپروری کشور به کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای در بخش کشاورزی و پایداری میانگین دمای کشور در بلند مدت کمک خواهد کرد.
- سازوکارهای کاهشی پیشنهاد شده در این پروژه درباره ذخیره کربن در خاک به کاهش انتشار دی اکسید کربن از خاک‌های ایران کمک کرده و باعث باقی ماندن کربن در خاک‌های کشاورزی شده و ضمن کمک به کاهش آلودگی هوای کشور نقشی ارزنده در توسعه کم کربن ایران خواهد داشت.

منابع

1. Matthews, J.B.R.; Möller, V.; van Diemenn, R.; Fuglesvedt, J.R.; et al. 2021. "Annex VII: Glossary". In; Masson-Delmotte, Valérie; Zhai, Panmao; Pirani, Anna; Connors, Sarah L.; Péan, Clotilde; et al. (eds.). Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (PDF). IPCC/Cambridge University Press. pp. 2215–2256.
2. U.S. Environmental Protection Agency. 2016. Atmospheric Concentration of Greenhouse Gases. https://www.epa.gov/sites/default/files/2016-08/documents/print_ghg-concentrations-2016.pdf
3. NASA GISS: Science Briefs: Greenhouse Gases: Refining the Role of Carbon Dioxide. www.giss.nasa.gov. Retrieved Sep 06; 2023.
4. Karl TR, Trenberth KE. 2003. Modern global climate change. Science. 302(5651): 1719–23.
5. Le Treut, H., R. Somerville, U. Cubasch, Y. Ding, C. Mauritzen, A. Mokssit, T. Peterson and M. Prather, 2007: Historical Overview of Climate Change. In: Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
6. Blasing, T.J. 2013. Current Greenhouse Gas Concentrations. doi:10.3334/CDIAC/atg.032.
7. IPCC AR4 WG1. 2007. p.140.
8. Crippa, M., Guizzardi, D., Pagani, F., Banja, M., Muntean, M., Schaaf, E., Monforti-Ferrario, F., Becker, W.E., Quadrelli, R., Risquez Martin, A., Taghavi-Moharamli, P., Köykkä, J., Grassi, G., Rossi, S., Melo, J., Oom, D., Branco, A., San-Miguel, J., Manca, G., Pisoni, E., Vignati, E. and Pekar, F., GHG emissions of all world countries, Publications Office of the European Union, Luxembourg, 2024, doi:10.2760/4002897, JRC138862.
9. U.S. Energy Information Administration. 2024. <https://www.eia.gov/international/overview/country/irn>
10. Statista. 2024. Total energy production worldwide in 2022 by leading country. <https://www.statista.com/statistics/1398127/global-energy-produce>
11. BP Statistical Review of World Energy. 2022, 71st edition. 2024.
12. World Energy & Climate Statistics-Yearbook. 2024: <https://yearbook.enerdata.net/natural-gas/world-natural-gas-production-statistics.ht>
13. Yearly electricity data. ember-climate.org. Retrieved 13 June 2024. <https://ember-climate.org/data-catalogue/yearly-electricity-data/>

14. Rhodium Group. 2024. Global Greenhouse Gas Emissions: 1990-2021 and Preliminary 2022 Estimates. <https://rhg.com/research/global-greenhouse-gas-emissions-2022/>
15. Climate watch. 2023. CO₂ emissions by sector, Iran: <https://ourworldindata.org/grapher/co-emissions-by-sector?country=~IRN>
16. <https://www.ers.usda.gov/webdocs/charts/108624/Greenhouse-gas-emissions.png?v=8922>
17. National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine. 2018. Improving Characterization of Anthropogenic Methane Emissions in the United States. Washington, DC: The National Academies Press. doi: <https://doi.org/10.17226/24987>.
18. IPCC. 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Eggleston HS, Buendia L, Miwa K, Ngara T, Tanabe K, editors. Hayama, Kanagawa, Japan: Institute for Global Environmental Strategies; 2006. Prepared by the National Greenhouse Gas Inventories Programme.
19. AWE International. 2014. CO₂ monitoring technologies. Retrieved Sep, 9, 2024. [https://www.awe.international/article/1841003/co2-monitoring-technologies#:~:text=from%20practical%20distances,-.Tunable%20diode%20laser%20\(TDL\)%20spectrometer,aspects%20of%20the%20CCS%20process](https://www.awe.international/article/1841003/co2-monitoring-technologies#:~:text=from%20practical%20distances,-.Tunable%20diode%20laser%20(TDL)%20spectrometer,aspects%20of%20the%20CCS%20process).
20. Zimmerman PR. U.S. Patent and Trademark Office, Pat. No. 5,265,618. System for Measuring Metabolic Gas Emissions from Animals. 1993.
21. Rolston DE. Gas flux. In: Klute A, editor. Methods of Soil Analysis. Madison, WI: American Society of Agronomy; 1986.
22. Eklund B. Practical guidance for flux chamber measurements of fugitive volatile organic emission rates. Journal of the Air & Waste Management Association. 1992;42(12):1583–1591.
23. Bogner JE, Spokas KA, Burton EA. Kinetics of methane oxidation in a landfill cover soil: Temporal variations, a whole landfill oxidation experiment, and modeling of net CH₄ emissions. Environmental Science & Technology. 1997;31(9):2504–2514.
24. Dore CJ, Jones BMR, Scholtens R, Huis in't Veld JWH, Burgess LR, Phillips VR. Measuring ammonia emission rates from livestock buildings and manure stores. Part 2: Comparative demonstrations of three methods on the farm. Atmospheric Environment. 2004;38(19):3017–3024.
25. Harper LA, Denmead OT, Flesch TK. Micrometeorological techniques for measurement of enteric greenhouse gas emissions. Animal Feed Science and Technology. 2011;166-167:227–239.
26. Lamb BK, McManus JB, Shorter JH, Kolb CE, Mosher B, Harriss RC, Allwine E, Blaha D, Howard T, Guenther A, Lott RA, Siverson R, Westburg H, Zimmerman P. Development of atmospheric tracer methods to measure methane emissions from natural gas facilities and urban areas. Environmental Science & Technology. 1995;29(6):1468–1479.
27. Vaughn TL, Bell CS, Yacovitch TI, Roscioli JR, Herndon SC, Conley S, Schwietzke S, Heath GA, Petron G, Zimmerle D. Comparing facility-level methane emission rate estimates at natural gas gathering and boosting stations. Elementa-Science of the Anthropocene. 2017;5.
28. Herndon S, Floerchinger C, Roscioli JR, Yacovitch T, Franklin JP, Shorter JH, Kolb CE, Subramanian R, Robinson AL, Molina LT, Allen D. Measuring methane emissions from industrial and waste processing sites using the dual tracer flux ratio method; Presented at American Geophysical Union Fall Meeting 2013; San Francisco, CA. 2013.
29. Brantley HL, Thoma ED, Squier WC, Guven BB, Lyon D. Assessment of methane emissions from oil and gas production pads using mobile measurements. Environmental Science & Technology. 2014;48(24):14508–14515.

30. Flesch TK, Wilson JD, Harper LA, Crenna BP. Estimating gas emissions from a farm with an inverse-dispersion technique. *Atmospheric Environment*. 2005;39:4863–4874.
31. Mellqvist J, Samuelsson J, Ericsson M, Brohede S, Andersson P, Johansson J, Isoz O, Tisopulos L, Polidori A, Pikelnaya O. Using Solar Occultation Flux and Other Optical Remote Sensing Techniques to Fully Characterize and Quantify Fugitive Emissions from refineries and oil depots. Presented at Air and Waste Management Association 109th Annual Conference & Exhibition; New Orleans, Louisiana. June 20-23. 2016.
32. Leytem AB, Dungan RS, Bjorneberg DL, Koehn AC. Emissions of ammonia, methane, carbon dioxide, and nitrous oxide from dairy cattle housing and manure management systems. *Journal of Environmental Quality*. 2011;40(5):1383–1394.
33. Gao ZL, Desjardins RL, Flesch TK. Assessment of the uncertainty of using an inverse-dispersion technique to measure methane emissions from animals in a barn and in a small pen. *Atmospheric Environment*. 2010;44(26):3128–3134.
34. McGinn SM, Beauchemin KA, Flesch TK, Coates T. Performance of a dispersion model to estimate methane loss from cattle in pens. *Journal of Environmental Quality*. 2009;38(5):1796–1802.
35. Ro KS, Johnson MH, Stone KC, Hunt PG, Flesch T, Todd RW. Measuring gas emissions from animal waste lagoons with an inverse-dispersion technique. *Atmospheric Environment*. 2013;66:101–106.
36. Robertson AM, Edie R, Snare D, Soltis J, Field RA, Burkhart MD, Bell CS, Zimmerle D, Murphy SM. Variation in methane emission rates from well pads in four oil and gas basins with contrasting production volumes and compositions. *Environmental Science & Technology*. 2017;51(15):8832–8840.
37. Gvakharia A, Kort EA, Brandt A, Peischl J, Ryerson TB, Schwarz JP, Smith ML, Sweeney C. Methane, black carbon, and ethane emissions from natural gas flares in the Bakken Shale, North Dakota. *Environmental Science & Technology*. 2017;51(9):5317–5325. [[PubMed](#)]
38. Mehrotra S, Faloona I, Suard M, Conley S, Fischer ML. Airborne methane emission measurements for selected oil and gas facilities across California. *Environmental Science & Technology*. 2017;51(21):12981–12987.
39. Cambaliza MOL, Shepson PB, Bogner J, Caulton DR, Stirm B, Sweeney C, Montzka SA, Gurney KR, Spokas K, Salmon OE, Lavoie TN, Hendricks A, Mays K, Turnbull J, Miller BR, Lauvaux T, Davis K, Karion A, Moser B, Miller C, Obermeyer C, Whetstone J, Prasad K, Miles N, Richardson S. Quantification and source apportionment of the methane emission flux from the city of Indianapolis. *Elementa: Science of the Anthropocene*. 2015;3(37).
40. Hristov AN, Oh J, Firkins JL, Dijkstra J, Kebreab E, Waghorn G, Makkar HPS, Adesogan AT, Yang W, Lee C, Gerber PJ, Henderson B, Tricarico JM. Mitigation of methane and nitrous oxide emissions from animal operations: I. A review of enteric methane mitigation options. *Journal of Animal Science*. 2013;91(11):5045–5069.
41. Murray RM, Bryant AM, Leng RA. Rates of production of methane in the rumen and large intestine of sheep. *British Journal of Nutrition*. 1976;36(1):1–14.
42. Muñoz C, Yan T, Wills DA, Murray S, Gordon AW. Comparison of the sulfur hexafluoride tracer and respiration chamber techniques for estimating methane emissions and correction for rectum methane output from dairy cows. *Journal of Dairy Science*. 2012;95(6):3139–3148.
43. Reynolds CK, Crompton LA, Barratt CES, Donovan T, Misselbrook TH. Arterial, rumen, and milk concentration and net absorption of methane into the portal vein of lactating dairy cattle. *Greenhouse Gases and Animal Agriculture Conference. Advances in Animal Biosciences*. 2013;4(392)
44. Ricci P, Chagunda MGG, Rooke J, Houdijk JGM, Duthie CA, Hyslop J, Roehe R, Waterhouse A. Evaluation of the laser methane detector to estimate methane emissions from ewes and steers. *Journal of Animal Science*. 2014;92(11):5239–5250.

45. Pinares-Patiño C, Waghorn G, editors. Technical Manual on Respiration Chamber Design. Wellington, New Zealand: Ministry of Agriculture and Forestry; 2012.
46. Gardiner TD, Coleman MD, Innocenti F, Tompkins J, Connor A, Garnsworthy PC, Moorby JM, Reynolds CK, Waterhouse A, Wills D. Determination of the absolute accuracy of UK chamber facilities used in measuring methane emissions from livestock. *Measurement*. 2015;66:272–279.
47. Johnson K, Huyler M, Westberg H, Lamb B, Zimmerman P. Measurement of methane emissions from ruminant livestock using a SF₆ tracer technique. *Environmental Science & Technology*. 1994;28(2):359–362.
48. Deighton MH, Williams SRO, Hannah MC, Eckard RJ, Boland TM, Wales WJ, Moate PJ. A modified sulphur hexafluoride tracer technique enables accurate determination of enteric methane emissions from ruminants. *Animal Feed Science and Technology*. 2014;197:47–63.
49. Clark H. Animal vs. measurement technique variability in enteric methane production—Is the measurement resolution sufficient? Presented at 4th International Conference on Greenhouse Gases and Animal Agriculture; Banff, AB, Canada. 2010.
50. Pinares-Patiño CS, Clark H. Reliability of the sulfur hexafluoride tracer technique for methane emission measurement from individual animals: An overview. *Australian Journal of Experimental Agriculture*. 2008;48(1-2):223–229.
51. Pinares-Patiño CS, Lassey KR, Martin RJ, Molano G, Fernandez M, MacLean S, Sandoval E, Luo D, Clark H. Validation of the SF₆ tracer technique for estimation of methane emission from sheep using respiration chambers. Presented at the 4th International Conference on Greenhouse Gases and Animal Agriculture; Banff, AB, Canada. 2010.
52. Berndt A, Boland TM, Deighton MH, Gere JJ, Grainger C, Hegarty RS, Iwaasa AD, Koolaard JP, Lassey KR, Luo D, Martin RJ, Martin C, Moate PJ, Molano G, Pinares-Patiño C, Ribaux BE, Swainson NM, Waghorn GC, Williams SRO. Guidelines for Use of Sulphur Hexafluoride (SF₆) Tracer Technique to Measure Enteric Methane Emissions from Ruminants. Lambert MG, editor. Wellington, New Zealand: New Zealand Agricultural Greenhouse Gas Research Centre; 2014.
53. Hristov AN, Oh J, Giallongo F, Frederick T, Harper MT, Weeks H, Branco AF, Price WJ, Moate PJ, Deighton MH, Williams SRO, Kindermann M, Duval S. Comparison of the GreenFeed system with the sulfur hexafluoride tracer technique for measuring enteric methane emissions from dairy cows. *Journal of Dairy Science*. 2016;99(7):5461–5465.
54. Zimmerman PR, Zimmerman RS. U.S. Patent and Trademark Office, Pat. No. US20090288606. Method and system for monitoring and reducing ruminant methane production. 2012.
55. Hristov, A.N., J. Oh, F. Giallongo, T.W. Frederick, M.T. Harper, H.L. Weeks, A.F. Branco, et al. 2015. “An Inhibitor Persistently Decreased Enteric Methane Emissions from Dairy Cows with No Negative Effect on Milk Production.” *Proceedings of the National Academy of Sciences* 112 (34): 10663–10668.
56. Dorich CD, Varner RK, Pereira ABD, Martineau R, Soder KJ, Brito AF. Use of a portable, automated, open-circuit gas quantification system and the sulfur hexafluoride tracer technique for measuring enteric methane emissions in Holstein cows fed ad libitum or restricted. *Journal of Dairy Science*. 2015;98(4):2676–2681.
57. Hammond KJ, Humphries DJ, Crompton LA, Green C, Reynolds CK. Methane emissions from cattle: Estimates from short-term measurements using a GreenFeed system compared with measurements obtained using respiration chambers or sulphur hexafluoride tracer. *Animal Feed Science and Technology*. 2015;203:41–52.
58. Hristov AN, Oh J, Giallongo F, Frederick TW, Harper MT, Weeks HL, Branco AF, Moate PJ, Deighton MH, Williams SRO, Kindermann M, Duval S. An inhibitor persistently decreased enteric

- methane emission from dairy cows with no negative effect on milk production. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*. 2015b;112(34):10663–10668.
59. Branco AF, Giallongo F, Frederick T, Weeks H, Oh J, Hristov AN. Effect of technical cashew nut shell liquid on rumen methane emission and lactation performance of dairy cows. *Journal of Dairy Science*. 2015;98(6):4030–4040.
 60. Renand G, Maupetit D. Assessing individual differences in enteric methane emission among beef heifers using the GreenFeed emission monitoring system: Effect of the length of testing period on precision. *Animal Production Science*. 2016;56(2-3):218–223.
 61. Hristov AN, Oh J, Giallongo F, Frederick T, Weeks H, Zimmerman PR, Harper MT, Hristova RA, Zimmerman RS, Branco AF. The use of an automated system (GreenFeed) to monitor enteric methane and carbon dioxide emissions from ruminant animals. *Journal of Visualized Experiments*. 2015a;(103).
 62. Kebreab E, Gerrits WJJ, Labussière E. *Indirect Calorimetry: Techniques, Computations, and Applications*. Wageningen, The Netherlands: Wageningen Academic; 2015. Calorimeters for enteric methane measurements.
 63. Place SE, Pan Y, Zhao Y, Mitloehner FM. Construction and operation of a ventilated hood system for measuring greenhouse gas and volatile organic compound emissions from cattle. *Animals*. 2011;1(4):433–446.
 64. Madsen J, Bjerg BS, Hvelplund T, Weisbjerg MR, Lund P. Methane and carbon dioxide ratio in excreted air for quantification of the methane production from ruminants. *Livestock Science*. 2010;129(1-3):223–227.
 65. Hellwing ALF, Weisbjerg MR, Madsen J, Lund P. What affects CH₄/CO₂ ratio in cow's breath. *Advances in Animal Biosciences*. 2013;4(2):557.
 66. Huhtanen P, Cabezas-Garcia EH, Utsumi S, Zimmerman S. Comparison of methods to determine methane emissions from dairy cows in farm conditions. *Journal of Dairy Science*. 2015;98(5):3394–3409.
 67. Garnsworthy PC, Craigon J, Hernandez-Medrano JH, Saunders N. On-farm methane measurements during milking correlate with total methane production by individual dairy cows. *Journal of Dairy Science*. 2012;95(6):3166–3180.
 68. Bell MJ, Potterton SL, Craigon J, Saunders N, Wilcox RH, Hunter M, Goodman JR, Garnsworthy PC. Variation in enteric methane emissions among cows on commercial dairy farms. *Animal*. 2014;8(9):1540–1546.
 69. Wu L, Koerkamp PWGG, Ogink N. Uncertainty assessment of the breath methane concentration method to determine methane production of dairy cows. *Journal of Dairy Science*. 2017;101(2):1554–1564.
 70. Chagunda MGG, Ross D, Rooke J, Yan T, Douglas JL, Poret L, McEwan NR, Teeranavattanakul P, Roberts DJ. Measurement of enteric methane from ruminants using a hand-held laser methane detector. *Acta Agriculturae Scandinavica Section A—Animal Science*. 2013;63(2):68–75. [[Reference list](#)]
 71. Chagunda MGG, Ross D, Rooke J, Yan T, Douglas JL, Poret L, McEwan NR, Teeranavattanakul P, Roberts DJ. Measurement of enteric methane from ruminants using a hand-held laser methane detector. *Acta Agriculturae Scandinavica Section A—Animal Science*. 2013;63(2):68–75.
 72. Amon B, Amon T, Boxberger J, Alt C. Emissions of NH₃, N₂O and CH₄ from dairy cows housed in a farmyard manure tying stall (housing, manure storage, manure spreading). *Nutrient Cycling in Agroecosystems*. 2001;60(1-3):103–113.

73. Kinsman R, Sauer FD, Jackson HA, Wolynetz MS. Methane and carbon dioxide emissions from dairy cows in full lactation monitored over a six-month period. *Journal of Dairy Science*. 1995;78(12):2760–2766.
74. Pedersen S, Takai H, Johnsen JO, Metz JHM, Koerkamp PWGG, Uenk GH, Phillips VR, Holden MR, Sneath RW, Short JL, White RP, Hartung J, Seedorf J, Schröder M, Linkert KHH, Wathes CM. A comparison of three balance methods for calculating ventilation rates in livestock buildings. *Journal of Agricultural Engineering Research*. 1998;70(1):25–37.
75. Marik T, Levin I. A new tracer experiment to estimate the methane emissions from a dairy cow shed using sulfur hexafluoride (SF₆). *Global Biogeochemical Cycles*. 1996;10(3):413–418.
76. Samer M, Fiedler M, Muller HJ, Glaser M, Ammon C, Berg W, Sanftleben P, Brunsch R. Winter measurements of air exchange rates using tracer gas technique and quantification of gaseous emissions from a naturally ventilated dairy barn. *Applied Engineering in Agriculture*. 2011;27(6):1015–1025.
77. Fiedler AM, Muller HJ. Emissions of ammonia and methane from a livestock building natural cross ventilation. *Meteorologische Zeitschrift*. 2011;20(1):59–65.
78. Snell HGJ, Seipelt F, Van den Weghe HFA. Ventilation rates and gaseous emissions from naturally ventilated dairy houses. *Biosystems Engineering*. 2003;86(1):67–73.
79. Dore CJ, Jones BMR, Scholtens R, Huis in't Veld JWH, Burgess LR, Phillips VR. Measuring ammonia emission rates from livestock buildings and manure stores. Part 2: Comparative demonstrations of three methods on the farm. *Atmospheric Environment*. 2004;38(19):3017–3024.
80. Harper LA, Denmead OT, Flesch TK. Micrometeorological techniques for measurement of enteric greenhouse gas emissions. *Animal Feed Science and Technology*. 2011;166-167:227–239.
81. Flesch TK, Wilson JD, Harper LA, Crenna BP. Estimating gas emissions from a farm with an inverse-dispersion technique. *Atmospheric Environment*. 2005; 39:4863–4874.
82. Ellis S, Webb J, Misselbrook T, Chadwick D. Emission of ammonia (NH₃), nitrous oxide (N₂O) and methane (CH₄) from a dairy hardstanding in the UK. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*. 2001;60(1-3):115–122.
83. Misselbrook TH, Webb J, Chadwick DR, Ellis S, Pain BF. Gaseous emissions from outdoor concrete yards used by livestock. *Atmospheric Environment*. 2001;35(31):5331–5338.
84. Gebert J, Groengroeft A, Pfeiffer EM. Relevance of soil physical properties for the microbial oxidation of methane in landfill covers. *Soil Biology & Biochemistry*. 2011;43(9):1759–1767.
85. Goldsmith CD, Chanton J, Abichou T, Swan N, Green R, Hater G. Methane emissions from 20 landfills across the United States using vertical radial plume mapping. *Journal of the Air & Waste Management Association*. 2012;62(2):183–197.
86. Scheutz C, Kjeldsen P, Bogner JE, De Visscher A, Gebert J, Hilger HA, Huber-Humer M, Spokas K. Microbial methane oxidation processes and technologies for mitigation of landfill gas emissions. *Waste Management & Research*. 2009;27(5):409–455.
87. Spokas K, Bogner J, Chanton J. A process-based inventory model for landfill CH₄ emissions inclusive of soil microclimate and seasonal methane oxidation. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*. 2011;116(G4).
88. Spokas K, Bogner J, Corcoran M, Walker S. From California dreaming to California data: Challenging historic models for landfill CH₄ emissions. *Elementa: Science of the Anthropocene*. 2015;3(51)
89. Bogner JE, Spokas KA, Chanton RP. Seasonal greenhouse gas emissions (methane, carbon dioxide, nitrous oxide) from engineered landfills: Daily, intermediate, and final California cover soils. *Journal of Environmental Quality*. 2011;40(3):1010–1020.

90. Streese-Kleeberg J, Rachor I, Gebert J, Stegmann R. Use of gas push-pull tests for the measurement of methane oxidation in different landfill cover soils. *Waste Management*. 2011;31(5):995–1001.
91. Taylor DM, Chow FK, Delkash M, Imhoff PT. Numerical simulations to assess the tracer dilution method for measurement of landfill methane emissions. *Waste Management*. 2016;56:298–309.
92. IPCC. 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Eggleston HS, Buendia L, Miwa K, Ngara T, Tanabe K, editors. Hayama, Kanagawa, Japan: Institute for Global Environmental Strategies; 2006. Prepared by the National Greenhouse Gas Inventories Programme.
93. Chanton J, Liptay K. Seasonal variation in methane oxidation in a landfill cover soil as determined by an in situ stable isotope technique. *Global Biogeochemical Cycles*. 2000;14(1):51–60.
94. Chanton JR, Powelson DK, Green RB. Methane oxidation in landfill cover soils, is a 10% default value reasonable? *Journal of Environmental Quality*. 2009;38(2):654–663.
95. Chanton J, Abichou T, Langford C, Hater G, Green R, Goldsmith D, Swan N. Landfill methane oxidation across climate types in the U.S. *Environmental Science & Technology*. 2011;45(1):313–319.
96. Liptay K, Chanton J, Czepiel P, Mosher B. Use of stable isotopes to determine methane oxidation in landfill cover soils. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*. 1998;103(D7):8243–8250.
97. Henneberger R, Chiri E, Bodelier PEL, Frenzel P, Luke C, Schroth MH. Field-scale tracking of active methane-oxidizing communities in a landfill cover soil reveals spatial and seasonal variability. *Environmental Microbiology*. 2015;17(5):1721–1737.
98. Babillote A. Field comparison of methods for assessment of fugitive emissions from landfills. Final report. Raleigh, NC: Environmental Research and Education Foundation; 2011. [July 24, 2017]. https://erefndn.org/wp-content/uploads/2015/12/FugitiveEmissions_FinalReport.pdf.
99. Willmott CJ. On the validation of models. *Physical Geography*. 1981;2(2):184–194.
100. Dlugokencky EJ, Steele LP, Lang PM, Masarie KA. The growth rate and distribution of atmospheric methane. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*. 1994;99(D8):17021–17043.
101. Cunnold DM, Steele LP, Fraser PJ, Simmonds PG, Prinn RG, Weiss RF, Porter LW, O'Doherty S, Langenfelds RL, Krummel PB, Wang HJ, Emmons L, Tie XX, Dlugokencky EJ. In situ measurements of atmospheric methane at GAGE/AGAGE sites during 1985-2000 and resulting source inferences. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*. 2002;107(D14)
102. Fung I, John J, Lerner J, Matthews E, Prather M, Steele LP, Fraser PJ. Three-dimensional model synthesis of the global methane cycle. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*. 1991;96(D7):13033–13065.
103. Brenninkmeijer CAM, Crutzen P, Boumard F, Dauer T, Dix B, Ebinghaus R, Filippi D, Fischer H, Franke H, Friess U, Heintzenberg J, Helleis F, Hermann M, Kock HH, Koeppl C, Lelieveld J, Leuenberger M, Martinsson BG, Miemczyk S, Moret HP, Nguyen HN, Nyfeler P, Oram D, O'Sullivan D, Penkett S, Platt U, Pupek M, Ramonet M, Randa B, Reichelt M, Rhee TS, Rohwer J, Rosenfeld K, Scharffe D, Schlager H, Schumann U, Slemr F, Sprung D, Stock P, Thaler R, Valentino F, van Velthoven P, Waibel A, Wandel A, Waschitschek K, Wiedensohler A, Xueref-Remy I, Zahn A, Zech U, Ziereis H. Civil aircraft for the regular investigation of the atmosphere based on an instrumented container: The new CARIBIC system. *Atmospheric Chemistry and Physics*. 2007;7(18):4953–4976.
104. Machida T, Matsueda H, Sawa Y, Nakagawa Y, Hirotani K, Kondo N, Goto K, Nakazawa T, Ishikawa K, Ogawa T. Worldwide Measurements of Atmospheric CO₂ and Other Trace Gas Species Using Commercial Airlines. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*. 2008;25(10):1744–1754.
105. Schaefer H, Fletcher SEM, Veidt C, Lassey KR, Brailsford GW, Bromley TM, Dlugokencky EJ, Michel SE, Miller JB, Levin I, Lowe DC, Martin RJ, Vaughn BH, White JWC. A 21st-century shift from fossil-fuel to biogenic methane emissions indicated by 13CH₄. *Science*. 2016;352(6281):80–84.

106. Schwietzke S, Sherwood OA, Bruhwiler LMP, Miller JB, Etiope G, Dlugokencky EJ, Michel SE, Arling VA, Vaughn BH, White JWC, Tans PP. Upward revision of global fossil fuel methane emissions based on isotope database. *Nature Climate Change*. 2016;538:88–91.
107. Allen DT, Cardoso-Saldaña FJ, Kimura Y. Variability in spatially and temporally resolved emissions and hydrocarbon source fingerprints for oil and gas sources in shale gas production regions. *Environmental Science & Technology*. 2017;51(20):12016–12026.
108. Peischl J, Ryerson TB, Brioude J, Aikin KC, Andrews AE, Atlas E, Blake D, Daube BC, de Gouw JA, Dlugokencky E, Frost GJ, Gentner DR, Gilman JB, Goldstein AH, Harley RA, Holloway JS, Kofler J, Kuster WC, Lang PM, Novelli PC, Santoni GW, Trainer M, Wofsy SC, Parrish DD. Quantifying sources of methane using light alkanes in the Los Angeles basin, California. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*. 2013;118(10):4974–4990.
109. Peischl J, Ryerson TB, Aikin KC, de Gouw JA, Gilman JB, Holloway JS, Lerner BM, Nadkarni R, Neuman JA, Nowak JB, Trainer M, Warneke C, Parrish DD. Quantifying atmospheric methane emissions from the Haynesville, Fayetteville, and northeastern Marcellus Shale gas production regions. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*. 2015;120(5):2119–2139.
110. Franco B, Bader W, Toon GC, Bray C, Perrin A, Fischer EV, Sudo K, Boone CD, Bovy B, Lejeune B, Servais C, Mahieu E. Retrieval of ethane from ground-based FTIR solar spectra using improved spectroscopy: Recent burden increase above Jungfraujoch. *Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer*. 2015;160:36–49.
111. Helmig D, Rossabi S, Hueber J, Tans P, Montzka SA, Masarie K, Thoning K, Plass-Duelmer C, Claude A, Carpenter LJ, Lewis AC, Punjabi S, Reimann S, Vollmer MK, Steinbrecher R, Hannigan J, Emmons LK, Mahieu E, Franco B, Smale D, Pozzer A. Reversal of global atmospheric ethane and propane trends largely due to US oil and natural gas production. *Nature Geoscience*. 2016;9(7):490–495.
112. Bruhwiler LM, Basu S, Bergamaschi P, Bousquet P, Dlugokencky E, Houweling S, Ishizawa M, Kim H-S, Locatelli R, Maksyutov S, Montzka S, Pandey S, Patra PK, Petron G, Saunio M, Sweeney C, Schwietzke S, Tans P, Weatherhead EC. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*. 2017. U.S. CH₄ emissions from oil and gas production: Have recent large increases been detected? p. 122.
113. Schwietzke S, Sherwood OA, Bruhwiler LMP, Miller JB, Etiope G, Dlugokencky EJ, Michel SE, Arling VA, Vaughn BH, White JWC, Tans PP. Upward revision of global fossil fuel methane emissions based on isotope database. *Nature Climate Change*. 2016;538:88–91.
114. Jacob DJ, Turner AJ, Maasakkers JD, Sheng JX, Sun K, Liu X, Chance K, Aben I, McKeever J, Frankenberg C. Satellite observations of atmospheric methane and their value for quantifying methane emissions. *Atmospheric Chemistry and Physics*. 2016;16(22):14371–14396.
115. Buchwitz M, Rozanov VV, Burrows JP. A near-infrared optimized DOAS method for the fast global retrieval of atmospheric CH₄, CO, CO₂, H₂O, and N₂O total column amounts from SCIAMACHY Envisat-1 nadir radiances. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*. 2000;105(D12):15231–15245.
116. Wecht KJ, Jacob DJ, Wofsy SC, Kort EA, Worden JR, Kulawik SS, Henze DK, Kopacz M, Payne VH. Validation of TES methane with HIPPO aircraft observations: Implications for inverse modeling of methane sources. *Atmospheric Chemistry and Physics*. 2012;12(4):1823–1832.
117. Worden J, Jiang Z, Jones DBA, Alvarado M, Bowman K, Frankenberg C, Kort EA, Kulawik SS, Lee M, Liu J, Payne V, Wecht K, Worden H. El Niño, the 2006 Indonesian peat fires, and the distribution of atmospheric methane. *Geophysical Research Letters*. 2013;40(18):4938–4943.
118. Pierangelo C, Millet B, Esteve F, Alpers M, Ehret G, Flamant P, Berthier S, Gibert F, Chomette O, Edouard D, Deniel C. MERLIN (methane remote sensing LIDAR mission): An overview. *EPJ Web of Conferences*. 2016;119.

119. Frankenberg C, Meirink JF, van Weele M, Platt U, Wagner T. Assessing methane emissions from global space-borne observations. *Science*. 2005;308(5724):1010–1014.
120. Hamazaki T, Kaneko Y, Kuze A, Kondo K. Fourier transform spectrometer for Greenhouse Gases Observing Satellite (GOSAT). *Proceedings of the SPIE*. 2005;5659:73–80.
121. O'Brien DM, Polonsky IN, Utembe SR, Rayner PJ. Potential of a geostationary geoCARB mission to estimate surface emissions of CO₂, CH₄ and CO in a polluted urban environment: Case study Shanghai. *Atmospheric Measurement Techniques*. 2016;9(9):4633–4654.
122. Thompson DR, Thorpe AK, Frankenberg C, Green RO, Duren R, Guanter L, Hollstein A, Middleton E, Ong L, Ungar S. Space-based remote imaging spectroscopy of the Aliso Canyon CH₄ superemitter. *Geophysical Research Letters*. 2016;43(12):6571–6578.
123. Thorpe A, Frankenberg C, Green RO, Thompson D, Aubrey AD, Mouroulis P, Eastwood M, Matheou G. The Airborne Methane Plume Spectrometer (AMPS): Quantitative imaging of methane plumes in real time. Presented at 2016 IEEE Aerospace Conference; Big Sky, MT. March 5-12. 2016.
124. Bradley ES, Leifer I, Roberts DA, Dennison PE, Washburn L. Detection of marine methane emissions with AVIRIS band ratios. *Geophysical Research Letters*. 2011;38(L10702)
125. Hulley GC, Duren RM, Hopkins FM, Hook SJ, Vance N, Guillevic P, Johnson WR, Eng BT, Mihaly JM, Jovanovic VM, Chazanoff SL, Staniszewski ZK, Kuai L, Worden J, Frankenberg C, Rivera G, Aubrey AD, Miller CE, Malakar NK, Tomas JMS, Holmes KT. High spatial resolution imaging of methane and other trace gases with the airborne Hyperspectral Thermal Emission Spectrometer (HyTES). *Atmospheric Measurement Techniques*. 2016;9(5):2393–2408.
126. Tratt DM, Buckland KN, Hall JL, Johnson PD, Keim ER, Leifer I, Westberg K, Young SJ. Airborne visualization and quantification of discrete methane sources in the environment. *Remote Sensing of Environment*. 2014;154:74–88.
127. Brown S. Greenhouse gas accounting for landfill diversion of food scraps and yard waste. *Compost Science & Utilization*. 2016;24(1):11–19.
128. Crosson ER. A cavity ring-down analyzer for measuring atmospheric levels of methane, carbon dioxide, and water vapor. *Applied Physics B: Lasers and Optics*. 2008;92(3):403–408.
129. O'Keefe A, Scherer JJ, Paul JB. CW Integrated cavity output spectroscopy. *Chemical Physics Letters*. 1999;307(5-6):343–349.
130. Sweeney C, Karion A, Wolter S, Newberger T, Guenther D, Higgs JA, Andrews AE, Lang PM, Neff D, Dlugokencky E, Miller JB, Montzka SA, Miller BR, Masarie KA, Biraud SC, Novelli PC, Crotwell M, Crotwell AM, Thoning K, Tans PP. Seasonal climatology of CO₂ across North America from aircraft measurements in the NOAA/ESRL Global Greenhouse Gas Reference Network. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*. 2015;120(10):5155–5190.
131. Hsu YK, VanCuren T, Park S, Jakober C, Herner J, FitzGibbon M, Blake DR, Parrish DD. Methane emissions inventory verification in southern California. *Atmospheric Environment*. 2010;44(1):1–7.
132. Jeong S, Hsu YK, Andrews AE, Bianco L, Vaca P, Wilczak JM, Fischer ML. A multitower measurement network estimate of California's methane emissions. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*. 2013;118(19):11339–11351.
133. Lamb BK, Cambaliza MOL, Davis KJ, Edburg SL, Ferrara TW, Floerchinger C, Heimbürger AME, Herndon S, Lauvaux T, Lavoie T, Lyon DR, Miles N, Prasad KR, Richardson S, Roscioli JR, Salmon OE, Shepson PB, Stirr BH, Whetstone J. Direct and indirect measurements and modeling of methane emissions in Indianapolis, Indiana. *Environmental Science & Technology*. 2016;50(16):8910–U8530.
134. McKain K, Down A, Raciti SM, Budney J, Hutyrá LR, Floerchinger C, Herndon SC, Nehr Korn T, Zahniser MS, Jackson RB, Phillips N, Wofsy SC. Methane emissions from natural gas infrastructure and use in the urban region of Boston, Massachusetts. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*. 2015;112(7):1941–1946.

135. Saunio M, Bousquet P, Poulter B, Peregon A, Ciais P, Canadell JG, Dlugokencky EJ, Etiope G, Bastviken D, Houweling S, Janssens-Maenhout G, Tubiello FN, Castaldi S, Jackson RB, Alexe M, Arora VK, Beerling DJ, Bergamaschi P, Blake DR, Brailsford G, Brovkin V, Bruhwiler L, Crevoisier C, Crill P, Covey K, Curry C, Frankenberg C, Gedney N, Hoglund-Isaksson L, Ishizawa M, Ito A, Joos F, Kim HS, Kleinen T, Krummel P, Lamarque JF, Langenfelds R, Locatelli R, Machida T, Maksyutov S, McDonald KC, Marshall J, Melton JR, Morino I, Naik V, O'Doherty S, Parmentier FJW, Patra PK, Peng CH, Peng SS, Peters GP, Pison I, Prigent C, Prinn R, Ramonet M, Riley WJ, Saito M, Santini M, Schroeder R, Simpson IJ, Spahni R, Steele P, Takizawa A, Thornton BF, Tian HQ, Tohjima Y, Viovy N, Voulgarakis A, van Weele M, van der Werf GR, Weiss R, Wiedinmyer C, Wilton DJ, Wiltshire A, Worthy D, Wunch D, Xu XY, Yoshida Y, Zhang B, Zhang Z, Zhu Q. The global methane budget 2000-2012. *Earth System Science Data*. 2016;8(2):697–751.
136. Bergamaschi P, Houweling S, Segers A, Krol M, Frankenberg C, Scheepmaker RA, Dlugokencky E, Wofsy SC, Kort EA, Sweeney C, Schuck T, Brenninkmeijer C, Chen H, Beck V, Gerbig C. Atmospheric CH₄ in the first decade of the 21st century: Inverse modeling analysis using SCIAMACHY satellite retrievals and NOAA surface measurements. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*. 2013;118(13):7350–7369.
137. Houweling S, Krol M, Bergamaschi P, Frankenberg C, Dlugokencky EJ, Morino I, Notholt J, Sherlock V, Wunch D, Beck V, Gerbig C, Chen H, Kort EA, Rockmann T, Aben I. A multi-year methane inversion using SCIAMACHY, accounting for systematic errors using TCCON measurements. *Atmospheric Chemistry and Physics*. 2014;14(8):3991–4012.
138. Wunch D, Toon GC, Blavier JFL, Washenfelder RA, Notholt J, Connor BJ, Griffith DWT, Sherlock V, Wennberg PO. The Total Carbon Column Observing Network. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical Physical and Engineering Sciences*. 2011;369(1943):2087–2112.
139. Bergamaschi P, Frankenberg C, Meirink JF, Krol M, Dentener F, Wagner T, Platt U, Kaplan JO, Körner S, Heimann M, Dlugokencky EJ, Goede A. Satellite cartography of atmospheric methane from SCIAMACHY on board ENVISAT: 2. Evaluation based on inverse model simulations. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*. 2007;112(D2):D02304.
140. Cressot C, Chevallier F, Bousquet P, Crevoisier C, Dlugokencky EJ, Fortems-Cheiney A, Frankenberg C, Parker R, Pison I, Scheepmaker RA, Montzka SA, Krummel PB, Steele LP, Langenfelds RL. On the consistency between global and regional methane emissions inferred from SCIAMACHY, TANSO-FTS, IASI and surface measurements. *Atmospheric Chemistry and Physics*. 2014;14(2):577–592.
141. Fraser A, Palmer PI, Feng L, Boesch H, Cogan A, Parker R, Dlugokencky EJ, Fraser PJ, Krummel PB, Langenfelds RL, O'Doherty S, Prinn RG, Steele LP, van der Schoot M, Weiss RF. Estimating regional methane surface fluxes: The relative importance of surface and GOSAT mole fraction measurements. *Atmospheric Chemistry and Physics*. 2013;13(11):5697–5713.
142. Meirink JF, Bergamaschi P, Krol MC. Four-dimensional variational data assimilation for inverse modelling of atmospheric methane emissions: Method and comparison with synthesis inversion. *Atmospheric Chemistry and Physics*. 2008;8(21):6341–6353.
143. Turner AJ, Jacob DJ, Wecht KJ, Maasakkers JD, Lundgren E, Andrews AE, Biraud SC, Boesch H, Bowman KW, Deutscher NM, Dubey MK, Griffith DWT, Hase F, Kuze A, Notholt J, Ohyama H, Parker R, Payne VH, Sussmann R, Sweeney C, Velasco VA, Warneke T, Wennberg PO, Wunch D. Estimating global and North American methane emissions with high spatial resolution using GOSAT satellite data. *Atmospheric Chemistry and Physics*. 2015;15(12):7049–7069.
144. Bergamaschi P, Frankenberg C, Meirink JF, Krol M, Villani MG, Houweling S, Dentener F, Dlugokencky EJ, Miller JB, Gatti LV, Engel A, Levin I. Inverse modeling of global and regional CH₄ emissions using SCIAMACHY satellite retrievals. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*. 2009;114(D22301).

145. Bousquet P, Ringeval B, Pison I, Dlugokencky EJ, Brunke EG, Carouge C, Chevallier F, Fortems-Cheiney A, Frankenberg C, Hauglustaine DA, Krummel PB, Langenfelds RL, Ramonet M, Schmidt M, Steele LP, Szopa S, Yver C, Viovy N, Ciais P. Source attribution of the changes in atmospheric methane for 2006-2008. *Atmospheric Chemistry and Physics*. 2011;11(8):3689–3700.
146. Bergamaschi P, Krol M, Dentener F, Vermeulen A, Meinhardt F, Graul R, Ramonet M, Peters W, Dlugokencky EJ. Inverse modelling of national and European CH₄ emissions using the atmospheric zoom model TM5. *Atmospheric Chemistry and Physics*. 2005;5:2431–2460.
147. Bergamaschi P, Krol M, Meirink JF, Dentener F, Segers A, van Aardenne J, Monni S, Vermeulen AT, Schmidt M, Ramonet M, Yver C, Meinhardt F, Nisbet EG, Fisher RE, O'Doherty S, Dlugokencky EJ. Inverse modeling of European CH₄ emissions 2001-2006. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*. 2010;115(D22309).
148. Draxler RR, Hess GD. Description of the HYSPLIT_4 modeling system. Silver Spring, MD: NOAA Air Resources Laboratory; 1997. (NOAA Technical Memorandum ERL ARL-224).
149. Lin JC, Gerbig C, Wofsy SC, Andrews AE, Daube BC, Davis KJ, Grainger CA. A near-field tool for simulating the upstream influence of atmospheric observations: The Stochastic Time-Inverted Lagrangian Transport (STILT) model. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*. 2003;108(D16).
150. Gourdji SM, Mueller KL, Yadav V, Huntzinger DN, Andrews AE, Trudeau M, Petron G, Nehrkorn T, Eluszkiewicz J, Henderson J, Wen D, Lin J, Fischer M, Sweeney C, Michalak AM. North American CO₂ exchange: Inter-comparison of modeled estimates with results from a fine-scale atmospheric inversion. *Biogeosciences*. 2012;9(1):457–475.
151. Barkley ZR, Lauvaux T, Davis KJ, Deng A, Miles NL, Richardson SJ, Cao Y, Sweeney C, Karion A, Smith M, Kort EA, Schwietzke S. Quantifying methane emissions from natural gas production in north-eastern Pennsylvania. *Atmospheric Chemistry and Physics*. 2017;17:13941–13966.
152. Karion A, Sweeney C, Kort EA, Shepson PB, Brewer A, Cambaliza M, Conley SA, Davis K, Deng AJ, Hardesty M, Herndon SC, Lauvaux T, Lavoie T, Lyon D, Newberger T, Petron G, Rella C, Smith M, Wolter S, Yacovitch TI, Tans P. Aircraft-based estimate of total methane emissions from the Barnett Shale region. *Environmental Science & Technology*. 2015;49(13):8124–8131.
153. Schwietzke S, Petron G, Conley S, Pickering C, Mielke-Maday I, Dlugokencky EJ, Tans PP, Vaughn T, Bell C, Zimmerle D, Wolter S, King CW, White AB, Coleman T, Bianco L, Schnell RC. Improved mechanistic understanding of natural gas methane emissions from spatially resolved aircraft measurements. *Environmental Science & Technology*. 2017; 51(12): 7286–7294.
154. Frankenberg C, Thorpe AK, Thompson DR, Hulley G, Kort EA, Vance N, Borchardt J, Krings T, Gerilowski K, Sweeney C, Conley S, Bue BD, Aubrey AD, Hook S, Green RO. Airborne methane remote measurements reveal heavy-tail flux distribution in Four Corners region. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*. 2016;113(35):9734–9739.
155. Kort EA, Frankenberg C, Costigan KR, Lindenmaier R, Dubey MK, Wunch D. Four Corners: The largest US methane anomaly viewed from space. *Geophysical Research Letters*. 2014;41(19):6898–6903.
156. Smith ML, Gvakharia A, Kort EA, Sweeney C, Conley SA, Faloona I, Newberger T, Schnell R, Schwietzke S, Wolter S. Airborne quantification of methane emissions over the Four Corners region. *Environmental Science & Technology*. 2017;51(10):5832–5837.
157. Zavala-Araiza D, Lyon DR, Alvarez RA, Davis KJ, Harriss R, Herndon SC, Karion A, Kort EA, Lamb BK, Lan X, Marchese AJ, Pacala SW, Robinson AL, Shepson PB, Sweeney C, Talbot R, Townsend-Small A, Yacovitch TI, Zimmerle DJ, Hamburg SP. Reconciling divergent estimates of oil and gas methane emissions. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*. 2015;112(51):15597–15602.
158. Bell CS, Vaughn TL, Zimmerle D, Herndon SC, Yacovitch TI, Heath GA, Petron G, Edie R, Field RA, Murphy SM, Robertson AM, Soltis J. Comparison of methane emission estimates from multiple

measurement techniques at natural gas production pads. *Elementa: Science of the Anthropocene*. 2017;5(71).

159. Zimmerle D, Pétron G, Pickering C, Vaughn T, Bell C, Schwietzke S, Mielke-Maday I, Heath G, Nummedal D, Howell C. Final Report: Reconciling Top-down and Bottom-up Methane Emission Estimates from Onshore Oil and Gas Development in Multiple Basins: Report on Fayetteville Shale Study. Houston, TX: Research Partnership to Secure Energy for America; 2016. [September 19, 2017]. [http://www.rpsea.org/media/files/project/5b5aa118/12122-95-FR-Unconventional Greenhouse Gas and Air Pollutant Estimates in DJ Basin V12_12-19-16.pdf](http://www.rpsea.org/media/files/project/5b5aa118/12122-95-FR-Unconventional_Greenhouse_Gas_and_Air_Pollutant_Estimates_in_DJ_Basin_V12_12-19-16.pdf).

160. Zimmerle DJ, Williams LL, Vaughn TL, Quinn C, Subramanian R, Duggan GP, Willson B, Opsomer JD, Marchese AJ, Martinez DM, Robinson AL. Methane emissions from the natural gas transmission and storage system in the United States. *Environmental Science & Technology*. 2015;49(15):9374–9383.

161. P. Forster, V. Ramaswamy, P. Artaxo, T. Berntsen, R. Betts, D.W. Fahey, J. Haywood, J. Lean, D .C. Lowe, G. Myhre, J. Nganga, R. Prinn, G. Raga, M. Schulz, R. Van Dorland. Changes in atmospheric constituents and in radiative forcing. In: S. Solomon, D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, H.L. Miller (Eds.), *Climate Change 2007: The Physical Science Basis Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge University Press, Cambridge, UK (2007): 131-217.

162. D.J. Wuebbles. Nitrous oxide: no laughing matter. *Science*, 326 (2009): 56-57.

163. P. Crutzen. Review of upper atmospheric photochemistry. *Can. J. Chem.* 52 (1974): 1569-1581

164. A.R. Ravishankara, J.S. Daniel, R.W. Portmann. Nitrous oxide (N₂O): the dominant ozone-depleting substance emitted in the 21st century. *Science*, 326 (2009): 123-125

165. L. Denman, G. Brasseur, A. Chidthaisong, P. Ciais, P.M. Cox, R.E. Dickinson, D. Hauglustaine, C. Heinze, E. Holland, D. Jacob, U. Lohmann, S. Ramachandran, P.L. da Silva Dias, S.C. Wofsy, X. Zhang. Couplings between changes in the climate system and biogeochemistry. In: S. Solomon, D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, H.L. Miller (Eds.), *Climate Change 2007: The Physical Science Basis Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge University Press, Cambridge, UK (2007): 501-568.

166. J.N. Galloway, F.J. Dentener, D.G. Capone, E.W. Boyer, R.W. Howarth, S.P. Seitzinger, G.P. Asner, C.C. Cleveland, P.A. Green, E.A. Holland, D.M. Karl, A.F. Michaels, J.H. Porter, A.R. Townsend, C.J. Vorosmarty Nitrogen cycles: past, present, and future. *Biogeochemistry*, 70 (2004): 153-226.

167. J.N. Galloway, J.D. Aber, J.W. Erisman, S.P. Seitzinger, R.W. Howarth, E.B. Cowling, B.J. Cosby. The nitrogen cascade. *Bioscience*, 53 (2003): 341-356.

168. E. Lokupitiya, K. Paustian. Agricultural soil greenhouse gas emissions: a review of National Inventory Methods. *J. Environ. Qual.*, 35 (2006): 1413-1427.

169. A. Syakila, C. Kroeze. The global nitrous oxide budget revisited *Greenhouse Gas Meas. Manage.* 1 (2011): 17-26.

170. R.C. Dalal, D.E. Allen. Greenhouse gas fluxes from natural ecosystems. *Aust. J. Bot.*, 56 (2008): 369-407.

171. IPCC, Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, IGES, Japan, Hayama, Japan, 2006.

172. USEPA, Methane and Nitrous Oxide Emissions from Natural Sources, Washington, DC, 2010.

173. R.C. Dalal, W.J. Wang, G.P. Robertson, W.J. Parton. Nitrous oxide emission from Australian agricultural lands and mitigation options: a review. *Aust. J. Soil Res.*, 41 (2003): 165-195.

174. R. Farquharson, J. Baldock. Concepts in modelling N_2O emissions from land use. *Plant Soil*, 309 (2008): 147-167.
175. C.A.M. Brenninkmeijer, C. Janssen, J. Kaiser, T. Röckmann, T.S. Rhee, S.S. Assonov. Isotope effects in the chemistry of atmospheric trace compounds. *Chem. Rev.*, 103 (2003): 5125-5162.
176. N. Yoshida, S. Toyoda. Constraining the atmospheric N_2O budget from intramolecular site preference in N_2O isotopomers. *Nature*, 405 (2000): 330-334.
177. C.A.M. Brenninkmeijer, T. Rockmann. Mass spectrometry of the intramolecular nitrogen isotope distribution of environmental nitrous oxide using fragment-ion analysis. *Rapid Commun. Mass Spectrom.* 13 (1999): 2028-2033.
178. F. Turatti, D.W.T. Griffith, S.R. Wilson, M.B. Esler, T. Rahn, H. Zhang, G.A. Blake
179. Positionally dependent N-15 fractionation factors in the UV photolysis of N_2O determined by high resolution FTIR spectroscopy. *Geophys. Res. Lett.* 27 (2000): 2489-2492.
180. H. Zhang, P.O. Wennberg, V.H. Wu, G.A. Blake. Fractionation of (NNO)-N-14-N-15-O-16 and (NNO)-N-15-N-14-O-16 during photolysis at 213 nm. *Geophys. Res. Lett.* 27 (2000): 2481-2484.
181. S. Toyoda, H. Mutoke, H. Yamagishi, N. Yoshida, Y. Tanji. Fractionation of N_2O isotopomers during production by denitrifier. *Soil Biol. Biochem.*, 37 (2005): 1535-1545.
182. S. Park, P. Croteau, K.A. Boering, D.M. Etheridge, D. Ferretti, P.J. Fraser, K.-R. Kim, P.B. Krummel, R.L. Langenfelds, T.D. van Omen, L.P. Steele, C.M. Trudinger. Trends and seasonal cycles in the isotopic composition of nitrous oxide since. *Nat. Geosci.* 5 (2012) (1940): 261-265.
183. S. Park, T. Pérez, K.A. Boering, S.E. Trumbore, J. Gil, S. Marquina, S.C. Tyler. Can N_2O stable isotopes and isotopomers be useful tools to characterize sources and microbial pathways of N_2O production and consumption in tropical soils? *Global Biogeochem. Cycles*, 25 (2011): 1-16.
184. T. Pérez, S.E. Trumbore, S.C. Tyler, P.A. Matson, I. Ortiz Monaterio, T. Rahn, D.W.T. Griffith. Identifying the agricultural imprint on the global N_2O budget using stable isotopes. *J. Geophys. Res.: Atmos.* 106 (2001): 9869-9878.
185. T. Röckmann, J. Kaiser, C.A.M. Brenninkmeijer. The isotopic fingerprint of the pre-industrial and the anthropogenic N_2O source. *Atmos. Chem. Phys.*, 3 (2003): 315-323.
186. Y.L. Yung, C.E. Miller. Isotopic fractionation of stratospheric nitrous oxide. *Science*, 278 (1997): 1778-1780.
187. P. Wunderlin, J. Mohn, A. Joss, L. Emmenegger, H. Siegrist. Mechanisms of N_2O production in biological wastewater treatment under nitrifying and denitrifying conditions. *Water Res.*, 46 (2012): 1027-1037.
188. WMO, GAW Report No. 185 Guidelines for the Measurement of Methane and Nitrous Oxide and their Quality Assurance, 2009.
189. O.T. Denmead. Approaches to measuring fluxes of methane and nitrous oxide between landscapes and the atmosphere. *Plant Soil*, 309 (2008): 5-24.
190. J. Weimann. Toxicity of nitrous oxide. *Best Pract. Res., Clin. Anaesthesiol.* 7 (2003): 47-61.
191. NIOSH, Nitrous oxide: Method 6600, Cincinnati, OH, 1984.
192. NIOSH, Control of occupational exposure to N_2O in the dental operator Cincinnati, OH, 1977.
193. O.T. Denmead, R. Leuning, I. Jamie, D.W.T. Griffith. Nitrous oxide emissions from grazed pastures: measurements at different scales. *Chemosphere: Global Change Sci.*, 2 (2000): 301-312.

194. D.A. Turner, D. Chen, I.E. Galbally, R. Leuning, R.B. Edis, Y. Li, K. Kelly, F. Phillips. Spatial variability of nitrous oxide emissions from an Australian irrigated dairy pasture. *Plant Soil*, 309 (2008): 77-88.
195. S.K. Jones, D. Famulari, C.F. Di Marco, E. Nemitz, U.M. Skiba, R.M. Rees, M.A. Sutton. Nitrous oxide emissions from managed grassland: a comparison of Eddy covariance and static chamber measurements. *Atmos. Meas. Tech.*, 4 (2011): 1079-1112.
196. E. Pattey, G.C. Edwards, R.L. Desjardins, D.J. Pennock, W. Smith, B. Grant, J.I. MacPherson. Tools for quantifying N₂O emissions from agroecosystems. *Agric. For. Meteorol.*, 142 (2007): 103-119.
197. R. Phillips, D.W.T. Griffith, F. Dijkstra, G. Lugg, R. Lawrie, B. Macdonald. Tracking short-term effects of Nitrogen-15 addition on nitrous oxide fluxes using Fourier-transform infrared spectroscopy. *J. Environ. Qual.*, 42 (2013): 1327-1340.
198. C. Meyer, I. Galbally, Y. Wang, I. Weeks, I. Jamie, D.W.T. Griffith, Two Automatic Chamber Techniques for Measuring Soil-Atmosphere Exchanges of Trace Gases and Results of their use in the OASIS Field Experiment Two Automatic Chamber Techniques for Measuring Soil-Atmosphere Exchanges of Trace Gases and Results of their use, 2001.
199. F.A. Phillips, R. Leuning, R. Baigent, K. Kelly, O.T. Denmead. Nitrous oxide flux measurements from an intensively managed irrigated pasture using micrometeorological techniques. *Agric. For. Meteorol.*, 143 (2007): 92-105.
200. A. Neftel, C. Ammann, C. Fischer, C. Spirig, F. Conen, L. Emmenegger, B. Tuzson, S. Wahlen. N₂O exchange over managed grassland: application of a quantum cascade laser spectrometer for micrometeorological flux measurements. *Agric. For. Meteorol.*, 150 (2010): 775-785.
201. A. Brut, D. Legain, P. Durand, P. Laville. A relaxed Eddy accumulator for surface flux measurements on ground-based platforms and aboard research vessels. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, 21 (2004): 411-427.
202. D. Fowler, K.J. Hargreaves, U. Skiba, R. Milne, M.S. Zahniser, J.B. Moncrieff, I.J. Beverland, M. W. Gallagher, P. Ineson, J. Garland, C. Johnson. Measurements of CH₄ and N₂O fluxes at the landscape scale using micrometeorological methods. *Philos. Trans. R. Soc. A*, 351 (1995): 339-356.
203. E. Pattey, I. Strachan, R. Desjardins, G. Edwards, D. Dow, J. Macpherson. Application of a tunable diode laser to the measurement of CH₄ and N₂O fluxes from field to landscape scale using several micrometeorological techniques. *Agric. For. Meteorol.*, 136 (2006): 222-236.
204. L.A. Harper, O.T. Denmead, T.K. Flesch. Micrometeorological techniques for measurement of enteric greenhouse gas emissions. *Anim. Feed Sci. Technol.*, 166-167 (2011): 227-239.
205. O.T. Denmead, L.A. Harper, J.R. Freney, D.W.T. Griffith, R. Leuning, R.R. Sharpe. A mass balance method for non-intrusive measurements of surface-air trace gas exchange. *Atmos. Environ.*, 32 (1998): 3679-3688.
206. T.K. Flesch, J.D. Wilson, E. Yee. Backward-time Lagrangian Stochastic Dispersion Models and their application to estimate gaseous emissions. *J. Appl. Meteorol.*, 34 (1995): 1320-1332.
207. D. Griffith, N. Deutscher, P. Krummel, P. Fraser, P. Steele, An FTIR analyser for simultaneous high precision measurements of CO₂, CH₄, CO, N₂O and $\delta^{13}C$ in CO₂ Comparison with LoFlo and AGAGE measurements at Cape Grim, 15th WMO/IAEA Meeting of Experts on Carbon dioxide, other greenhouse gases and related tracers measurement techniques, World Meteorological Organization, 2011.
208. A. Fried, G. Diskin, P. Weibring, D. Richter, J.G. Walega, G. Sachse, T. Slate, M. Rana, J. Podolske. Tunable infrared laser instruments for airborne atmospheric studies. *Appl. Phys. B*, 92 (2008): 409-417.

209. A. Fried, D. Richter. Analytical techniques for atmospheric measurement. In: D.E. Heard (Ed.), *Analytical Techniques for Atmospheric Measurement*, Blackwell Publishing, Oxford, UK (2006): 72-146.
210. J.S. Li, W. Chen, H. Fischer. Quantum cascade laser spectrometry techniques: a new trend in atmospheric chemistry. *Appl. Spectrosc. Rev.* 48 (2013): 523-559.
211. C.L. Schiller, H. Bozem, C. Gurk, U. Parchatka, R. Königstedt, G.W. Harris, J. Lelieveld, H. Fischer. Applications of quantum cascade lasers for sensitive trace gas measurements of CO, CH₄, N₂O and HCHO. *Appl. Phys. B*, 92 (2008): 419-430.
212. C. Webster, R. May, C. Trimble, R. Chave, J. Kendall. Aircraft (ER-2) laser infrared absorption spectrometer (ALIAS) for in situ stratospheric measurements of HCl, N₂O, CH₄, NO₂ and HNO₃. *Appl. Opt.*, 33 (1994): 454-472.
213. J.F. Hamilton, A.C. Lewis. Chromatographic methods. In: D.E. Heard (Ed.), *Analytical Techniques for Atmospheric Measurement*, Blackwell Publishing (2006): 361-405.
214. C.E. Kolb, J.C. Wormhoudt, M.S. Zahniser, P.A. Matson, R.C. Harriss. Recent advances in spectroscopic instrumentation for measuring stable gases in the natural environment. P.A. Matson, R.C. Harris (Eds.), *Biogenic Trace Gases: Measuring Emissions from Soil and Water*, Blackwell Scientific Publications, Oxford (1995): 259-290.
215. R. Langenfelds, L.P. Steele, M. van der Schoot, L. Cooper, D. Spencer, P. Krummel, Atmospheric methane, carbon dioxide, hydrogen, carbon monoxide and nitrous oxide from Cape Grim flask air samples analysed by gas chromatography, Baseline Atmospheric Program Australia, 2003.
216. C.D. Nevison, E. Dlugokencky, G. Dutton, J.W. Elkins, P. Fraser, B. Hall, P.B. Krummel, R.L. Langenfelds, S. O'Doherty, R.G. Prinn, L.P. Steele, R.F. Weiss. Exploring causes of interannual variability in the seasonal cycles of tropospheric nitrous oxide. *Atmos. Chem. Phys.*, 11 (2011): 3713-3730.
217. N. Loftfield, H. Flessa, J. Augustin, F. Beese. Automated gas chromatographic system for rapid analysis of the atmospheric trace gases methane, carbon dioxide, and nitrous oxide. *J. Environ. Qual.*, 26 (1997): 560-564.
218. R.L. Thompson, A.C. Manning, E. Gloor, U. Schultz, T. Seifert, F. Hänsel, A. Jordan, M. Heiman. In-situ measurements of oxygen, carbon monoxide and greenhouse gases from Ochsenkopf tall tower in Germany. *Atmos. Meas. Tech.*, 2 (2009): 573-591.
219. A.T. Vermeulen, A. Hensen, M.E. Popa, W.C.M. van den Bulk, P.A.C. Jongejan. Greenhouse gas observations from Cabauw Tall Tower (1992–2010). *Atmos. Meas. Tech.*, 4 (2011): 617-644.
220. L. Haszpra, Z. Barcza, D. Hidy, I. Szilágyi, E. Dlugokencky, P. Tans. Trends and temporal variations of major greenhouse gases at a rural site in Central Europe. *Atmos. Environ.*, 42 (2008): 8707-8716.
221. P.M. Crill, J.H. Butler, D.J. Cooper, P.C. Novelli, P.A. Matson, R.C. Harriss. Standard analytical methods for measuring trace gases in the environment. In: P.A. Matson, R.C. Harris (Eds.), *Biogenic Trace Gases: Measuring Emissions from Soil and Water*, Blackwell Scientific Publications, Oxford (1995): 164-204.
222. X. Zheng, B. Mei, Y. Wang, B. Xie, Y. Wang, H. Dong, H. Xu, G. Chen, Z. Cai, J. Yue, J. Gu, F. Su, J. Zou, J. Zhu. Quantification of N₂O fluxes from soil–plant systems may be biased by the applied gas chromatograph methodology. *Plant Soil*, 311 (2008): 211-234.
223. Y. Wang, Y. Wang, H. Ling. A new carrier gas type for accurate measurement of N₂O by GC-ECD. *Adv. Atmos. Sci.*, 27 (2010): 1322-1330.
224. WMO, Global atmosphere watch measurements guide – global atmosphere watch report series, World Meteorological Organization, Geneva, 2001.

225. S.V.D. Laan, R.E.M. Neubert, H.A.J. Meijer. Techniques A single gas chromatograph for accurate atmospheric mixing ratio measurements of CO₂, CH₄, N₂O, SF₆ and CO. *Atmos. Meas. Tech.*, 2 (2009): 549-559.
226. S.R. Drescher, S.D. Brown. Solid phase microextraction-gas chromatographic-mass spectrometric determination of nitrous oxide evolution to measure denitrification in estuarine soils and sediments. *J. Chromatogr. A*, 1133 (2006): 300-304.
227. M.V. Machavaram, J.J. Beaulieu, M.A. Mills. Direct gas injection method: a simple modification to an elemental analyzer/isotope ratio mass spectrometer for stable isotope analysis of N and C from N₂O and CO₂ gases in nanomolar concentrations. *Rapid Commun. Mass Spectrom.*, 27 (2013): 97-102.
228. K.E. Potter, S. Ono, R.G. Prinn. Fully automated, high-precision instrumentation for the isotopic analysis of tropospheric N₂O using continuous flow isotope ratio mass spectrometry. *Rapid Commun. Mass Spectrom.*, 27 (2013): 1723-1738.
229. A. Gonzalez, S. Garrigues, M. de la Guardia, S. Armenta. The ways to the trace level analysis in infrared spectroscopy. *Anal. Methods*, 3 (2011): 43-52.
230. P.R. Griffiths, J.A. de Haseth. *Fourier Transform Infrared Spectroscopy*
231. (second ed.), John Wiley & Sons Inc, New Jersey (2007).
232. L.S. Rothman, I.E. Gordon, A. Barbe, D.C. Benner, P.E. Bernath, M. Birk, V. Boudon, L.R. Brown, A. Campargue, J.P. Champion, K. Chance, L.H. Coudert, V. Dana, V.M. Devi, S. Fally, J.M. Flaud, R.R. Gamache, A. Goldman, D. Jacquemart, I. Kleiner, N. Lacome, W.J. Lafferty, J.Y. Mandin, S.T. Massie, S.N. Mikhailenko, C.E. Miller, N. Moazzen-Ahmadi, O.V. Naumenko, A.V. Nikitin, J. Orphal, V.I. Perevalov, A. Perrin, A. Predoi-Cross, C.P. Rinsland, M. Rotger, M. Simeckova, M.A.H. Smith, K. Sung, S.A. Tashkun, J. Tennyson, R.A. Toth, A.C. Vandaele, J. Vander Auwera. The H.I.T.R.A.N. molecular spectroscopic database. *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer*, 110 (2009) (2008): 533-572.
233. N. Jacquinet-Husson, L. Crepeau, R. Armante, C. Boutammine, A. Chedin, N.A. Scott, C. Crevoisier, V. Capelle, C. Boone, N. Poulet-Crovisier, A. Barbe, A. Campargue, D.C. Benner, Y. Benilan, B. Bezard, V. Boudon, L.R. Brown, L.H. Coudert, A. Coustenis, V. Dana, V.M. Devi, S. Fally, A. Fayt, J.M. Flaud, A. Goldman, M. Herman, G.J. Harris, D. Jacquemart, A. Jolly, I. Kleiner, A. Kleinbohl, F. Kwabia-Tchana, N. Lavrentieva, N. Lacome, L.H. Xu, O.M. Lyulin, J.Y. Mandin, A. Maki, S. Mikhailenko, C.E. Miller, T. Mishina, N. Moazzen-Ahmadi, H.S.P. Muller, A. Nikitin, J. Orphal, V. Perevalov, A. Perrin, D.T. Petkie, A. Predoi-Cross, C.P. Rinsland, J.J. Remedios, M. Rotger, M.A.H. Smith, K. Sung, S. Tashkun, J. Tennyson, R.A. Toth, A.C. Vandaele, J. Vander Auwera.
234. The Edition of the GEISA spectroscopic database. *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer*, 112 (2011) (2009): 2395-2445.
235. D.W.T. Griffith. Synthetic calibration and quantitative analysis of gas-phase FT-IR spectra. *Appl. Spectrosc.*, 50 (1996): 59-70.
236. F.M. Kelliher, A.R. Reisinger, R.J. Martin, M.J. Harvey, S.J. Price, R.R. Sherlock. Measuring nitrous oxide emission rate from grazed pasture using Fourier-transform infrared spectroscopy in the nocturnal boundary layer. *Agric. For. Meteorol.*, 111 (2002): 29-38.
237. Z. Bacsik, J. Mink, G. Keresztury. FTIR spectroscopy of the atmosphere. I. Principles and methods. *Appl. Spectrosc. Rev.*, 39 (2004): 295-363.
238. D.W.T. Griffith, N.M. Deutscher, C.G.R. Caldwell, G. Kettlewell, M. Riggensbach, S. Hammer. A Fourier transform infrared trace gas analyser for atmospheric applications. *Atmos. Meas. Tech.*, 5 (2012): 3717-3769.

239. M.B. Esler, D.W.T. Griffith, F. Turatti, S.R. Wilson, T. Rahn, H. Zhang. N₂O concentration and flux measurements and complete isotopic analysis by FTIR spectroscopy. *Chemosphere: Global Change Sci.*, 2 (2000): 445-454.
240. M.B. Esler, D.W. Griffith, S.R. Wilson, L.P. Steele. Precision trace gas analysis by FT-IR spectroscopy. 1. Simultaneous analysis of CO₂, CH₄, N₂O, and CO in air. *Anal. Chem.*, 72 (2000): 206-215.
241. D.W.T. Griffith. FT-IR measurements of atmospheric trace gases and their fluxes. J. Chalmers, P. Griffiths (Eds.), *Handbook of Vibrational Spectroscopy*, John Wiley & Sons, West Sussex (2002): 2823-2841.
242. S. Hammer, D.W.T. Griffith, G. Konrad, S. Vardag, C. Caldow, I. Levin. Assessment of a multi-species in situ FTIR for precise atmospheric greenhouse gas observations. *Atmos. Meas. Tech.*, 6 (2013): 1153-1170.
243. G.C. Edwards, G.W. Thurtell, G.E. Kidd, G.M. Dias, C. Wagner-Riddle. A diode laser-based gas monitor suitable for measurement of trace gas exchange using micrometeorological techniques. *Agric. For. Meteorol.*, 115 (2003): 71-89.
244. M.W. Sigrist, R. Bartlome, D. Marinov, J.M. Rey, D.E. Vogler, H. Wächter. Trace gas monitoring with infrared laser-based detection schemes. *Appl. Phys. B*, 90 (2008): 289-300.
245. J. Faist, F. Capasso, D.L. Sivco, C. Sirtori, A.L. Hutchinson. Quantum Cascade Laser. *Science*, 264 (1994): 553-556.
246. A. Kosterev, G. Wysocki, Y. Bakhirkin, S. So, R. Lewicki, M. Fraser, F. Tittel, R.F. Curl. Application of quantum cascade lasers to trace gas analysis. *Appl. Phys. B*, 90 (2008): 165-176.
247. J. McManus, M.S. Zahniser, J.H. Shorter, S. Herndon, E. Wood. Application of quantum cascade lasers to high-precision atmospheric trace gas measurements, *Opt. Eng.* (2010) 111-124.
248. K. Namjou, S. Cai, E. Whittaker, J. Faist, C. Gmachl, D.L. Sivco, A.Y. Cho. Sensitive absorption spectroscopy with a room-temperature distributed-feedback quantum-cascade laser. *Opt. Lett.* (1998): 219-221.
249. G.N. Rao, A. Karpf. Extremely sensitive detection of NO₂ employing off-axis integrated cavity output spectroscopy coupled with multiple-line integrated absorption spectroscopy. *Appl. Opt.*, 50 (2011): 1915-1924.
250. H. Waechter, J. Mohn, B. Tuzson, L. Emmenegger, M.W. Sigrist. Determination of N₂O isotopomers with quantum cascade laser-based absorption spectroscopy. *Opt. Express*, 16 (2008): 9239-9244.
251. H. Waechter, M.W. Sigrist. Mid-infrared laser spectroscopic determination of isotope ratios of N₂O at trace levels using wavelength modulation and balanced path length detection. *Appl. Phys. B*, 87 (2007): 539-546.
252. J. Mohn, B. Tuzson, A. Manninen, N. Yoshida, S. Toyoda, W.A. Brand, L. Emmenegger. Site selective real-time measurements of atmospheric N₂O isotopomers by laser spectroscopy. *Atmos. Meas. Tech.*, 5 (2012): 1601-1609.
253. J. Mohn, C. Guggenheim, B. Tuzson, M.K. Vollmer, S. Toyoda, N. Yoshida, L. Emmenegger. A liquid nitrogen-free preconcentration unit for measurements of ambient N₂O isotopomers by QCLAS. *Atmos. Meas. Tech.*, 3 (2010): 609-618.
254. J.B. McManus, J.H. Shorter, D.D. Nelson, M.S. Zahniser, D.E. Glenn, R.M. McGovern. Pulsed quantum cascade laser instrument with compact design for rapid, high sensitivity measurements of trace gases in air. *Appl. Phys. B*, 92 (2008): 387-392.

255. D.D. Nelson, B. McManus, S. Urbanski, S. Herndon, M.S. Zahniser. High precision measurements of atmospheric nitrous oxide and methane using thermoelectrically cooled mid-infrared quantum cascade lasers and detectors *Spectrochim. Acta, Part A*, 60 (2004): 3325-3335.
256. J.B. McManus, D.D. Nelson, S.C. Herndon, J.H. Shorter, M.S. Zahniser, S. Blaser, L. Hvozdar, A. Muller, M. Giovannini, J. Faist, Comparison of cw and pulsed operation with a TE-cooled quantum cascade infrared laser for detection of nitric oxide at 1900 cm⁻¹, *Appl. Phys. B: Lasers Opt.* 85 (2006) 235-241.
257. L. Joly, V. Zéninari, T. Decarpenterie, J. Cousin, B. Grouiez, D. Mammez, G. Durry, M. Carras, X. Marcadet, B. Parvitte. Continuous-wave quantum cascade lasers absorption spectrometers for trace gas detection in the atmosphere. *Laser Phys.*, 21 (2011): 805-812.
258. L. Joly, T. Decarpenterie, N. Dumelie, X. Thomas, I. Mappe-Fogaing, D. Mammez, R. Vallon, G. Durry, B. Parvitte, M. Carras, X. Marcadet, V. Zeninari. Development of a versatile atmospheric N₂O sensor based on quantum cascade laser technology at 4.5 μm. *Appl. Phys. B: Lasers Opt.*, 103 (2011): 717-723.
259. V. Zeninari, A. Grossel, L. Joly, T. Decarpenterie, B. Grouiez, B. Bonno, B. Parvitte. Photoacoustic spectroscopy for trace gas detection with cryogenic and room-temperature continuous-wave quantum cascade lasers. *Cent. Eur. J. Phys.*, 8 (2010): 194-201.
260. L. Joly, B. Parvitte, V. Catoire, G. Durry, G. Richard, B. Nicoulaud, V. Zeninari. Development of a spectrometer using continuous wave distributed feedback quantum cascade laser operating at room temperature. *Appl. Opt.*, 47 (2008): 1206-1214.
261. A. Grossel, V. Zéninari, B. Parvitte, L. Joly, D. Courtois, G. Durry
262. Quantum cascade laser spectroscopy of N₂O in the 7.9 μm region for the in situ monitoring of the atmosphere. *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer*, 109 (2008): 1845-1855.
263. C. Guimbaud, V. Catoire, S. Gogo, C. Robert, M. Chartier, F. Laggoun-Defarge, A. Grossel, P. Alberic, L. Pomathiod, B. Nicoulaud, G. Richard. A portable infrared laser spectrometer for flux measurements of trace gases at the geosphere-atmosphere interface. *Meas. Sci. Technol.*, 22 (2011): 1-17.
264. G.N. Rao, A. Karpf. High sensitivity detection of NO₂ employing cavity ring-down spectroscopy and an external cavity continuously tunable quantum cascade laser. *Appl. Opt.*, 49 (2010): 4906-4914.
265. A.A. Kosterev, F.K. Tittel. Chemical sensors based on quantum cascade lasers. *IEEE J. Quantum Electron.*, 38 (2002): 582-591.
266. B.A. Paldus, A.A. Kachanov. An historical overview of cavity- enhanced methods. *Can. J. Phys.*, 83 (2005): 975-999.
267. D.S. Baer, J.B. Paul, M. Gupta, A. O'Keefe. Sensitive absorption measurements in the near-infrared region using off-axis integrated-cavity-output spectroscopy. *Appl. Phys. B: Lasers Opt.*, 75 (2002): 261-265.
268. A. Grossel, V. Zéninari, B. Parvitte, L. Joly, D. Courtois. Optimization of a compact photoacoustic quantum cascade laser spectrometer for atmospheric flux measurements: application to the detection of methane and nitrous oxide. *Appl. Phys. B*, 88 (2007): 483-492.
269. A.A. Kosterev, Y.A. Bakhirkin, F.K. Tittel. Ultrasensitive gas detection by quartz-enhanced photoacoustic spectroscopy in the fundamental molecular absorption bands region. *Appl. Phys. B*, 80 (2004): 133-138.
270. J.S. Li, W.D. Chen, B.L. Yu. Recent Progress on Infrared Photoacoustic Spectroscopy Techniques. *Appl. Spectrosc. Rev.*, 46 (2011): 440-471.

271. C. Haisch. Photoacoustic spectroscopy for analytical measurements. *Meas. Sci. Technol.*, 23 (2012): p. 012001.
272. N.P. Revsbech. Analysis of microbial communities with electrochemical microsensors and microscale biosensors. *Methods Enzymol.* (2005): 147-166.
273. R.G. Compton, R.J. Northing. Novel amperometric sensor for the detection of the anesthetic gases isoflurane and nitrous oxide. *J. Chem. Soc., Faraday Trans.*, 86 (1990):1077-1081.
274. S. Floate, C.E.W. Hahn. The development of new microelectrode gas sensors: an odyssey Part V. Simultaneous electrochemical determination of oxygen, carbon dioxide and nitrous oxide gas mixtures in a non-aqueous solvent using membrane shielded gold microelectrodes. *J. Electroanal. Chem.*, 583 (2005): 203-211.
275. K. Andersen, T. Kjaer, N.P. Revsbech. An oxygen insensitive microsensor for nitrous oxide. *Sens. Actuators, B*, 81 (2001): 42-48.
276. R.L. Meyer, D.E. Allen, S. Schmidt. Nitrification and denitrification as sources of sediment nitrous oxide production: a microsensor approach. *Mar. Chem.*, 110 (2008): 68-76.
277. J. Foley, D. de Haas, Z. Yuan, P. Lant. Nitrous oxide generation in full-scale biological nutrient removal wastewater treatment plants. *Water Res.*, 44 (2010): 831-844.
278. B. Elberling, H.H. Christiansen, B.U. Hansen. High nitrous oxide production from thawing permafrost. *Nat. Geosci.*, 3 (2010): 332-335.
279. S. Jenni, J. Mohn, L. Emmenegger, K.M. Udert. Temperature dependence and interferences of NO and N₂O microelectrodes used in wastewater treatment. *Environ. Sci. Technol.*, 46 (2012): 2257-2266.
280. W. Tsugawa, H. Shimizu, M. Tatara, Y. Ueno, K. Kojima, K. Sode. Nitrous oxide sensing using oxygen-insensitive direct-electron-transfer-type nitrous oxide reductase. *Electrochemistry*, 80 (2012): 371-374.
281. L.I.B. Silva, T.A.P. Rocha-Santos, A.C. Duarte. Optical fiber analyzer for in situ determination of nitrous oxide in workplace environments. *J. Environ. Monit.*, 11 (2009): 852-857.
282. W. Krajewski, M. Kucharska, W. Wesolowski, J. Stetkiewicz, T. Wronska-Nofer
283. Occupational exposure to nitrous oxide – The role of scavenging and ventilation systems in reducing the exposure level in operating rooms. *Int. J. Hyg. Environ. Health*, 210 (2007):133-138.
284. B. Ruhland, T. Becker, G. Muller. Gas-kinetic interactions of nitrous oxides with SnO₂ surfaces. *Sens. Actuators, B*, 50 (1998): 85-94.
285. E. Kanazawa, M. Kugishima, K. Shimano, Y. Kanmura, Y. Teraoka, N. Miura, N. Yamazoe. Mixed-potential type N₂O sensor using stabilized zirconia- and SnO₂-based sensing electrode. *Sens. Actuators, B*, 75 (2001): 121-124.
286. E. Kanazawa, G. Sakai, K. Shimano, Y. Kanmura, Y. Teraoka, N. Miura, N. Yamazoe. Semiconductor gas sensor using SrO-modified SnO₂ for the detection of N₂O in air. *Electrochem. Solid-State Lett.*, 3 (2000): 572-574.
287. [https://www.epa.gov/energy/greenhouse-gases-equivalencies-calculator-calculations-and-references#:~:text=The%20average%20carbon%20dioxide%20coefficient,gallon%20barrel%20\(EPA%202023b\).](https://www.epa.gov/energy/greenhouse-gases-equivalencies-calculator-calculations-and-references#:~:text=The%20average%20carbon%20dioxide%20coefficient,gallon%20barrel%20(EPA%202023b).)
288. آمارنامه کشاورزی سال ۱۴۰۱. وزارت کشاورزی: مرکز آمار، فناوری اطلاعات و ارتباطات. تاریخ انتشار آذر ماه ۱۴۰۲
289. [https://www.epa.gov/snep/agriculture-and-aquaculture-food-thought#:~:text=A%20single%20cow%20produces%20between,\(Our%20World%20in%20Data\).](https://www.epa.gov/snep/agriculture-and-aquaculture-food-thought#:~:text=A%20single%20cow%20produces%20between,(Our%20World%20in%20Data).)

290. Pazhanivelan, S.; Sudarmanian, N.S.; Geethalakshmi, V.; Deiveegan, M.; Ragunath, K.; Sivamurugan, A.P.; Shanmugapriya, P. Assessing Methane Emissions from Rice Fields in Large Irrigation Projects Using Satellite-Derived Land Surface Temperature and Agronomic Flooding: A Spatial Analysis. *Agriculture* **2024**, *14*, 496. <https://doi.org/10.3390/agriculture14030496>
291. آمارنامه مصرف فرآورده های نفتی انرژی زا. اداره انتشارات روابط عمومی شرکت ملی پخش فرآورده های نفتی ایران. ۱۳۹۷.
292. سهم مصرف گاز طبیعی در بخش های گوناگون اقتصاد ایران.
- <https://energyexpress.ir/%D9%85%D8%B5%D8%B1%D9%81-%DA%AF%D8%A7%D8%B2-%D8%B7%D8%A8%DB%8C%D8%B9%DB%8C-%D8%AF%D8%B1-%D8%A8%D8%AE%D8%B4%D9%87%D8%A7%DB%8C-%D9%85%D8%AE%D8%AA%D9%84%D9%81-%D8%A7%D9%82%D8%AA%D8%B5%D8%A7/>
293. Iran's Third National Communication to UNFCCC. 2017. National Climate Change Office, Department of Environment, The Government of the Islamic Republic of Iran. 256pp.
294. India Third National Communication and Initial Adaptation Communication. 2023. <https://unfccc.int/documents/636235>.
295. Mexico's Third National Communication to the United Nations Framework Convention on Climate Change. 2006. <https://unfccc.int/documents/125274>.
296. EIGHTH NATIONAL COMMUNICATION AND FIFTH BIENNIAL REPORT OF TÜRKİYE UNDER THE UNFCCC. 2023. <https://unfccc.int/documents/638342>.
297. PAKISTAN'S SECOND NATIONAL COMMUNICATION ON CLIMATE CHANGE. 2018. <https://unfccc.int/documents/199292>.
298. Egypt Third National Communication Under the United Nations Framework Convention on Climate Change. 2016. <https://unfccc.int/documents/77569>.
299. <https://www.fsa.usda.gov/tools/informational/farm-bill>.
300. IRA Section 21001 – Climate Smart Agricultural Conservation Investments: Section 21001 of the IRA appropriates to the U.S. Department of Agriculture (“USDA”) funding to carry out the following programs under the Food Security Act of 1985:
 - 1) for the Environmental Quality Incentives Program, \$8.45 billion;
 - 2) for the Conservation Stewardship Program, \$3.25 billion;
 - 3) for the Agricultural Conservation Easement Program, \$1.4 billion;
 - 4) for the Regional Conservation Partnership Program, \$4.95 billion.<https://iratracker.org/programs/ira-section-21001-climate-smart-agricultural-conservation-investments/>
301. IRA Section 21002 – Conservation Technical Assistance and a Carbon Sequestration and GHG Quantification Program: Section 21002 appropriates the following amounts to USDA for the fiscal year 2022, with such funds to be available until September 30, 2031:
 - 1) \$1 billion to provide conservation technical assistance through the National Resources Conservation Service (“NRCS”); and
 - 2) \$300 million to carry out a carbon sequestration and greenhouse gas emissions quantification program. The NRCS must, itself or through technical service providers and other partners, collect field-based data to assess program outcomes and used to track both emissions and carbon sequestration trends through the Greenhouse Gas Inventory and Assessment Program.In addition to the above amounts, \$100 million is appropriated to USDA for administrative costs relating to implementation of the programs covered by the section.
The funding is to be made available to USDA in yearly allocations, starting in fiscal year 2023 and ending in fiscal year 2026. In using the funding, the USDA must prioritize proposals and projects that reduce methane or greenhouse gas emissions, directly improve soil carbon or reduce nitrogen losses, or capture or sequester greenhouse gas emissions associated with agricultural production. The

USDA must also prioritize projects that mitigate or address climate change through the management of agricultural production, including by reducing or avoiding greenhouse gas emissions.

<https://iratracker.org/actions/usda-announces-3-billion-in-ira-funding-for-conservation-and-climate-programs/>

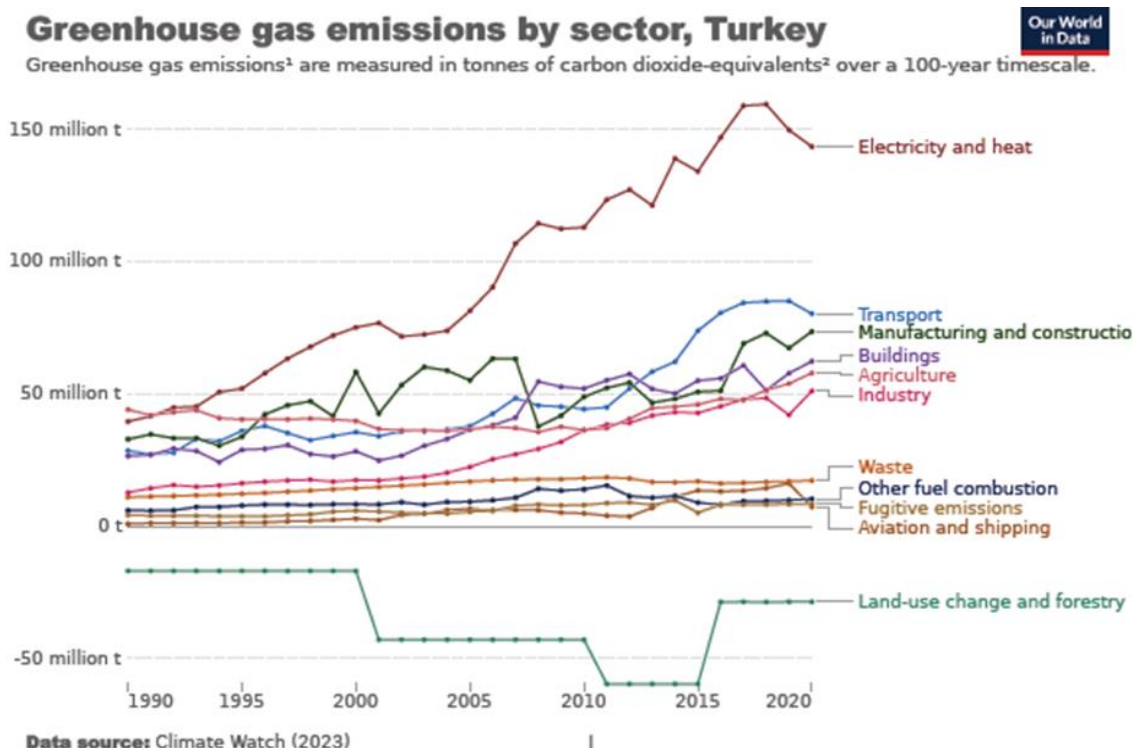
302. National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine; Division on Earth and Life Studies; Board on Environmental Studies and Toxicology; Board on Energy and Environmental Systems; Board on Earth Sciences and Resources; Board on Agriculture and Natural Resources; Board on Atmospheric Sciences and Climate; Committee on Anthropogenic Methane Emissions in the United States: Improving Measurement, Monitoring, Presentation of Results, and Development of Inventories. Improving Characterization of Anthropogenic Methane Emissions in the United States. Washington (DC): National Academies Press (US); 2018 Mar 27. 3, Methane Emission Measurement and Monitoring Methods. Available from: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK519293/>
303. Goodrich, A., T. James, and M. Woodhouse. 2012. "Residential, Commercial, and Utility-scale Photovoltaic System Prices in the United States: Current Drivers and Cost-Reduction Opportunities." Golden, CO: National Renewable Energy Laboratory.
304. https://www.fert.nic.in/urea_policy_administration
305. Kirkby, C.A., A.E. Richardson, L.J. Wade, J.W. Passioura, G.D. Batten, C. Blanchard, and J.A. Kirkegaard. 2014. "Nutrient Availability Limits Carbon Sequestration in Arable Soils." *Soil Biology & Biochemistry* 68: 402–402.
306. Powlson, D.S., C. Stirling, M. Jat, B. Gerard, C. Palm, P. Sanchez, and K. Cassman. 2014. "Limited Potential of No-Till Agriculture for Climate Change Mitigation." *Nature Climate Change* 4 (8): 678–683.
307. Powlson, D.S., C.M. Stirling, C. Thierfelder, R.P. White, and M.L. Jat. 2016. "Does Conservation Agriculture Deliver Climate Change Mitigation through Soil Carbon Sequestration in Tropical Agroecosystems?" *Agriculture, Ecosystems & Environment* 220: 164–174.
308. van Groenigen, J.W., C. van Kessel, B.A. Hungate, O. Oenema, D.S. Powlson, and K.J. van Groenigen. 2017. "Sequestering Soil Organic Carbon: A Nitrogen Dilemma." *Environmental Science & Technology* 51: 5738–4739.
309. Jiang Y., K.J. van Groenigen, S. Hung, B.A. Hungate, C. van Kessel, S. Hu, J. Zhang, et al. 2017. "Higher Yields and Lower Methane Emissions with New Rice Cultivars." *Global Change Biology* 23: 47828–4738.
310. Su, J., C. Hu, X. Yan, Y. Jin, Z. Chen, Q. Guan, Y. Wang, et al. 2015. "Expression of Barley SUSIBA2 Transcription Factor Yields High-Starch Low-Methane Rice." *Nature* 523: 62–606.
311. FDA Greenlights Bovaer: A Revolutionary Methane-Reducing Supplement for US Dairy Cattle Launching in 2024". 29 May 2024. Retrieved 2024-12-01.
312. Hanson, M. 2024. "What Can We Really Expect from Elanco's New Bovaer®?". *Dairy Herd*.
313. Kebreab, E.; Bannink, A.; Pressman, E. M.; Walker, N.; Karagiannis, A.; Van Gastelen, S.; Dijkstra, J. (2023). "A meta-analysis of effects of 3-nitrooxypropanol on methane emissions". *Journal of Dairy Science*. 106 (2): 927–936.
314. Impact of the financial crisis on carbon economics. Version 2.1 of the Global Greenhous Gas Abatement Cost Curve. Mckinsey & Compony. 2010. <https://www.mckinsey.com/capabilities/sustainability/our-insights/impact-of-the-financial-crisis-on-carbon-economics-version-21>.

پوست

انتشار کل گازهای گلخانه‌ای در کشورهای مورد بررسی

نمودارهای ۱۸ تا ۲۲ روند انتشار گازهای گلخانه‌ای چهارگانه (دی اکسید کربن، متان، اکسید نیتروز و گازهای F) را از سال ۱۹۹۰ تا ۲۰۲۰ برای کشورهای مورد بررسی در گزارش حاضر شامل ترکیه، پاکستان، مکزیک، مصر، و هند نشان می‌دهد. همان‌طور که مشخص است در تمامی کشورها از سال ۲۰۱۹ و با شروع همه‌گیری کرونا در سطح جهان، به دلیل پیامدهای اقتصادی گسترده آن بر بخش‌های مختلف اقتصادی کشورها، روند انتشار گازهای گلخانه‌ای در بسیاری از بخش‌ها کاهش یافته یا رشد صعودی پیشین آن متوقف شده و در سطحی نسبتاً ثابت باقی مانده است.

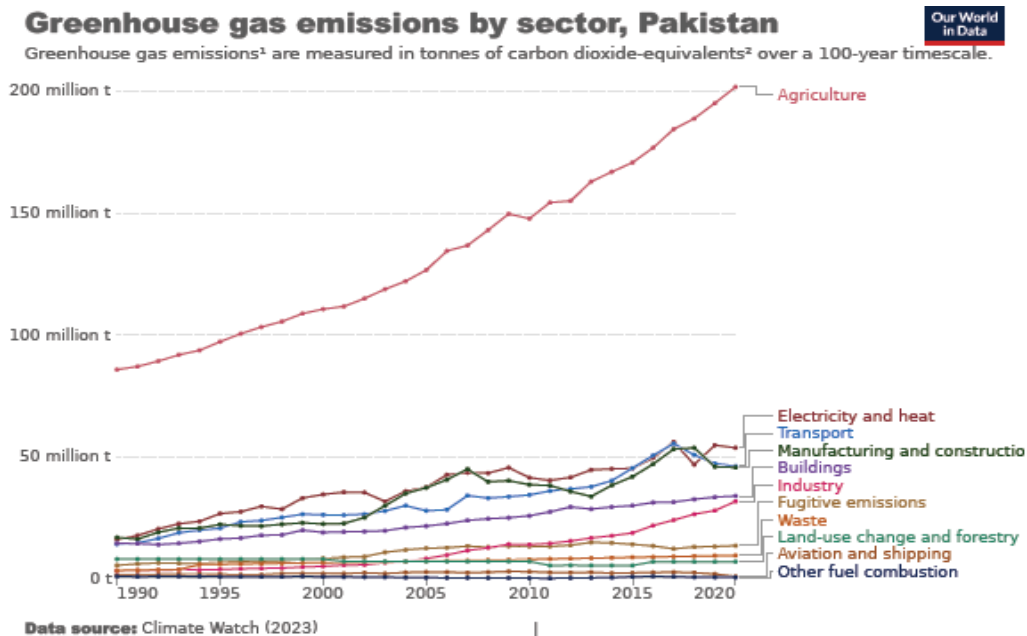
بر اساس نمودار ۱۸، در سال ۲۰۲۰ بخش کشاورزی در ترکیه پنجمین منبع انتشار گازهای گلخانه‌ای در میان بخش‌های مختلف اقتصادی بوده است. بیشترین سهم انتشار مربوط به بخش تولید برق و گرما بوده و پس از آن به ترتیب بخش‌های ترابری، تولید، ساخت و پرداخت و ساختمان‌های تجاری و مسکونی قرار دارند. در مقابل، بخش کاربری زمین، تغییر کاربری زمین و جنگلداری نقش جذب‌کننده گازهای گلخانه‌ای را ایفا کرده است.



شکل ۱۸- انتشار گازهای گلخانه‌ای در بخش‌های مختلف اقتصاد ترکیه در بازه زمانی ۱۹۹۰ و ۲۰۲۰ (میلیون تن معادل دی اکسیدکربن) [۱۵].

در کشور پاکستان، بخش کشاورزی با اختلاف قابل توجهی بیشترین سهم را در انتشار گازهای گلخانه‌ای دارد. پس از آن، بخش‌های تولید برق و گرما، حمل‌ونقل، صنعت (تولید، ساخت و پرداخت) و ساختمان‌های تجاری و مسکونی

در رده‌های بعدی قرار می‌گیرند. برخلاف برخی کشورها، بخش کاربری زمین، تغییر کاربری زمین و جنگلداری در پاکستان نه تنها در جذب گازهای گلخانه‌ای نقشی ندارد، بلکه خود به‌عنوان منبعی از انتشار این گازها نیز شناخته می‌شود (شکل ۱۹).



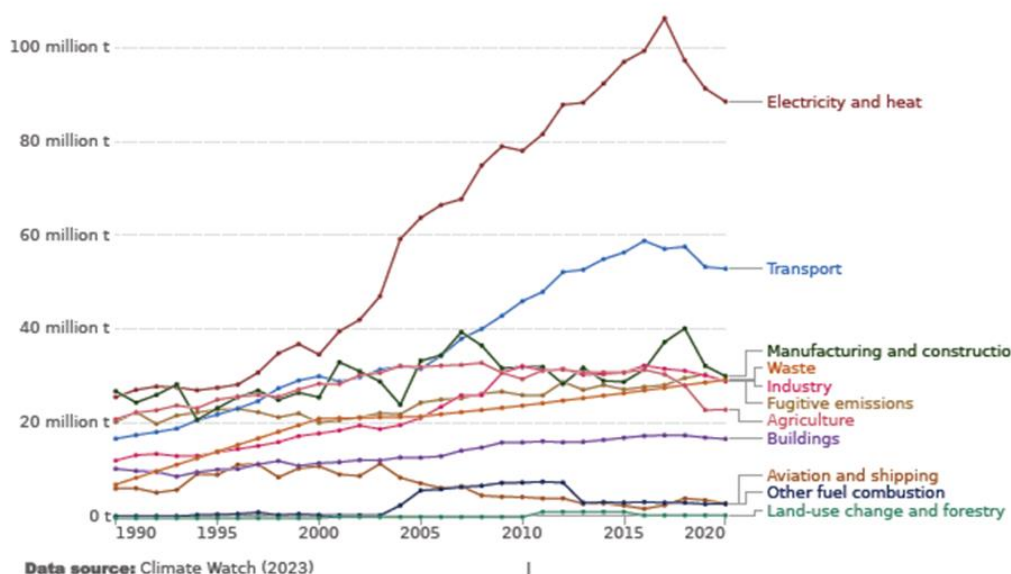
شکل ۱۹- انتشار گازهای گلخانه‌ای در بخشهای مختلف اقتصاد پاکستان در بازه زمانی ۱۹۹۰ و ۲۰۲۰ (میلیون تن معادل دی‌اکسیدکربن) [۱۵].

بر اساس شکل ۲۰، در کشور مصر بیشترین میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای مربوط به بخش تولید برق و گرما است. پس از آن، بخش‌های حمل‌ونقل، تولید، ساخت و پرداخت، مدیریت پسماند و صنعت در رتبه‌های بعدی قرار دارند. بخش کشاورزی نیز در رده هفتم قرار دارد. همچنین، بخش کاربری زمین، تغییر کاربری زمین و جنگلداری در مصر نقشی مؤثر در جذب گازهای گلخانه‌ای ایفا نمی‌کند.

Greenhouse gas emissions by sector, Egypt

Greenhouse gas emissions¹ are measured in tonnes of carbon dioxide-equivalents² over a 100-year timescale.

Our World
in Data



شکل ۲۰- انتشار گازهای گلخانه‌ای در بخشهای مختلف اقتصاد مصر در بازه زمانی ۱۹۹۰ و ۲۰۲۰ (میلیون تن معادل دی اکسیدکربن) [۱۵].

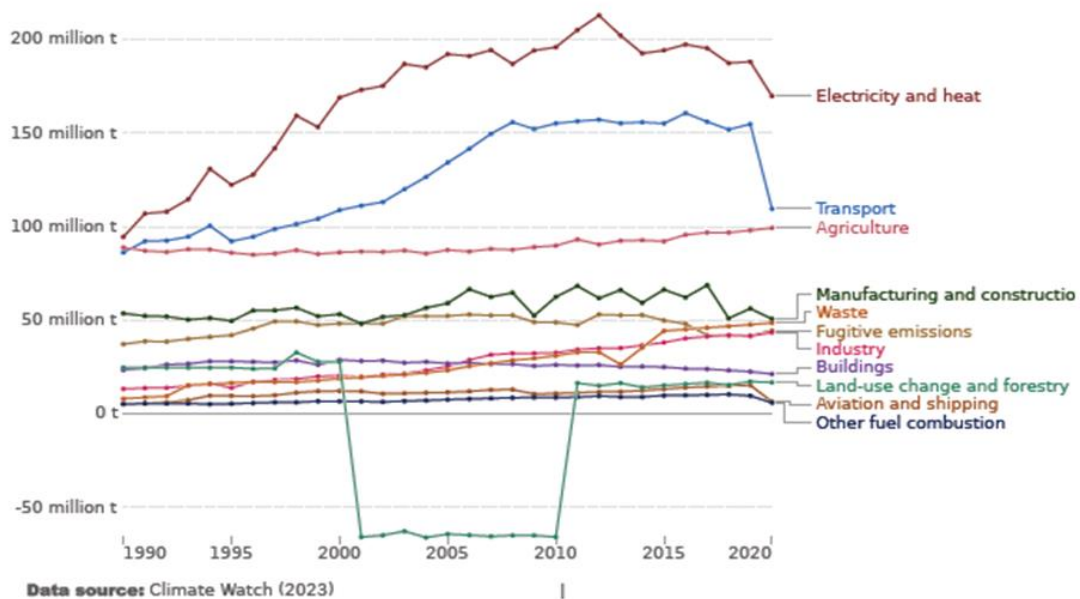
در کشور مکزیک در سال ۲۰۲۰، بخش تولید برق و گرما بیشترین سهم را در انتشار گازهای گلخانه‌ای به خود اختصاص داده است. پس از آن، بخش‌های ترابری، کشاورزی، تولید، ساخت و پرداخت و مدیریت پسماند در رده‌های بعدی قرار دارند. بخش کشاورزی به‌عنوان سومین منبع اصلی انتشار گازهای گلخانه‌ای در این کشور شناخته می‌شود. همچنین، بخش کاربری زمین، تغییر کاربری زمین و جنگلداری که تا پیش از سال ۲۰۱۱ نقشی مؤثر در جذب این گازها داشت، از آن سال به بعد این نقش کاهشی را از دست داده است (شکل ۲۱).

در کشور هند نیز در سال ۲۰۲۰، بخش تولید برق و گرما بیشترین سهم را در انتشار گازهای گلخانه‌ای داشته است و بخش کشاورزی پس از آن در رتبه دوم قرار دارد. شایان ذکر است که پیش از سال ۲۰۰۵، کشاورزی در جایگاه نخست انتشار قرار داشت و بخش برق و گرما در رتبه دوم بود. پس از این دو، بخش‌های تولید، ساخت و پرداخت، ترابری، ساختمان‌های تجاری و مسکونی و صنعت در رده‌های بعدی قرار دارند. همچنین، بخش کاربری زمین، تغییر کاربری زمین و جنگلداری در هند تنها سهمی جزئی در جذب گازهای گلخانه‌ای ایفا می‌کند (شکل ۲۲).

Greenhouse gas emissions by sector, Mexico

Greenhouse gas emissions¹ are measured in tonnes of carbon dioxide-equivalents² over a 100-year timescale.

Our World
in Data

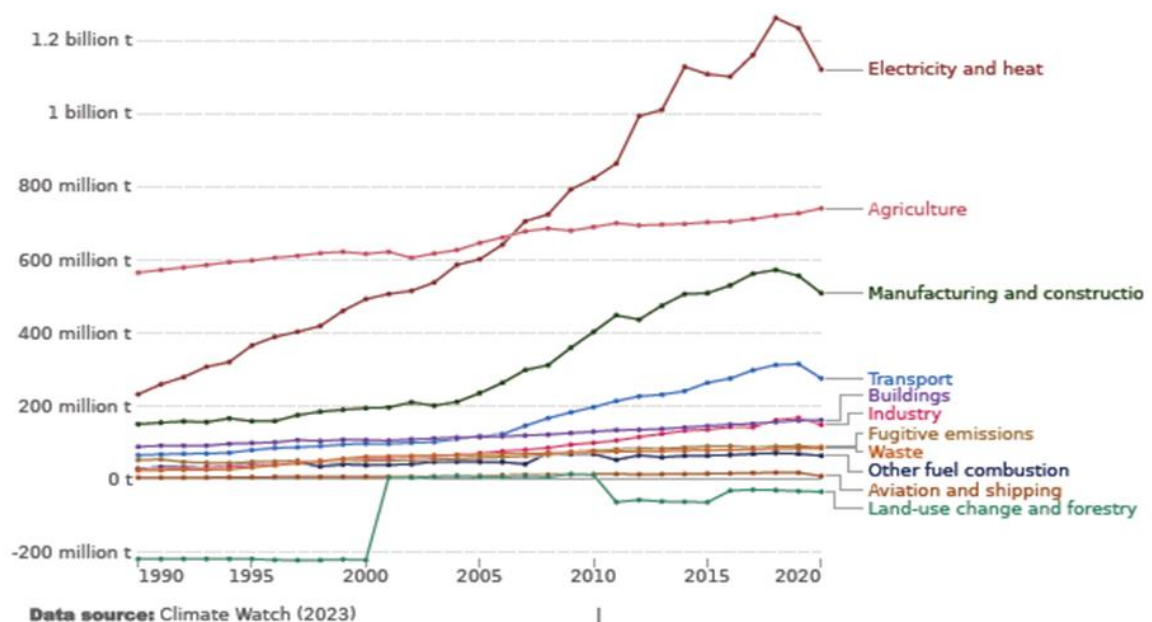


شکل ۲۱- انتشار گازهای گلخانه‌ای در بخشهای مختلف اقتصاد مکزیک در بازه زمانی ۱۹۹۰ و ۲۰۲۰ (میلیون تن معادل دی اکسیدکربن) [۱۵].

Greenhouse gas emissions by sector, India

Greenhouse gas emissions¹ are measured in tonnes of carbon dioxide-equivalents² over a 100-year timescale.

Our World
in Data



شکل ۲۲- انتشار گازهای گلخانه‌ای در بخشهای مختلف اقتصاد هند در بازه زمانی ۱۹۹۰ و ۲۰۲۰ (میلیون تن معادل دی اکسیدکربن) [۱۵].

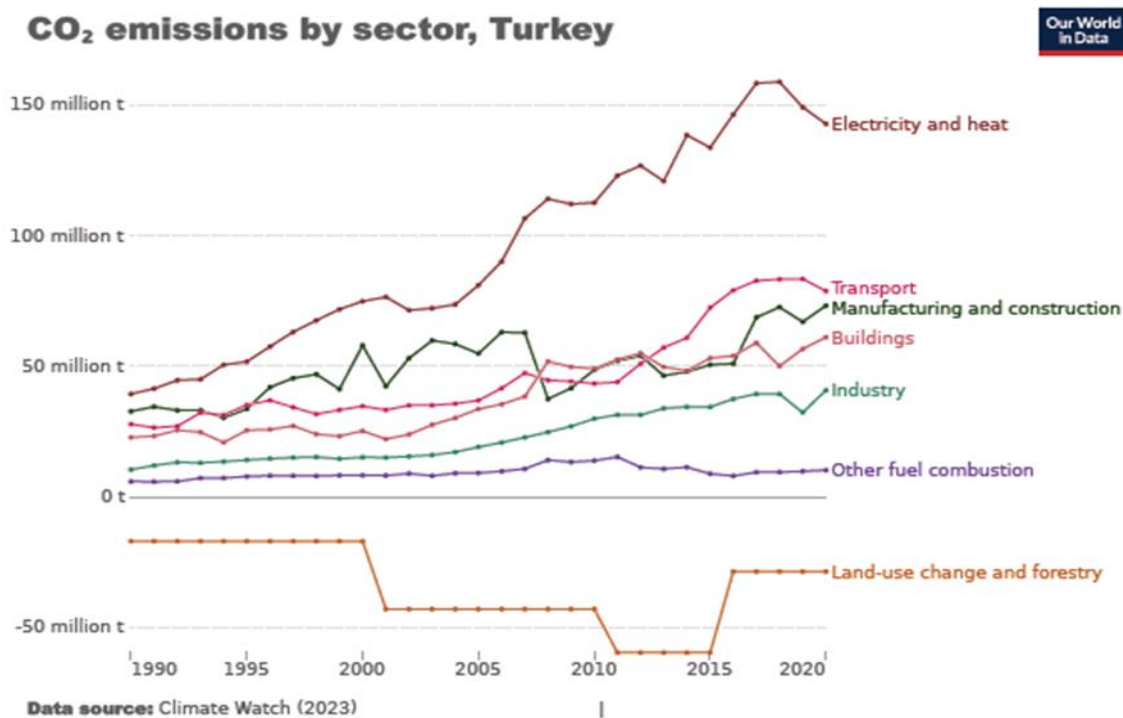
همچنین واکاوی شکل‌های ۱۸ تا ۲۲ نشان می‌دهد که بزرگترین منتشر کننده گازهای گلخانه‌ای در پاکستان در سال ۲۰۲۰ بخش کشاورزی است نه بخش انرژی یا صنعت. در برزیل هم بخش کشاورزی بزرگترین سهم را در انتشار

گازهای گلخانه‌ای با منشأ انسانی دارد نه بخش‌های انرژی، صنعت و استخراج سوخت‌های فسیلی. همچنین گفتنی است که بخش کشاورزی هند تا سال ۲۰۰۶ بزرگترین منتشر کننده گازهای گلخانه‌ای آن کشور بوده است.

انتشار دی‌اکسیدکربن در کشورهای مورد بررسی

شکل‌های ۲۳ تا ۲۷ نشان‌دهنده روند تغییرات انتشار گاز دی‌اکسیدکربن در بازه زمانی ۱۹۹۰ تا ۲۰۲۰ برای کشورهای ترکیه، پاکستان، مصر، مکزیک و هند هستند. از سال ۲۰۱۹ و همزمان با شیوع ویروس کرونا در جهان، به دلیل تأثیرات اقتصادی گسترده این همه‌گیری بر بخش‌های مختلف اقتصادی، در تمامی این کشورها روند انتشار گازهای گلخانه‌ای کاهش یافته یا روند رشد آن متوقف شده و به وضعیتی نسبتاً پایدار رسیده است.

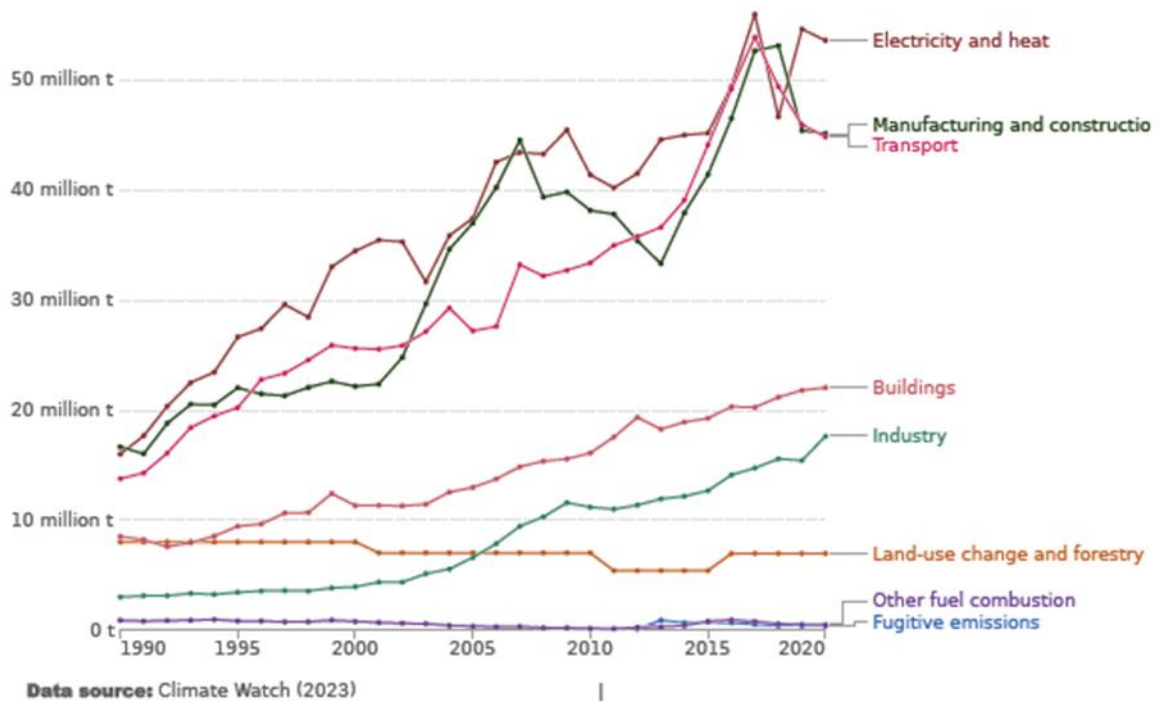
با توجه به نمودارهای ارائه شده، در سال ۲۰۲۰ در کشورهای ترکیه، مصر، مکزیک و هند، بخش تولید برق و گرما با اختلاف، بیشترین سهم را در انتشار دی‌اکسیدکربن به خود اختصاص داده است. در میان این کشورها، تنها ترکیه است که بخش کاربری زمین، تغییر کاربری زمین و جنگلداری آن نقش جذب‌کننده دی‌اکسیدکربن را ایفا می‌کند. در مقابل، در پاکستان این بخش نه تنها نقشی در جذب دی‌اکسیدکربن ندارد، بلکه خود نیز منبعی برای انتشار آن به شمار می‌رود. در مصر، تأثیر این بخش بر انتشار دی‌اکسیدکربن بسیار اندک و ناچیز است. در مکزیک، این بخش در بازه زمانی حدود سال‌های ۲۰۰۱ تا ۲۰۱۰ نقش جذب‌کننده را داشته، اما پس از آن به منبعی برای انتشار تبدیل شده است. همچنین، در هند نیز این بخش پیش از سال ۲۰۰۰ نقش مؤثری در جذب دی‌اکسیدکربن ایفا می‌کرد، ولی پس از آن به تدریج این نقش تضعیف شده است.



شکل ۲۳- انتشار گاز دی‌اکسید کربن در بخشهای مختلف اقتصاد ترکیه در بازه زمانی ۱۹۹۰ و ۲۰۲۰ (میلیون تن)

CO₂ emissions by sector, Pakistan

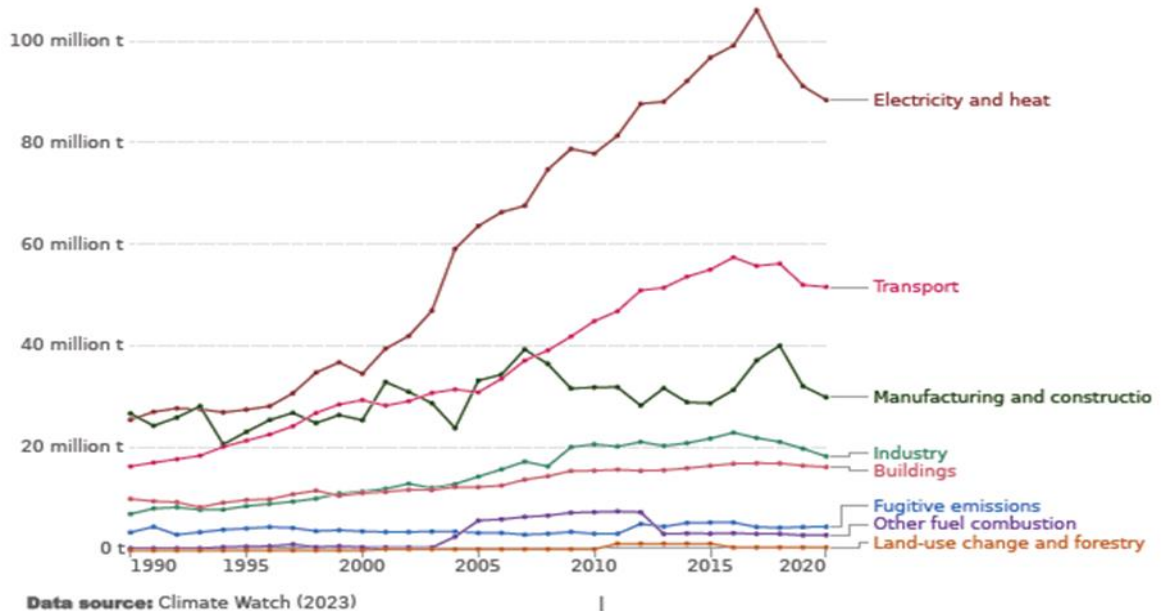
Our World in Data



شکل ۲۴- انتشار گاز دی اکسید کربن در بخش‌های مختلف اقتصاد پاکستان در بازه زمانی ۱۹۹۰ و ۲۰۲۰ (میلیون تن)

CO₂ emissions by sector, Egypt

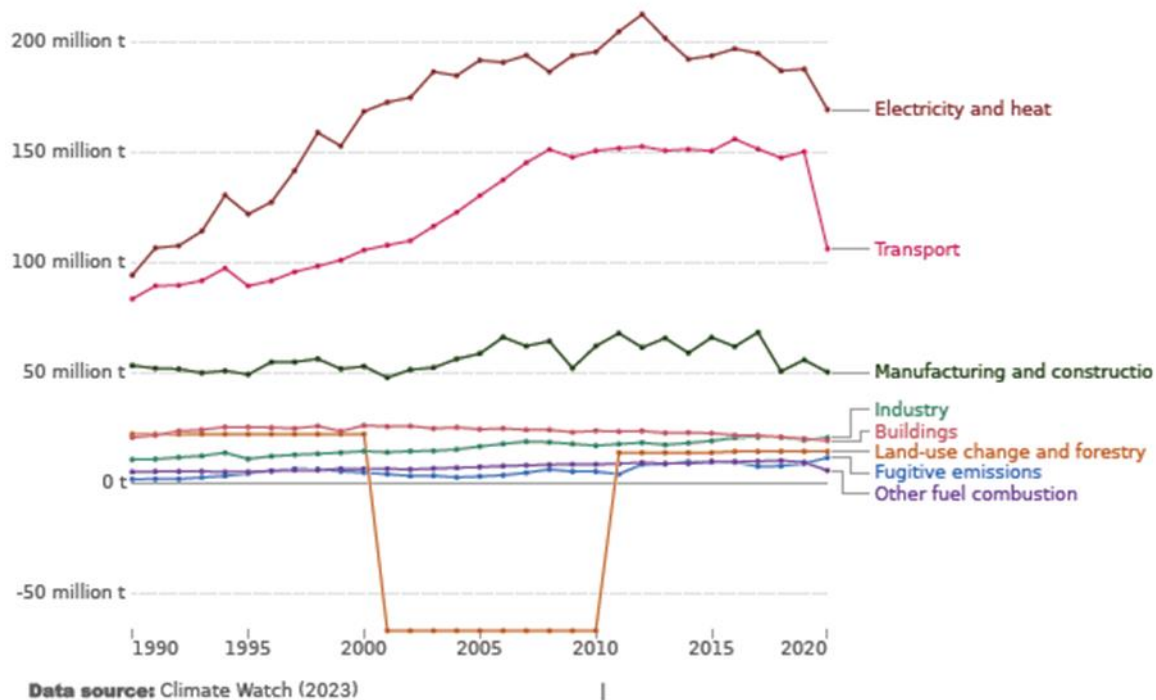
Our World in Data



شکل ۲۵- انتشار گاز دی اکسید کربن در بخش‌های مختلف اقتصاد مصر در بازه زمانی ۱۹۹۰ و ۲۰۲۰ (میلیون تن)

CO₂ emissions by sector, Mexico

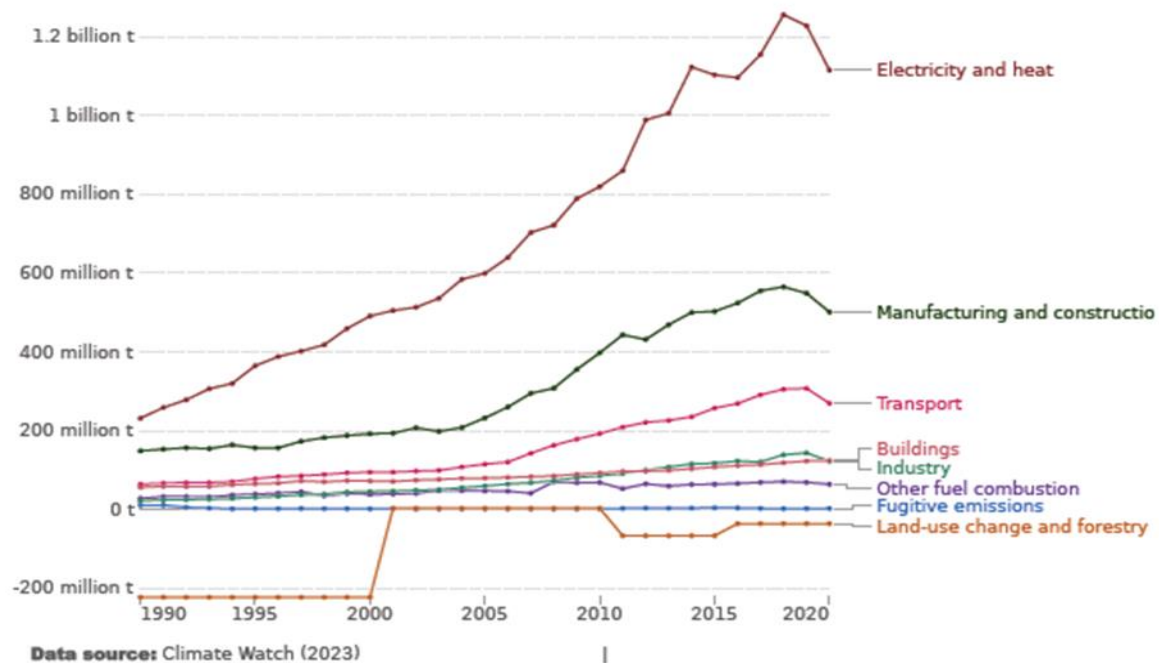
Our World
in Data



شکل ۲۶- انتشار گاز دی اکسید کربن در بخش‌های مختلف اقتصاد مکزیک در بازه زمانی ۱۹۹۰ و ۲۰۲۰ (میلیون تن)

CO₂ emissions by sector, India

Our World
in Data

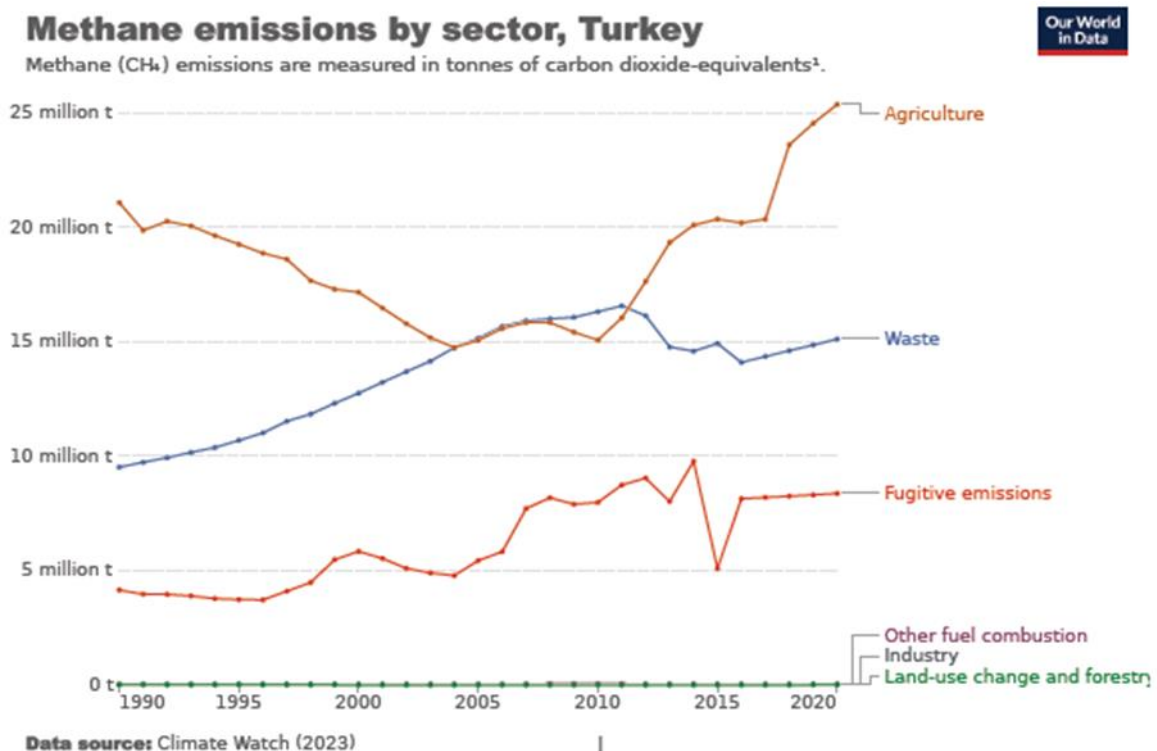


شکل ۲۷- انتشار گاز دی اکسید کربن در بخش‌های مختلف اقتصاد هند در بازه زمانی ۱۹۹۰ و ۲۰۲۰

انتشار متان در کشورهای مورد بررسی

شکل‌های ۲۸ تا ۳۲ روند تغییرات انتشار گاز متان از سال ۱۹۹۰ تا ۲۰۲۰ را در کشورهای ترکیه، پاکستان، مصر، مکزیک و هند نمایش می‌دهند. همان‌طور که دیده می‌شود، از سال ۲۰۱۹ و همزمان با شروع همه‌گیری کرونا در سطح جهان، به‌دلیل تأثیرات اقتصادی گسترده آن بر بخش‌های مختلف اقتصادی کشورها، روند انتشار گازهای گلخانه‌ای در بسیاری از بخش‌ها کاهش یافته یا روند صعودی پیشین آن متوقف شده و به وضعیتی نسبتاً ثابت رسیده است.

در سال ۲۰۲۰، در کشورهای ترکیه و مکزیک، به‌ترتیب بخش‌های کشاورزی، مدیریت پسماند و نشت از تأسیسات نفت و گاز بیشترین سهم را در انتشار گاز متان داشته‌اند. در کشورهای پاکستان و هند، بخش کشاورزی با اختلاف قابل توجهی، اصلی‌ترین منبع انتشار متان به‌شمار می‌رود. در مصر نیز بیشترین سهم انتشار متان مربوط به بخش‌های پسماند، نشت از تأسیسات نفت و گاز و کشاورزی است. شایان ذکر است که روند صعودی سهم بخش کشاورزی در مصر پس از سال ۲۰۰۸ متوقف شده و جای خود را به روندی کاهشی داده است. نکته مهم دیگر اینکه، میزان انتشار از بخش کشاورزی هند به هیچ‌وجه قابل مقایسه با سایر کشورهای مورد بررسی نیست و هند با انتشار بیش از ۵۰۰ میلیون تن معادل دی‌اکسیدکربن، بالاترین میزان تولید گاز متان را در میان شش کشور مورد بررسی داشته است که نشان‌دهنده اختلافی فاحش و جایگاه کاملاً متمایز این کشور در مقایسه با سایرین است.

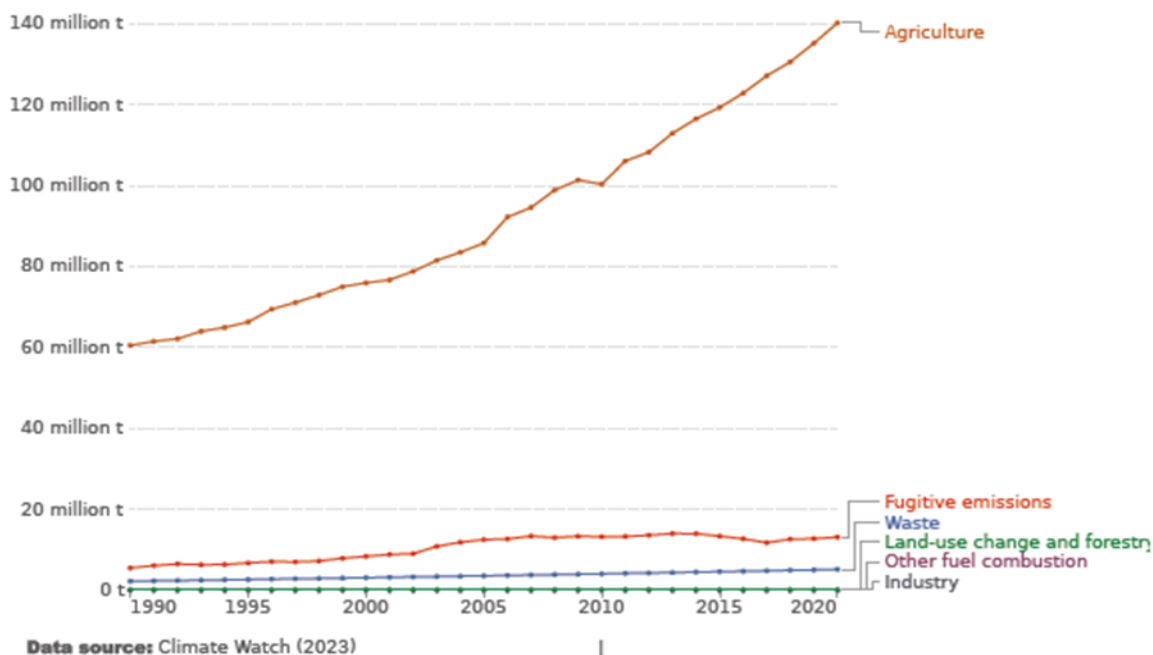


شکل ۲۸- انتشار متان در بخش‌های مختلف اقتصاد ترکیه در بازه زمانی ۱۹۹۰ و ۲۰۲۰ (معادل دی‌اکسید کربن)

Methane emissions by sector, Pakistan

Methane (CH₄) emissions are measured in tonnes of carbon dioxide-equivalents¹.

Our World
in Data

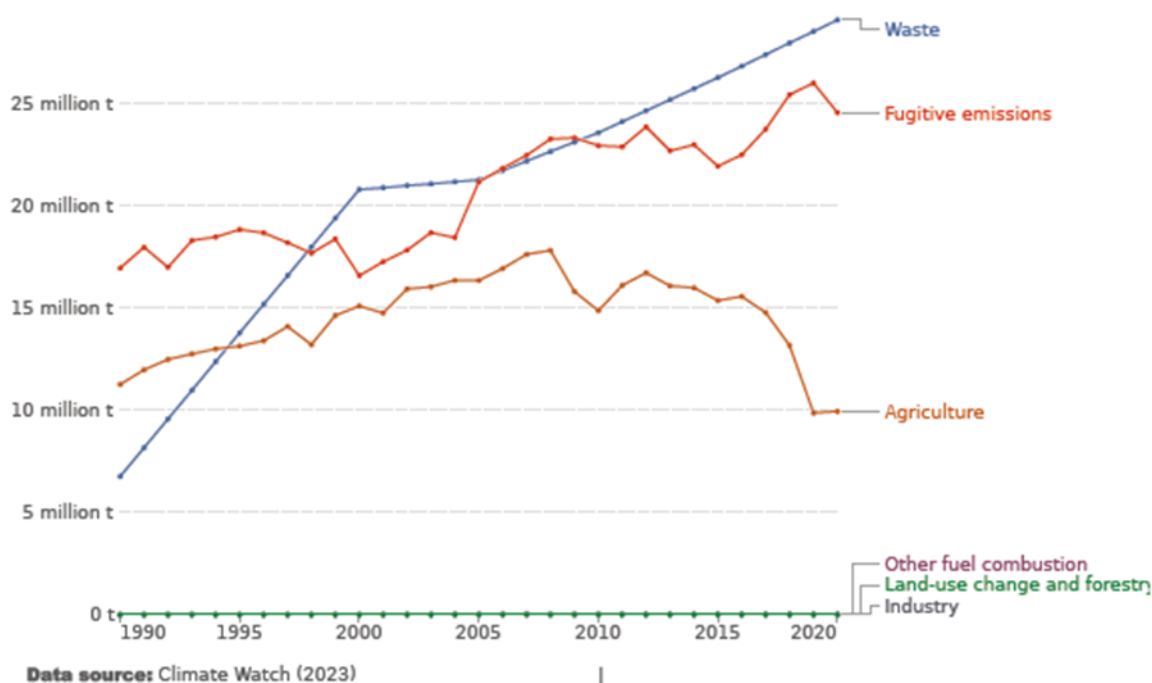


شکل ۲۹- انتشار متان در بخشهای مختلف اقتصاد پاکستان در بازه زمانی ۱۹۹۰ و ۲۰۲۰ (معادل دی اکسید کربن)

Methane emissions by sector, Egypt

Methane (CH₄) emissions are measured in tonnes of carbon dioxide-equivalents¹.

Our World
in Data

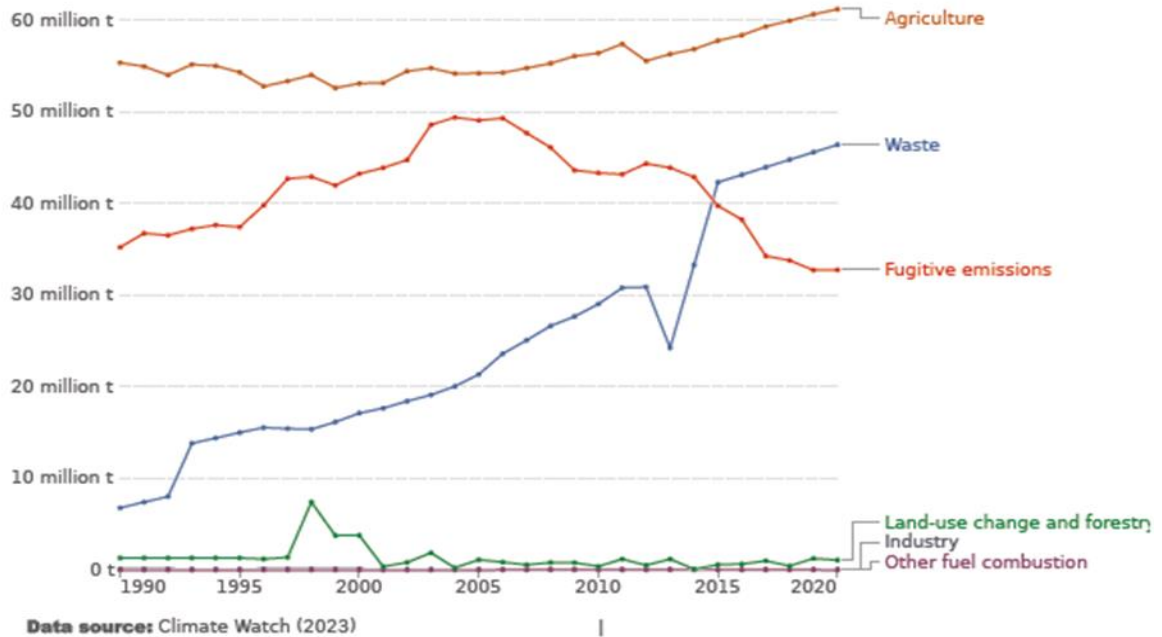


شکل ۳۰- انتشار متان در بخشهای مختلف اقتصاد مصر در بازه زمانی ۱۹۹۰ و ۲۰۲۰ (معادل دی اکسید کربن)

Methane emissions by sector, Mexico

Methane (CH₄) emissions are measured in tonnes of carbon dioxide-equivalents¹.

Our World
in Data

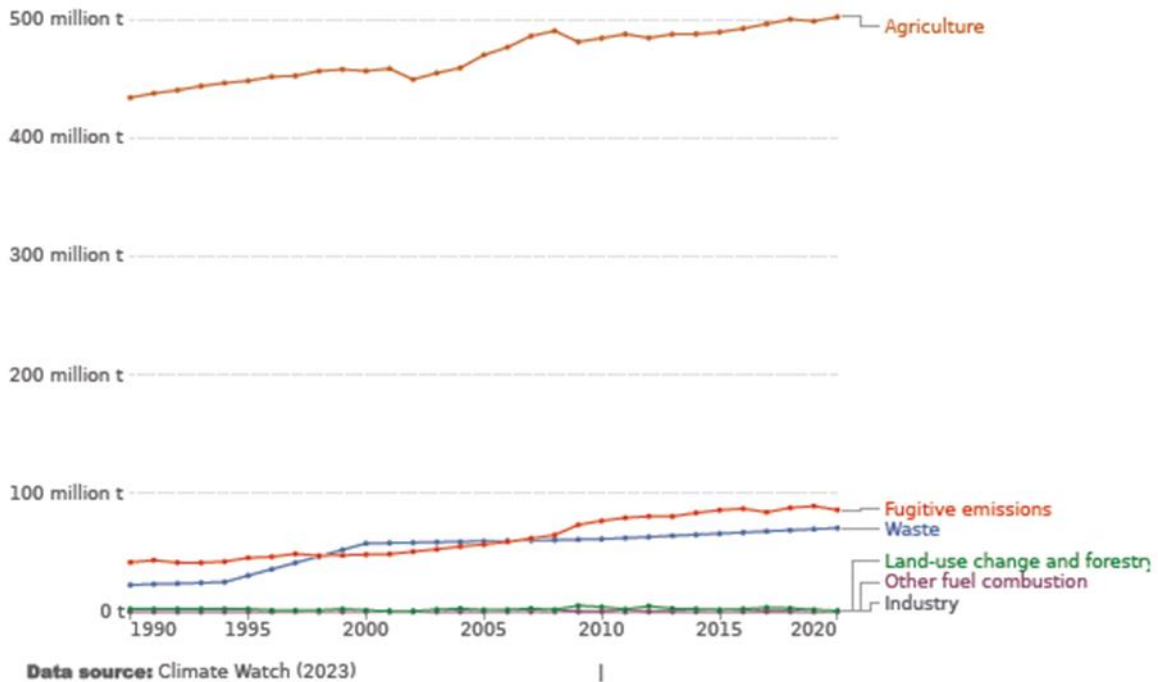


شکل ۳۱- انتشار متان در بخشهای مختلف اقتصاد مکزیک در بازه زمانی ۱۹۹۰ و ۲۰۲۰ (معادل دی اکسید کربن)

Methane emissions by sector, India

Methane (CH₄) emissions are measured in tonnes of carbon dioxide-equivalents¹.

Our World
in Data



شکل ۳۲- انتشار متان در بخشهای مختلف اقتصاد هند در بازه زمانی ۱۹۹۰ و ۲۰۲۰ (معادل دی اکسید کربن)

انتشار اکسید نیتروز در کشورهای مورد بررسی

شکل‌های ۳۳ تا ۳۷ روند تغییرات میزان انتشار گاز دی‌اکسیدکربن از سال ۱۹۹۰ تا ۲۰۲۰ را برای کشورهای ترکیه، پاکستان، مصر، مکزیک و هند نشان می‌دهند. همان‌طور که مشخص است در تمامی کشورها از سال ۲۰۱۹ و با شروع همه‌گیری کرونا در سطح جهان، به‌دلیل پیامدهای اقتصادی گسترده آن بر بخش‌های مختلف اقتصادی کشورها، روند انتشار گازهای گلخانه‌ای در بسیاری از بخش‌ها کاهش یافته یا رشد صعودی پیشین آن متوقف شده و در سطحی نسبتاً ثابت باقی مانده است.

در کشور ترکیه، بخش کشاورزی با اختلاف قابل‌توجهی بیشترین سهم را در انتشار گاز اکسیدنیتروز دارد. بررسی روند تغییرات از سال ۱۹۹۰ تا ۲۰۲۰ نشان می‌دهد که از حدود سال ۲۰۱۱ به بعد، انتشار این گاز از بخش کشاورزی وارد یک مسیر صعودی شدید شده است (شکل ۳۳). در کشورهای مکزیک و پاکستان نیز بخش کشاورزی با فاصله زیادی نسبت به سایر بخش‌های اقتصادی، اصلی‌ترین منبع انتشار اکسیدنیتروز بوده است؛ به‌ویژه در پاکستان، این روند تا سال ۲۰۲۰ رشد شدیدی را نشان می‌دهد (شکل‌های ۳۴ و ۳۶).

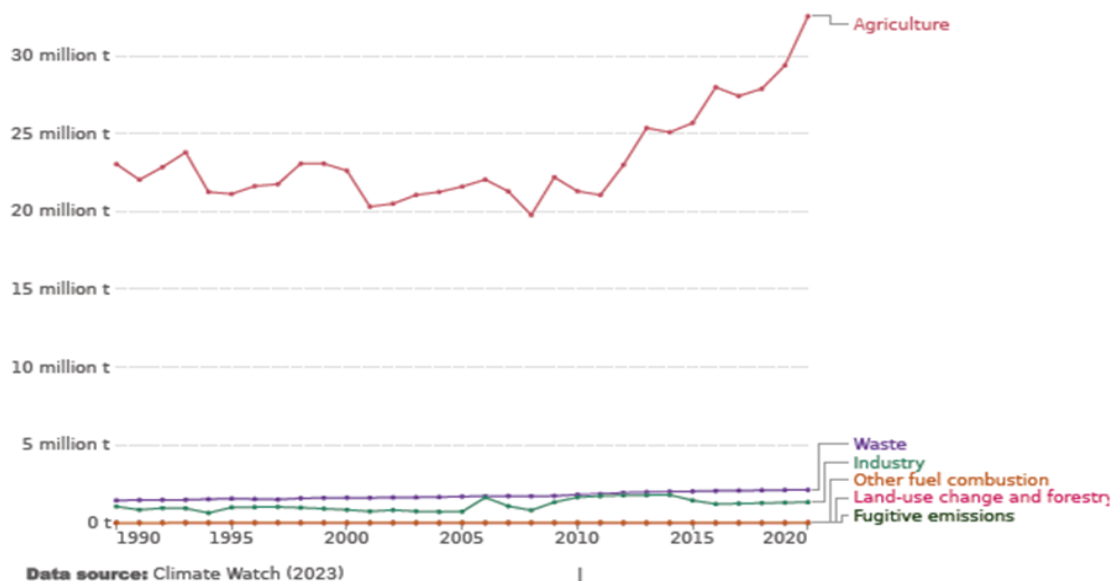
در مصر، اگرچه بخش کشاورزی همچنان بیشترین سهم را در انتشار اکسیدنیتروز دارد، اما رشد آن پس از حدود سال ۲۰۰۴ متوقف شده و از سال ۲۰۱۶ به بعد، این سهم وارد یک روند نزولی شده است (شکل ۳۵).

در نهایت، در کشور هند نیز بخش کشاورزی نه‌تنها بیشترین سهم را در انتشار اکسیدنیتروز نسبت به سایر بخش‌های اقتصادی دارد، بلکه میزان انتشار آن از این بخش، نسبت به دیگر کشورهای مورد بررسی نیز به‌مراتب بیشتر است، به‌طوری که هند در این زمینه در جایگاهی کاملاً متمایز قرار می‌گیرد (شکل ۳۷).

Nitrous oxide emissions by sector, Turkey

Nitrous oxide (N₂O) emissions are measured in tonnes of carbon dioxide equivalents^a.

Our World
in Data

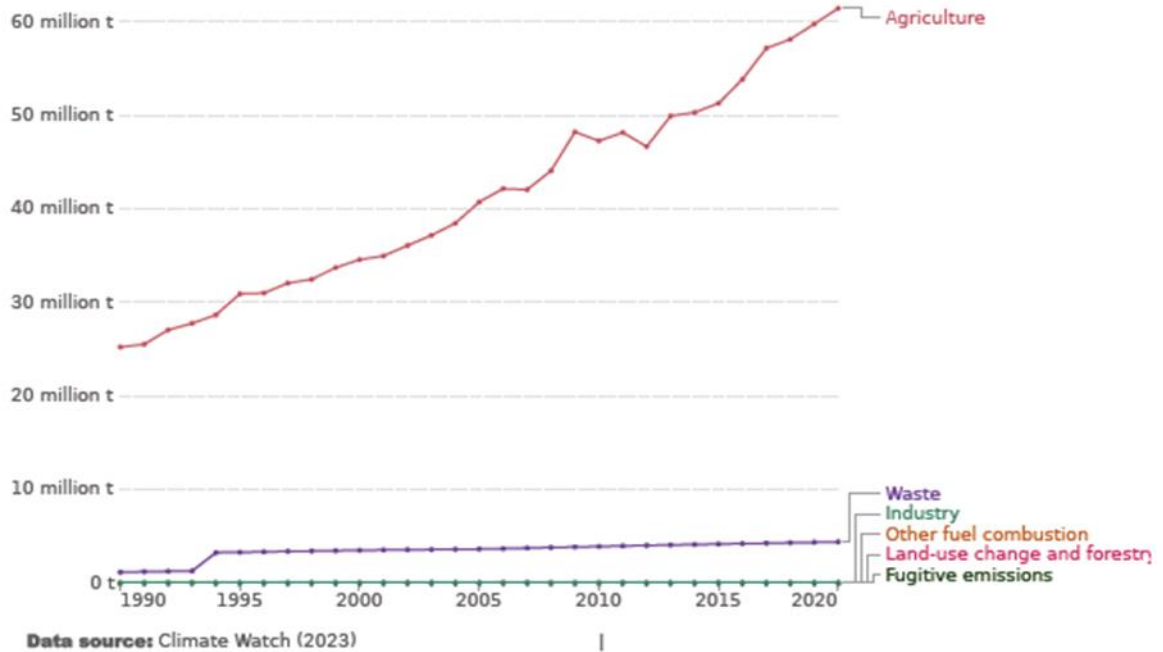


شکل ۳۳- انتشار اکسید نیتروز در بخش‌های مختلف اقتصاد ترکیه در بازه زمانی ۱۹۹۰ و ۲۰۲۰ (معادل دی اکسید کربن)

Nitrous oxide emissions by sector, Pakistan

Nitrous oxide (N₂O) emissions are measured in tonnes of carbon dioxide equivalents¹.

Our World
in Data



شکل ۳۴- انتشار اکسید نیتروز در بخش‌های مختلف اقتصاد پاکستان در بازه زمانی ۱۹۹۰ و ۲۰۲۰ (معادل دی اکسید کربن)

Nitrous oxide emissions by sector, Egypt

Nitrous oxide (N₂O) emissions are measured in tonnes of carbon dioxide equivalents¹.

Our World
in Data

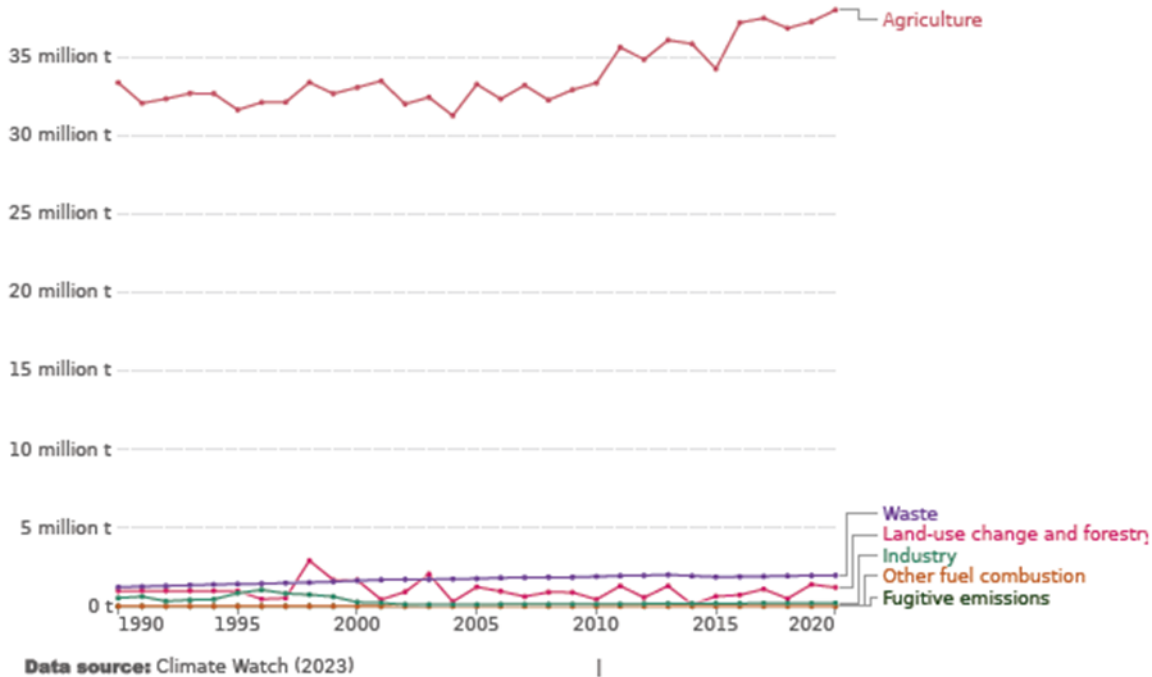


شکل ۳۵- انتشار اکسید نیتروز در بخش‌های مختلف اقتصاد مصر در بازه زمانی ۱۹۹۰ و ۲۰۲۰ (معادل دی اکسید کربن)

Nitrous oxide emissions by sector, Mexico

Nitrous oxide (N₂O) emissions are measured in tonnes of carbon dioxide equivalents³.

Our World
In Data



شکل ۳۶- انتشار اکسید نیتروز در بخش‌های مختلف اقتصاد مکزیک در بازه زمانی ۱۹۹۰ و ۲۰۲۰ (معادل دی اکسید کربن)

Nitrous oxide emissions by sector, India

Nitrous oxide (N₂O) emissions are measured in tonnes of carbon dioxide equivalents³.

Our World
In Data





مرکز ملی مطالعات راهبردی کشاورزی و آب

تهران، خیابان طالقانی، نبش خیابان موسوی (فرصت)، شماره ۱۷۵
کد پستی: ۱۵۸۳۶۴۸۴۹۹ شماره تماس: ۰۲۱-۸۵۷۳۲۸۵۱
وب سایت: www.awmrc.com ایمیل: info@awnrc.com