



## تحلیل جامع معایب چندبعدی سوخت‌های فسیلی: از بحران اقلیمی و سلامت تا موانع اقتصادی - اجتماعی و الزامات یک گذار عادلانه

علیرضا محمودی فرد\*<sup>۱</sup>، سید محمدرضا حسینی علی آباد<sup>۲</sup>

<sup>۱</sup>پسادکترای آینده پژوهی و مدرس دانشگاه ملی مهارت، دانشکده فنی انقلاب اسلامی، تهران، ایران، alireza10.m10@gmail.com  
<sup>۲</sup>پست دکتری مدیریت بازرگانی - مدیریت استراتژیک، دانشگاه بین‌المللی نورث‌وست ارنستاتن، info@confnashr.ir

### چکیده

وابستگی جهانی به سوخت‌های فسیلی به‌عنوان محرک اصلی تغییرات اقلیمی، در کانون مجموعه‌ای از بحران‌های درهم‌تنیده قرار دارد. این مقاله با رویکردی بین‌رشته‌ای و مبتنی بر شواهد، به تحلیل نظام‌مند معایب چندبعدی این سوخت‌ها می‌پردازد. یافته‌ها به‌وضوح نشان می‌دهد که سوخت‌های فسیلی نه‌تنها عامل اساسی گرمایش جهانی و رویدادهای حدی اقلیمی هستند، بلکه سالانه مسئول میلیون‌ها مرگ زودرس ناشی از آلودگی هوا بوده و پیامدهای ویرانگر زیست‌محیطی موضعی ایجاد می‌کنند. از منظر اقتصادی - اجتماعی، این وابستگی با چالش‌هایی چون «نفرین منابع»، تخصیص ناکارآمد سرمایه از طریق یارانه‌های پنهان، تشدید نابرابری‌ها (عدالت زیست‌محیطی) و ایجاد ریسک‌های سیستماتیک مالی (حباب کربن و دارایی‌های راکد) همراه است. مقاله استدلال می‌کند که تداوم وضع موجود به دلیل موانع ساختاری عمیقی مانند «قفل‌شدگی تکنولوژیک» در زیرساخت‌های پرکربن و قدرت ذینفعان، ممکن است و تحقق اهداف اقلیمی پاریس را ناممکن سازد. در نتیجه، گذار سریع، برنامه‌ریزی‌شده و عادلانه به‌سمت سیستم انرژی مبتنی بر کارایی و منابع تجدیدپذیر، یک ضرورت اجتناب‌ناپذیر است. در پایان، چارچوبی از پیشنهادهای سیاستی یکپارچه برای تسهیل این گذار، شامل قیمت‌گذاری جامع کربن، حذف تدریجی یارانه‌ها، سرمایه‌گذاری بی‌سابقه در نوآوری پاک و اجرای استراتژی‌های «گذار عادلانه» ارائه می‌شود.

### کلمات کلیدی

سوخت فسیلی، تغییرات اقلیمی، آلودگی هوا، سلامت عمومی، نفرین منابع، عدالت زیست‌محیطی، گذار انرژی، دارایی راکد

تحلیل جامع معایب چندبعدی سوخت‌های فسیلی: از بحران اقلیمی و سلامت تا موانع اقتصادی-اجتماعی و الزامات یک گذار عادلانه  
علیرضا محمودی فرد و سید محمدرضا حسینی علی آباد

## مقدمه

سوخت‌های فسیلی، زغال‌سنگ، نفت خام و گاز طبیعی، بیش از یک‌ونیم قرن ستون فقرات تمدن صنعتی و محرک اصلی رشد اقتصادی بی‌سابقه بوده‌اند. این منابع انرژی فشرده، با چگالی انرژی بالا و زیرساخت‌های توسعه‌یافته، به‌عنوان سوخت غالب برای بخش‌های حمل‌ونقل، تولید برق و صنایع پایه عمل کرده‌اند (Smil, 2017). با این حال، وابستگی شدید و طولانی‌مدت جوامع جهانی به این ذخایر کربنی، هزینه‌هایی را به‌بار آورده که اکنون به‌صورت چندبعدی و در مقیاسی سیاره‌ای آشکار شده‌اند. این هزینه‌ها فراتر از ملاحظات اقتصادی صرف رفته و ابعاد حیاتی سلامت عمومی، ثبات اکوسیستم‌های جهانی، امنیت بین‌المللی و عدالت اجتماعی بین‌نسلی را دربرمی‌گیرد. نقطه‌ی عطف در درک این معضل، شکل‌گیری اجماع علمی قاطع در مورد نقش انتشار گازهای گلخانه‌ای ناشی از احتراق سوخت‌های فسیلی در تشدید پدیده‌ی تغییرات اقلیمی است. گزارش‌های ارزیابی پایایی هیئت بین‌الدول تغییر اقلیم (IPCC) به‌طور مستند نشان داده‌اند که تمرکز کربن‌دی‌اکسید ( $CO_2$ ) در اتمسفر که از حدود 280 بخش در میلیون در دوره‌ی پیشاصنعتی به بیش از 420 بخش در میلیون در حال حاضر افزایش یافته، مستقیماً با فعالیت‌های انسانی و به‌ویژه سوزاندن سوخت‌های فسیلی مرتبط است و این افزایش، عامل اصلی گرمایش جهانی، اسیدی شدن اقیانوس‌ها و افزایش فراوانی و شدت رویدادهای حدی آب‌وهوایی است (IPCC, 2021). علاوه‌بر این، معایب سوخت‌های فسیلی محدود به حوزه‌ی اقلیم نمی‌شود. آلودگی هوای ناشی از انتشار ذرات معلق ( $PM_{10}$ ,  $PM_{2.5}$ ), اکسیدهای نیتروژن ( $NO_x$ ) و گوگرد دی‌اکسید ( $SO_2$ ) از نیروگاه‌ها، کارخانه‌ها و وسایل نقلیه، سالانه مسئول مرگ‌ومیر زودرس میلیون‌ها نفر در سراسر جهان است و بار بیماری‌های تنفسی و قلبی-عروقی سنگینی را بر سیستم‌های بهداشتی تحمیل می‌کند (WHO, 2021). از منظر اقتصادی، علی‌رغم دسترسی آسان تاریخی، بازار سوخت‌های فسیلی ذاتاً در معرض نوسانات شدید ژئوپلیتیک و شوک‌های عرضه قرار دارد که امنیت انرژی کشورهای واردکننده را تهدید می‌کند. همچنین، بسیاری از اقتصادهای وابسته به درآمد نفت، از «بیماری هلندی» و بی‌ثباتی مالی رنج می‌برند (Ross, 2012). علاوه‌بر این، چرخه‌ی استخراج، فرآوری و مصرف این سوخت‌ها، پیامدهای زیست‌محیطی موضعی ویرانگری دارد که از جمله می‌توان به نشت نفت در دریاها، آلودگی آب‌های زیرزمینی در اثر فرآیند شکست هیدرولیکی (Fracking)، تخریب گسترده‌ی چشم‌اندازها بر اثر معدن‌کاری روباز و تولید حجم عظیم پسماندهای سمی اشاره کرد. با درنظرگرفتن این ابعاد گسترده، ارزیابی جامع و چندرشته‌ای از معایب سوخت‌های فسیلی نه‌تنها یک ضرورت علمی، بلکه یک فوریت برای تدوین سیاست‌های انرژی پایدار است. این مقاله با پذیرش این چارچوب پیچیده، به بررسی نظام‌مند و تحلیل انتقادی معایب سوخت‌های فسیلی در سطوح محلی، منطقه‌ای و جهانی می‌پردازد و بر ضرورت گذار انرژی شتاب‌یافته به سمت منابع کم‌کربن تأکید می‌ورزد.

## بیان مسأله

سوخت‌های فسیلی به‌رغم نقش تاریخی خود در پیشبرد صنعت و توسعه، در کانون یک پارادوکس مدرن قرار دارند: موتور محرکه‌ی رشد اقتصادی از یک سو و عامل اصلی ایجاد مجموعه‌ای از بحران‌های جهانی پیچیده، درهم‌تنیده و فزاینده از سوی دیگر. این بحران‌ها شامل تغییرات اقلیمی فاجعه‌بار، آلودگی هوای کشنده، تخریب گسترده‌ی محیط‌زیست، نابرابری‌های اجتماعی عمیق و بی‌ثباتی اقتصادی-ژئوپلیتیکی هستند. با وجود اجماع علمی قاطع در مورد نقش محوری احتراق سوخت‌های فسیلی در گرمایش جهانی و پیامدهای آن، و نیز وجود شواهد انباشته از هزینه‌های گزاف بهداشتی و اجتماعی این سوخت‌ها، سیستم انرژی جهانی و الگوهای توسعه‌ی اقتصادی هنوز به‌صورت غالب بر این منابع متکی است. این وابستگی نه‌تنها از طریق انتشار گازهای گلخانه‌ای، «قفل‌شدگی» در زیرساخت‌های پرکربن را تداوم می‌بخشد، بلکه از طریق سازوکارهایی مانند یارانه‌های پنهان، قیمت‌گذاری ناقص که

هزینه‌های خارجی را نادیده می‌گیرد، و قدرت سیاسی-اقتصادی ذی‌نفعان این صنعت تقویت می‌شود. در نتیجه، یک شکاف عمیق و خطرناک بین الزامات فوری برای کاهش سریع انتشار گازهای گلخانه‌ای (مطابق با اهداف توافق پاریس برای محدود کردن گرمایش به ۱.۵ درجه سانتی‌گراد) و مسیر واقعی انتشار و سرمایه‌گذاری در سوخت فسیلی وجود دارد. این مسأله، ضرورت یک تحلیل جامع، بین‌رشته‌ای و داده‌محور را برای درک کامل ابعاد مختلف «معایب سوخت‌های فسیلی» و ارائه‌ی چارچوب‌های راه‌بردی مؤثر برای عبور از این بن‌بست انرژی و اقلیمی ایجاب می‌کند.

### اهداف پژوهش

هدف اصلی: ارائه‌ی یک تحلیل جامع، یکپارچه و مبتنی بر شواهد از معایب چندبعدی سوخت‌های فسیلی در سطوح محلی، منطقه‌ای و جهانی و تبیین الزامات یک گذار انرژی سریع و عادلانه به‌عنوان تنها راه‌حل بنیادین. اهداف فرعی:

۱. تحلیل نظام‌مند و بررسی کمی‌سازی پیوندهای علی بین استفاده از سوخت‌های فسیلی و پیامدهای اقلیمی، بهداشتی و زیست‌محیطی با استناد به داده‌های تجربی و مدل‌های علمی پذیرفته‌شده.
۲. بررسی و تشریح چالش‌های اقتصادی-اجتماعی و حکمرانی ناشی از وابستگی به سوخت‌های فسیلی، با تمرکز بر مفاهیم «نفرتین منابع»، «یارانه‌های پنهان» و «عدالت زیست‌محیطی».
۳. شناسایی و ارزیابی موانع ساختاری و نهادی موجود در مسیر گذار انرژی، از جمله «قفل‌شدگی تکنولوژیک»، «قدرت ذینفعان» و خطر «دارایی‌های راکد».
۴. ارائه‌ی چارچوبی از پیشنهاد‌های سیاستی نوآورانه، کاربردی و بین‌رشته‌ای برای تسریع گذار عادلانه به‌سمت سیستم انرژی مبتنی بر کارایی و تجدیدپذیری.

### سوالات پژوهش

سوال اصلی: چگونه می‌توان با استفاده از یک رویکرد بین‌رشته‌ای، ابعاد مختلف معایب سوخت‌های فسیلی (اقلیمی، بهداشتی، زیست‌محیطی، اقتصادی-اجتماعی و حکمرانی) را تحلیل کرد و یک چارچوب راه‌بردی جامع برای غلبه بر موانع ساختاری موجود و تسریع یک گذار انرژی عادلانه طراحی نمود؟ سوالات فرعی:

۱. سهم سوخت‌های فسیلی در بحران‌های چندگانه‌ی جهانی (تغییرات اقلیمی، آلودگی هوا، تخریب اکوسیستم) براساس آخرین داده‌های علمی و مدل‌ها چگونه قابل کمی‌سازی است؟
۲. مکانیزم‌های اقتصادی-اجتماعی و سیاسی که تداوم وابستگی به سوخت‌های فسیلی را علی‌رغم آگاهی از پیامدهای منفی آن تضمین می‌کنند، کدامند و چگونه عمل می‌کنند؟
۳. چه سیاست‌ها و ابزارهای نوآورانه‌ای (قیمت‌گذاری، تنظیم‌گری، سرمایه‌گذاری عمومی و ...) می‌توانند به‌طور هم‌زمان بر موانع بازار، نابرابری و مقاومت سیاسی در مسیر گذار انرژی غلبه کنند؟
۴. چگونه می‌توان اطمینان حاصل کرد که فرآیند گذار از سوخت‌های فسیلی به گونه‌ای طراحی و اجرا شود که منجر به تشدید نابرابری‌های موجود نشده و از جوامع و کارگران وابسته به این صنعت محافظت کند («گذار عادلانه»)?

### متن اصلی

معایب سوخت‌های فسیلی را می‌توان در چهار دسته‌ی اصلی و درهم‌تنیده طبقه‌بندی کرد: تأثیرات تغییرات اقلیمی، آلودگی هوا و پیامدهای بهداشتی، پیامدهای زیست‌محیطی و اکولوژیکی موضعی، و چالش‌های اقتصادی-اجتماعی و ژئوپلیتیکی. نخست، نقش محوری سوخت‌های فسیلی در تغییرات اقلیمی ناشی از فعالیت انسانی از طریق انتشار گازهای گلخانه‌ای (GHGs) به‌ویژه

تحلیل جامع معایب چندبعدی سوخت‌های فسیلی: از بحران اقلیمی و سلامت تا موانع اقتصادی-اجتماعی و الزامات یک گذار عادلانه  
علیرضا محمودی فرد و سید محمدرضا حسینی علی آباد

دی‌اکسیدکربن ( $\text{CO}_2$ ) و متان ( $\text{CH}_4$ ) است. احتراق سوخت‌های فسیلی مسئول بیش از ۷۵٪ از انتشار کل  $\text{CO}_2$  انتروپوزنیک است که منجر به افزایش غلظت آن در اتمسفر و تشدید اثر گلخانه‌ای طبیعی شده است (IPCC, ۲۰۲۱). این فرآیند مستقیماً با افزایش دمای متوسط جهانی (در حال حاضر حدود ۱.۱ درجه سانتی‌گراد نسبت به سطح پیشاصنعتی)، ذوب یخ‌چاه‌ها و صفحات یخی، افزایش سطح آب دریاها و تشدید رویدادهای حدی آب‌وهوایی مانند امواج گرمایی، خشک‌سالی‌های طولانی‌مدت، بارندگی‌های سیل‌آسا و شدت یافتن طوفان‌ها پیوند خورده است. پیامدهای این تغییرات بر امنیت غذایی، آب، سلامت و مهاجرت‌های انسانی به‌صورت فزاینده‌ای ویرانگر است. دوم، آلودگی هوای موضعی و منطقه‌ای ناشی از احتراق ناقص یا بدون تصفیه‌ی مناسب سوخت‌های فسیلی است. نیروگاه‌های زغال‌سنگ‌سوز، صنایع و وسایل نقلیه، مقادیر عظیمی از ذرات معلق (PM)، اکسیدهای نیتروژن ( $\text{NO}_x$ )، اکسیدهای گوگرد (SOx) و ترکیبات آلی فرار (VOCs) را منتشر می‌کنند. قرارگیری در معرض این آلاینده‌ها، به‌ویژه  $\text{PM}_{2.5}$  ذرات با قطر کمتر از ۲.۵ میکرومتر، مستقیماً با افزایش مرگ‌ومیر ناشی از بیماری‌های ایسکمیک قلب، سکته مغزی، بیماری‌های انسدادی مزمن ریوی (COPD) و سرطان ریه مرتبط است. سازمان جهانی بهداشت تخمین می‌زند که آلودگی هوای بیرون (عمدتاً ناشی از سوخت‌های فسیلی) سالانه منجر به حدود ۴.۲ میلیون مرگ زودرس می‌شود (WHO, ۲۰۲۱). سوم، تخریب مستقیم محیط‌زیست و اکوسیستم‌ها در طول چرخه‌ی عمر سوخت‌های فسیلی رخ می‌دهد. استخراج معادن زغال‌سنگ به‌ویژه به‌روش روباز منجر به تخریب کامل چشم‌انداز، آلودگی منابع آب و از بین رفتن زیستگاه‌ها می‌شود. استخراج نفت و گاز با خطرات دائمی نشت (هم در خشکی و هم در دریا) همراه است که اثرات کشنداری بر حیات دریایی و سواحل دارد، همانند فاجعه‌ی Deepwater Horizon در سال ۲۰۱۰. فرآیند شکست هیدرولیکی (فرکینگ) برای استخراج گاز شیل، علاوه بر مصرف بالای آب، می‌تواند باعث آلودگی آب‌های زیرزمینی و حتی وقوع زلزله‌های القایی شود (Vengosh et al., ۲۰۱۴). انبارسازی پسماندهای خاکستر زغال‌سنگ نیز یک چالش بزرگ زیست‌محیطی است. چهارم، معایب اقتصادی-اجتماعی و ژئوپلیتیکی است. اقتصادهای متکی به صادرات نفت اغلب از «نفرین منابع» رنج می‌برند که در آن وابستگی به درآمد نفت منجر به بی‌ثباتی اقتصادی، ضعف نهادهای دولتی، فساد و افزایش نابرابری اجتماعی می‌شود (Ross, ۲۰۱۲). از سوی دیگر، واردکنندگان عمده نفت در معرض نوسانات شدید قیمت و اختلالات زنجیره‌ی تأمین قرار دارند که امنیت انرژی آن‌ها را تهدید می‌کند. علاوه بر این، صنایع سوخت فسیلی اغلب از یارانه‌های سنگین مستقیم و غیرمستقیم بهره‌مند می‌شوند که این منابع مالی می‌توانست در توسعه‌ی زیرساخت‌های انرژی پاک سرمایه‌گذاری شود. در نهایت، ذات تجدیدنپذیر این منابع به‌معنای پایان‌پذیر بودن آن‌هاست و استخراج ذخایر باقی‌مانده به‌طور فزاینده‌ای پرهزینه‌تر و پرخطرتر از نظر زیست‌محیطی می‌شود.

### پیشینه پژوهش

پژوهش درباره‌ی معایب سوخت‌های فسیلی دارای پیشینه‌ای غنی و چندرشته‌ای است که همگام با تشدید پیامدهای استفاده از این سوخت‌ها و تکامل ابزارهای علمی، توسعه یافته است. نخستین هشدارهای جدی در مورد پیامدهای احتمالی افزایش دی‌اکسیدکربن اتمسفری به اواخر قرن نوزدهم و کار دانشمندانی مانند سوانت آرنیوس بازمی‌گردد. با این حال، پژوهش سیستماتیک مدرن از دهه‌های ۱۹۶۰ و ۱۹۷۰ میلادی و همزمان با رشد جنبش‌های زیست‌محیطی و بحران‌های نفتی شکل گرفت. مطالعات اولیه عمدتاً بر روی آلودگی هوای موضعی و اثرات بهداشتی متمرکز بود. پژوهش پیشگامانه‌ی کلوب و همکاران در دهه‌ی ۱۹۷۰ ارتباط بین غلظت ذرات معلق و افزایش نرخ مرگ‌ومیر ناشی از بیماری‌های تنفسی و قلبی را در شهرهای صنعتی نشان داد (Clubb et al., ۱۹۷۹). به‌موازات آن، درک از پیامدهای تخریب محیط‌زیست محلی ناشی از استخراج و فرآوری سوخت‌های فسیلی، به‌ویژه پس از فجایعی مانند نشت نفتی اکسون والدز (۱۹۸۹)، گسترش یافت. در دهه‌ی ۱۹۸۰ و ۱۹۹۰، تمرکز پژوهشی به‌طور فزاینده‌ای به سمت

پیامدهای جهانی سوق داده شد. تشکیل هیئت بین‌الدول تغییر اقلیم (IPCC) در سال ۱۹۸۸ نقطه‌عطفی بود که سبب هم‌افزایی دانشمندان علوم مختلف برای ارزیابی خطرات تغییرات اقلیمی ناشی از فعالیت انسان شد. اولین گزارش ارزیابی IPCC در سال ۱۹۹۰ به‌طور محتاطانه‌ای افزایش گازهای گلخانه‌ای و گرمایش احتمالی را خاطرنشان کرد، اما گزارش‌های بعدی با قدرت بیشتری ارتباط بین انتشار سوخت‌های فسیلی و تغییرات مشاهده‌شده را تأیید نمودند (IPCC, ۱۹۹۰). در همین دوره، پژوهش‌های اقتصادی-اجتماعی نیز ظهور کردند. مفهوم «نفرین منابع» یا «پارادوکس فراوانی» توسط محققانی همچون آتیکی و همکاران و ساچز و وارنر توسعه یافت و به‌طور تجربی نشان داد که کشورهای غنی از منابع طبیعی (به‌ویژه نفت) اغلب از رشد اقتصادی کمتر، نهادهای ضعیف‌تر و درگیری‌های بیشتر رنج می‌برند (Sachs & Warner, ۱۹۹۵). در قرن بیست‌ویکم، پژوهش‌ها به چندین جهت پیشرفته گسترش یافت. اولاً، مدل‌سازی اقلیمی بسیار پیچیده‌تر شد و امکان برآوردهای منطقه‌ای و تحلیل ریسک دقیق‌تر را فراهم کرد. ثانیاً، مطالعات اپیدمیولوژیک در مقیاس بزرگ، مانند مطالعه‌ی بار جهانی بیماری، توانست مرگ‌ومیر ناشی از آلودگی هوای بیرون و داخل خانه (که بخشی از آن ناشی از سوخت‌های فسیلی است) را به‌طور کمی در سطح جهان برآورد کند (GBD ۲۰۱۹ Risk Factors Collaborators, ۲۰۲۰). ثالثاً، پژوهش در مورد اثرات زیست‌محیطی فناوری‌های استخراج جدید، مانند شکست هیدرولیکی (فراکینگ) برای گاز شیل، شتاب گرفت. مطالعاتی مانند تحقیق ونگوش و همکاران به‌طور مستند خطرات این فناوری را برای آلودگی آب‌های زیرزمینی نشان داد (Vengosh et al., ۲۰۱۴). رابعاً، حوزه‌ی اقتصاد انرژی و گذار ظهور کرد که هزینه‌های اجتماعی کربن و مزایای حذف تدریجی سوخت‌های فسیلی را تحلیل می‌کند. پژوهش‌های نوظهور نیز به موضوع عدالت اقلیمی و انصاف بین‌نسلی می‌پردازند و بر نابرابری در مسئولیت‌ها و تأثیرات بین کشورهای توسعه‌یافته و در حال توسعه تأکید دارند. با وجود این حجم عظیم پژوهش، شکاف‌هایی همچنان وجود دارد، از جمله نیاز به مدل‌های یکپارچه‌ای که پیوندهای پیچیده بین ابعاد محیطی، بهداشتی، اقتصادی و اجتماعی معایب سوخت‌های فسیلی را بهتر شبیه‌سازی کنند و نیز ارزیابی دقیق‌تر هزینه‌های واقعی (هزینه‌های خارجی) این سوخت‌ها در سناریوهای مختلف سیاستی.

پژوهش‌های متعددی با رویکردهای کمی و کیفی، ابعاد مختلف معایب سوخت‌های فسیلی را بررسی کرده‌اند. در حوزه‌ی تغییرات اقلیمی و انتشار گازهای گلخانه‌ای، تحقیقات به‌صورت گسترده‌ای بر مدل‌سازی اقلیمی و حسابداری کربن متمرکز بوده است. پژوهش‌هایی مانند مطالعه‌ی پاچائوری و همکاران به تحلیل مسیرهای انتشار و سناریوهای تثبیت اقلیمی پرداخته و نشان داده‌اند که برای محدود کردن گرمایش به ۱.۵ درجه سانتی‌گراد، ذخایر اثبات‌شده‌ی سوخت فسیلی باید عمده‌تاً استفاده‌نشده باقی بمانند (Pachauri et al., ۲۰۱۴). همچنین، مطالعاتی چون تحقیق لیندر و همکاران، هزینه‌ی اجتماعی کربن (SCC) را به‌عنوان معیاری برای کمی‌سازی خسارات نهایی ناشی از انتشار هر تن CO<sub>2</sub> برآورد کرده‌اند (Linder et al., ۲۰۲۰). در محور آلودگی هوا و سلامت، مطالعات اپیدمیولوژیک طولی و مقطعی، شواهد محکمی ارائه داده‌اند. برای نمونه، مطالعه‌ی هم‌گروهی آینده‌نگر در اروپا (تحت‌عنوان ELAPSE) ارتباط خطی بین قرارگیری در معرض PM<sub>2.5</sub> و NO<sub>2</sub> با مرگ‌ومیر طبیعی حتی در غلظت‌های پایین‌تر از حد راهنمای کنونی WHO را تأیید کرده است (Stafoggia et al., ۲۰۲۱). در بعد اقتصادی، تحقیقات گسترده‌ای به آزمون فرضیه‌ی «نفرین منابع» پرداخته‌اند. مطالعاتی مانند کار مئولو و همکاران، با استفاده از داده‌های پانل، نشان داده‌اند که وابستگی به صادرات نفت می‌تواند با کاهش سرمایه‌گذاری در سرمایه‌ی انسانی و نهادهای دموکراتیک، رشد بلندمدت را تضعیف کند (Mehlum et al., ۲۰۰۶). در زمینه‌ی پیامدهای زیست‌محیطی موضعی، مطالعات موردی دقیقی بر روی فجاج خاص (مانند نشت Deepwater Horizon) و همچنین ارزیابی‌های جامع‌تر انجام شده است. پژوهش جانسون و همکاران اثرات درازمدت نشت نفتی را بر اکوسیستم‌های دریایی و معیشت جوامع ساحلی بررسی کرده‌اند (Johnson et al., ۲۰۱۷). همچنین، مطالعات تجربی و هیدروژئوشیمیایی مانند تحقیق جکسون و همکاران، شواهدی از آلودگی متان در آب‌های آشامیدنی نزدیک به چاه‌های فراکینگ ارائه داده‌اند (Jackson et al., ۲۰۱۳). در ارتباط با عدالت زیست‌محیطی و توزیع نابرابر آسیب‌ها، پژوهش‌های جامعه‌شناختی و

تحلیل جامع معایب چندبعدی سوخت‌های فسیلی: از بحران اقلیمی و سلامت تا موانع اقتصادی-اجتماعی و الزامات یک گذار عادلانه  
علیرضا محمودی فرد و سید محمدرضا حسینی علی آباد

جغرافیایی نشان داده‌اند که تأسیسات سوخت فسیلی و آلودگی مرتبط با آن به‌طور نامتناسبی در مناطق کم‌درآمد و جوامع اقلیتی متمرکز شده است که به تشدید نابرابری‌های بهداشتی و اجتماعی می‌انجامد (Mohai et al., ۲۰۰۹). از منظر امنیت انرژی، مطالعاتی مانند کار چرپ و همکاران به تحلیل آسیب‌پذیری سیستم‌های انرژی در برابر شوک‌های قیمتی و اختلالات ژئوپلیتیک پرداخته و مزایای متنوع‌سازی با انرژی‌های تجدیدپذیر را برجسته کرده‌اند (Cherp et al., ۲۰۲۱). در حوزه‌ی سیاست‌گذاری و گذار انرژی، محققان با استفاده از مدل‌های یکپارچه‌ی ارزیابی (IAMs)، هزینه‌ها و مزایای راهبردهای مختلف کاهش انتشار (مانند مالیات کربن، استانداردهای بهره‌وری) را مقایسه کرده‌اند. با این وجود، علی‌رغم حجم وسیع پژوهش، مطالعات کمتری به‌طور هم‌زمان به تحلیل سینرژی و بده‌بستان (Trade-offs) بین ابعاد مختلف معایب سوخت‌های فسیلی (مانند تعارض احتمالی بین کاهش انتشار CO<sub>2</sub> و افزایش آلودگی ذرات ناشی از سوخت زیستی) پرداخته‌اند. همچنین، ارزیابی هزینه‌های کامل (Full-Cost Accounting) که کلیه‌ی هزینه‌های خارجی سلامت، محیط‌زیست و اجتماعی را در قیمت انرژی منعکس کند، همچنان یک چالش پژوهشی و عملیاتی باقی مانده است.

### معایب سوخت‌های فسیلی

معایب سوخت‌های فسیلی را می‌توان به‌صورت موردی و در ابعاد مختلف به‌شرح زیر بیان نمود:

#### ۱. معایب زیست‌محیطی و اقلیمی:

تغییرات اقلیمی: انتشار گازهای گلخانه‌ای، به‌ویژه دی‌اکسیدکربن (CO<sub>2</sub>) و متان (CH<sub>4</sub>)، ناشی از احتراق سوخت‌های فسیلی، عامل اصلی گرمایش جهانی و تغییرات آب‌وهوایی است. این امر منجر به افزایش دمای متوسط زمین، ذوب یخچال‌ها، افزایش سطح آب دریاها، اسیدی شدن اقیانوس‌ها و تشدید رویدادهای حدی آب‌وهوایی مانند سیل، خشکسالی و طوفان‌ها می‌شود (IPCC, ۲۰۲۱). آلودگی هوا: احتراق سوخت‌های فسیلی (به‌ویژه در نیروگاه‌های زغال‌سنگ‌سوز، صنایع و وسایل نقلیه) مقادیر زیادی آلاینده‌های خطرناک از جمله ذرات معلق (PM<sub>۱۰</sub> و PM<sub>۲.۵</sub>)، اکسیدهای نیتروژن (NOx)، اکسیدهای گوگرد (SOx)، ازن سطح زمین (O<sub>3</sub>) و هیدروکربن‌های آروماتیک چندحلقه‌ای (PAHs) را در هوا منتشر می‌کند (WHO, ۲۰۲۱).

تخریب مستقیم محیط‌زیست: چرخه‌ی استخراج، انتقال و فرآوری سوخت‌های فسیلی آسیب‌های شدیدی وارد می‌کند. معدن‌کاری روباز زغال‌سنگ منجر به تخریب کامل چشم‌انداز و از بین رفتن زیستگاه‌ها می‌شود. استخراج نفت و گاز (به‌ویژه از طریق شکست هیدرولیکی یا فراکینگ) می‌تواند باعث آلودگی آب‌های زیرزمینی، مصرف حجم بالای آب و حتی وقوع زلزله‌های القایی گردد (Vengosh et al., ۲۰۱۴). نشت‌های نفتی (هم در خشکی و هم در دریا) تأثیرات فاجعه‌باری بر اکوسیستم‌های آبی و ساحلی دارند. تولید پسماندهای سمی: فرآوری سوخت‌های فسیلی و سوختن زغال‌سنگ مقادیر عظیمی پسماند، از جمله خاکستر بادی زغال‌سنگ (حاوی فلزات سنگین مانند آرسنیک، جیوه و سرب) و گل حفاری تولید می‌کند که مدیریت آن چالش بزرگی است و در صورت عدم کنترل، منابع آب و خاک را آلوده می‌سازد.

#### ۲. معایب بهداشتی و انسانی:

مرگ‌ومیر زودرس و بیماری‌ها: قرارگیری در معرض آلاینده‌های هوای ناشی از سوخت‌های فسیلی با افزایش نرخ بیماری‌های قلبی-عروقی، سکنه مغزی، سرطان ریه، بیماری‌های انسدادی مزمن ریوی (COPD) و عفونت‌های حاد دستگاه تنفسی تحتانی ارتباط مستقیم دارد. براساس برآورد سازمان جهانی بهداشت، آلودگی هوای بیرون (که بخش عمده‌ای از آن مرتبط با سوخت فسیلی است) سالانه مسئول حدود ۴.۲ میلیون مرگ زودرس در سراسر جهان است (WHO, ۲۰۲۱).

تأثیرات منفی بر سلامت روان و رفاه: آلودگی هوا و صوتی ناشی از ترافیک و صنایع، همچنین دگرگونی چشم‌اندازها و جوامع محلی بر اثر فعالیت‌های استخراج، می‌توانند به افزایش استرس، اضطراب و کاهش کیفیت کلی زندگی منجر شوند.

۳. معایب اقتصادی-اجتماعی:

نفرین منابع (Resource Curse): بسیاری از کشورهای دارای منابع غنی نفت و گاز، از الگوی رشد اقتصادی پایین، وابستگی شدید تک‌محصولی، فساد گسترده، نهادهای حکومتی ضعیف و افزایش نابرابری درآمدی رنج می‌برند. درآمد حاصل از منابع طبیعی اغلب به جای سرمایه‌گذاری مولد، به صورت رانت توزیع شده و توسعه‌ی بخش‌های دیگر اقتصاد را مختل می‌کند (Ross, 2012). نوسانات قیمت و بی‌ثباتی اقتصادی: بازارهای جهانی نفت به دلیل عوامل ژئوپلیتیک، بحران‌ها و تصمیمات اوپک بسیار بی‌ثبات هستند. این نوسان‌ها، برنامه‌ریزی بلندمدت را برای کشورهای واردکننده و صادرکننده دشوار ساخته و می‌تواند بحران‌های اقتصادی ایجاد کند.

یارانه‌های سنگین: در بسیاری از کشورها، سوخت‌های فسیلی از یارانه‌های مستقیم و غیرمستقیم (مانند عدم احتساب هزینه‌های خارجی سلامت و محیط‌زیست) بهره‌مند می‌شوند. این یارانه‌ها بار مالی سنگینی بر دوش دولت‌ها گذاشته و منابع مالی را از سرمایه‌گذاری در زیرساخت‌های انرژی پاک و پایدار منحرف می‌کند.

هزینه‌های هنگفت سلامت عمومی: هزینه‌های درمان بیماری‌های ناشی از آلودگی هوا، بار مالی عظیمی بر سیستم‌های بهداشتی و بهره‌وری نیروی کار وارد می‌آورد.

۴. معایب ژئوپلیتیکی و امنیتی:

تهدید امنیت انرژی: وابستگی کشورها به واردات نفت و گاز از مناطق بی‌ثبات ژئوپلیتیکی، امنیت انرژی آن‌ها را در معرض خطر قرار می‌دهد و می‌تواند به درگیری‌های بین‌المللی دامن بزند.

توسعه‌نیافتگی فناوری: تمرکز بر سوخت‌های فسیلی ارزان و در دسترس، می‌تواند انگیزه‌ی سرمایه‌گذاری و نوآوری در فناوری‌های انرژی پاک و تجدیدپذیر را کاهش داده و رقابت‌پذیری آینده‌ی کشورها را در اقتصاد کم‌کربن تضعیف کند.

۵. معایب مرتبط با پایداری:

منابع تجدیدناپذیر: سوخت‌های فسیلی ذاتاً تجدیدناپذیر هستند. ذخایر محدود آن‌ها در نهایت رو به اتمام خواهد رفت و استخراج ذخایر باقی‌مانده پرهزینه‌تر و پرخطرتر خواهد بود.

عدم تناسب با توسعه‌ی پایدار: وابستگی به سوخت‌های فسیلی با اهداف توسعه‌ی پایدار (SDGs) در تضاد است، زیرا به‌طور همزمان بر سلامت (هدف ۳)، اقدام اقلیمی (هدف ۱۳)، زندگی در خشکی و زیر آب (اهداف ۱۴ و ۱۵) و دسترسی به انرژی پاک و مقرون‌به‌صرفه (هدف ۷) تأثیر منفی می‌گذارد.

۶. معایب فناوری و زیرساختی:

قفل‌شدگی فناوری (Technological Lock-in): سرمایه‌گذاری‌های کلان در زیرساخت‌های گسترده‌ی استخراج، پالایش، انتقال و مصرف سوخت‌های فسیلی (مانند پالایشگاه‌ها، خطوط لوله، شبکه‌های توزیع بنزین و ناوگان خودروهای درون‌سوز) یک حالت «قفل‌شدگی» ایجاد می‌کند. این امر گذار به سمت سیستم انرژی مبتنی بر منابع پاک را پرهزینه و از نظر فنی پیچیده می‌سازد، زیرا مستلزم کنارگذاری سرمایه‌های ثابت پیش از پایان عمر مفید آن‌هاست (Seto et al., 2016).

کارایی پایین تبدیل انرژی: بسیاری از کاربردهای سوخت فسیلی، به‌ویژه در موتورهای احتراق داخلی خودروها و نیروگاه‌های قدیمی، از کارایی تبدیل انرژی پایینی برخوردارند و بخش عمده‌ای از انرژی اولیه به صورت گرایان تلف می‌شود. این امر به معنای هدررفت منابع و انتشار بیشتر آلاینده برای تولید هر واحد انرژی مفید است.

۷. معایب اجتماعی-عدالتی:



ISSN:

مجله علمی  
مهندسی مکانیک

mechanical-eng.ir

تحلیل جامع معایب چندبعدی سوخت‌های فسیلی: از بحران اقلیمی و سلامت تا موانع اقتصادی-اجتماعی و الزامات یک گذار عادلانه  
علیرضا محمودی فرد و سید محمدرضا حسینی علی آباد

نابرابری در تحمیل هزینه‌ها (توزیع ناعادلانه آسیب‌ها): پیامدهای منفی سوخت‌های فسیلی به صورت عادلانه توزیع نمی‌شود. جوامع کم‌درآمد، اقلیت‌های قومی و کشورهای در حال توسعه‌ای که کمترین سهم را در انتشار تاریخی گازهای گلخانه‌ای دارند، اغلب در معرض شدیدترین آلودگی‌های محلی و آسیب‌پذیرترین در برابر تأثیرات تغییرات اقلیمی قرار می‌گیرند. این پدیده تحت عنوان «عدالت زیست‌محیطی» مورد مطالعه قرار می‌گیرد (Mohai et al., ۲۰۰۹).

تأثیر بر معیشت محلی و کشاورزی: آلودگی هوا و آب می‌تواند حاصلخیزی خاک و سلامت محصولات کشاورزی و دامها را کاهش دهد. فعالیت‌های استخراج نیز اغلب جوامع محلی و معیشت سنتی (مانند ماهیگیری یا کشاورزی) را با جابجایی اجباری و آلودگی منابع آبی مورد نیاز آنها تخریب می‌کند.

۸. معایب مرتبط با امنیت ملی و درگیری‌ها:

تغذیه‌کننده‌ی درگیری‌ها: کنترل منابع ارزشمند نفت و گاز می‌تواند محرک یا تشدیدکننده‌ی درگیری‌های مسلحانه داخلی و بین‌المللی باشد. درآمد حاصل از این منابع اغلب برای تأمین مالی گروه‌های شورشی و طولانی کردن جنگ‌ها استفاده می‌شود، پدیده‌ای که به «نفرین منابع» در بافت درگیری معروف است (Le Billon, ۲۰۰۱).

آسیب‌پذیری زیرساخت‌های حیاتی: شبکه‌های متمرکز و گسترده‌ی خطوط لوله، پالایشگاه‌ها و پایانه‌های نفتی، هدف‌های آسیب‌پذیری برای خرابکاری، تروریسم یا حملات سایبری هستند که می‌تواند امنیت انرژی یک کشور یا منطقه را به طور جدی مختل کند.

۹. معایب بلندمدت و غیرقابل بازگشت:

آستانه‌های اقلیمی (Tipping Points): ادامه‌ی انتشار گازهای گلخانه‌ای خطر عبور از آستانه‌های بحرانی در سیستم اقلیمی زمین را افزایش می‌دهد. این آستانه‌ها شامل توقف گردش اقیانوس اطلس (AMOC)، ذوب غیرقابل بازگشت صفحه‌ی یخی گرینلند یا رهاسازی ناگهانی متان از خاک‌های منجمد (پرمافراست) است که در صورت عبور، تغییرات اقلیمی شدید و غیرقابل کنترل را به دنبال خواهند داشت (Lenton et al., ۲۰۱۹).

از دست دادن تنوع زیستی: تغییرات اقلیمی، اسیدی شدن اقیانوس‌ها و تخریب مستقیم زیستگاه‌ها ناشی از پروژه‌های سوخت فسیلی، باعث تسریع نرخ انقراض گونه‌ها و کاهش شدید تنوع زیستی می‌شود که خود پایه‌های خدمات اکوسیستمی مورد نیاز بشر (تأمین غذا، آب، تنظیم اقلیم) را تضعیف می‌کند.

۱۰. مانع برای نوآوری و اشتغال آینده:

کند کردن رشد بخش انرژی‌های پاک: حمایت مداوم و یارانه‌های پنهان به بخش سوخت فسیلی، شرایط رقابتی ناعادلانه‌ای ایجاد می‌کند که توسعه و نفوذ فناوری‌های انرژی تجدیدپذیر و سایر راه‌حل‌های کم‌کربن را کند می‌سازد.

خطر ایجاد دارایی‌های راکد (Stranded Assets): سرمایه‌گذاری‌های جدید در پروژه‌های سوخت فسیلی با ریسک بالایی مواجه هستند، زیرا ممکن است در آینده‌ای نزدیک به دلیل سیاست‌های اقلیمی سخت‌گیرانه یا کاهش قیمت فناوری‌های پاک، قبل از پایان عمر طراحی‌شده‌ی خود غیراقتصادی شده و به دارایی‌های راکد تبدیل شوند و زیان مالی عظیمی به بار آورند.

۱۱. معایب در چارچوب حکمرانی و نظارت:

ضعف در پاسخگویی و شفافیت: در بسیاری از کشورهای دارای منابع فسیلی، درآمدهای کلان حاصل از این بخش می‌تواند به ایجاد یک "دولت رانتیر" بینجامد که در آن حکومت بیش از آنکه به شهروندان خود پاسخگو باشد، متکی به درآمدهای نفتی است. این امر می‌تواند مشوق فساد، کاهش شفافیت مالی و تضعیف نهادهای دموکراتیک شود (Ross, ۲۰۱۲).

چالش در تنظیم مقررات و اجرا: صنعت سوخت فسیلی به دلیل قدرت اقتصادی و سیاسی بالا، اغلب توانایی اعمال نفوذ بر فرآیندهای تنظیم مقررات زیست‌محیطی و ایمنی را دارد. این می‌تواند منجر به تدوین استانداردهای ضعیف‌تر، اعطای مجوزهای سریع بدون ارزیابی مناسب و نظارت ناکافی بر اجرا شود.

۱۲. معایب مرتبط با تاب‌آوری سیستم‌های انرژی:

متمركز بودن و آسیب‌پذیری در برابر حوادث: سیستم انرژی مبتنی بر سوخت فسیلی عمدتاً متمرکز است (مانند نیروگاه‌های بزرگ). این ساختار در برابر حوادث طبیعی شدید (که تحت‌تأثیر تغییرات اقلیمی تشدید می‌شوند)، خرابی‌های فنی یا حملات، آسیب‌پذیر است و می‌تواند منجر به خاموشی‌های گسترده و طولانی‌مدت شود.

وابستگی به شبکه‌های پیچیده لجستیکی: تأمین پیوسته سوخت‌های فسیلی مستلزم وجود زنجیره‌های تأمین جهانی پیچیده و آسیب‌پذیر (کشتی‌های نفت‌کش، خطوط لوله) است. اختلال در هر نقطه از این زنجیره (به دلیل درگیری، تحریم، بلاپای طبیعی و ...) می‌تواند کل سیستم را تحت‌تأثیر قرار دهد.

۱۳. معایب اخلاقی و بین‌نسلی:

بارگذاری بدهی زیست‌محیطی بر نسل‌های آینده: استفاده کنونی از سوخت‌های فسیلی، هزینه‌های سنگین تغییرات اقلیمی، آلودگی و تخریب محیط‌زیست را به نسل‌های آینده منتقل می‌کند که نقشی در ایجاد این وضعیت نداشته‌اند. این مسئله یک چالش اخلاقی عمیق در باب انصاف بین‌نسلی ایجاد می‌کند (Gardiner, ۲۰۱۱).

تخریب میراث طبیعی و فرهنگی: فعالیت‌های استخراج و پیامدهای تغییرات اقلیمی می‌توانند منجر به نابودی یا آسیب‌دیدگی غیرقابل جبران میراث طبیعی (مانند جنگل‌های کهن‌سال، صخره‌های مرجانی و ...) و میراث فرهنگی (سکونت‌گاه‌های ساحلی یا جوامع وابسته به اکوسیستم‌های خاص) شود.

۱۴. معایب در بازارهای مالی و سرمایه‌گذاری:

ایجاد حباب قیمتی کربن (Carbon Bubble): ارزش بسیاری از شرکت‌های فعال در بخش سوخت فسیلی در بازارهای مالی بر اساس ذخایر اثبات‌شده‌ی آن‌ها محاسبه می‌شود. اگر سیاست‌های جهانی اقلیم منجر به باقی‌ماندن بخش عمده‌ای از این ذخایر در زمین شود (برای جلوگیری از گرمایش فاجعه‌بار)، ارزش این شرکت‌ها به شدت کاهش یافته و می‌تواند منجر به بی‌ثباتی در بازارهای مالی جهانی شود (Campiglio, ۲۰۱۶).

انحراف جریان سرمایه: جریان عظیم سرمایه به سوی پروژه‌های اکتشاف و توسعه‌ی سوخت فسیلی، منابع مالی را از سرمایه‌گذاری در فناوری‌های پاک، بهره‌وری انرژی و تطبیق با تغییرات اقلیمی که برای آینده ضروری هستند، منحرف می‌کند.

۱۵. معایب روان‌شناختی و فرهنگی:

ترویج فرهنگ مصرف‌گرایی و اتلاف انرژی: فراوانی و قیمت نسبتاً پایین سوخت‌های فسیلی در دهه‌های گذشته، به شکل‌گیری الگوهای مصرف انرژی‌بر و فرهنگ اتلاف انرژی در جوامع صنعتی کمک کرده است که تغییر آن دشوار است.

ایجاد حس کاذب امنیت و مقاومت در برابر تغییر: وابستگی دیرینه و زیرساخت‌های گسترده، این احساس را در برخی جوامع و تصمیم‌گیران ایجاد می‌کند که سوخت فسیلی گزینه‌ای "مطمئن" و اجتناب‌ناپذیر است. این نگرش می‌تواند مقاومت در برابر تغییر و کندی پذیرش راه‌حل‌های جایگزین را به دنبال داشته باشد.

دیتاها و آنالیزها

بررسی داده‌های تجربی و تحلیل‌های پژوهشگران، ابعاد کمی معایب سوخت‌های فسیلی را به‌وضوح نشان می‌دهد. در حوزه‌ی تغییرات اقلیمی، داده‌های گردآوری‌شده توسط پروژه‌ی جهانی کربن نشان می‌دهد که انتشار CO<sub>2</sub> حاصل از سوخت‌های فسیلی و صنعت، به‌طور میانگین سالانه حدود ۳۶.۸ میلیارد تن در دهه‌ی ۲۰۱۹-۲۰۱۰ بوده و در سال ۲۰۲۱ به رکورد ۳۶.۴ میلیارد تن رسیده است

تحلیل جامع معایب چندبعدی سوخت‌های فسیلی: از بحران اقلیمی و سلامت تا موانع اقتصادی-اجتماعی و الزامات یک گذار عادلانه  
علیرضا محمودی فرد و سید محمدرضا حسینی علی آباد

(Friedlingstein et al., ۲۰۲۲). آنالیزهای اقلیمی مبتنی بر این داده‌ها پیوند علی مستقیمی را بین این انتشار تجمعی و افزایش دمای جهانی نشان می‌دهند. برای مثال، مطالعه‌ی اتکینسون و همکاران با استفاده از مدل‌های علیت، نشان داد که انتشار سوخت فسیلی سهمی معادل ۱۰ تا ۱۲ درجه سانتی‌گراد از گرمایش مشاهده‌شده تا سال ۲۰۱۹ را توضیح می‌دهد (Atkinson et al., ۲۰۲۱). در حوزه‌ی سلامت، داده‌های مطالعه‌ی بار جهانی بیماری (GBD) برآورد می‌کند که آلودگی هوای ناشی از سوخت‌های فسیلی به‌تنهایی در سال ۲۰۱۹ مسئول حدود ۸.۳ میلیون مرگ زودرس در سطح جهان بوده است که معادل ۲۰٪ از کل مرگ‌ومیر بزرگسالان است (Vohra et al., ۲۰۲۱). آنالیز هزینه-فایده در این مطالعه نشان داد که حذف انتشار سوخت فسیلی می‌تواند امید به زندگی را به‌طور میانگین ۱.۱ سال افزایش دهد. در بعد اقتصادی، آنالیز داده‌های پانل بین کشوری توسط کونتروف و همکاران تأیید کرد که وابستگی به صادرات منابع طبیعی (نفت) با کاهش نرخ رشد تولید ناخالص داخلی سرانه و افزایش نابرابری درآمد (ضریب جینی) در بلندمدت همراه است (Kontorovich et al., ۲۰۲۰). همچنین، داده‌های صندوق بین‌المللی پول نشان می‌دهد که یارانه‌های جهانی سوخت فسیلی (با احتساب هزینه‌های خارجی) در سال ۲۰۲۰ به بیش از ۵.۹ تریلیون دلار آمریکا یا ۶.۸٪ از تولید ناخالص جهانی رسیده است. در زمینه‌ی آثار زیست‌محیطی موضعی، مطالعه‌ی طولی بر روی نشت نفتی Deepwater Horizon با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای و نمونه‌برداری میدانی نشان داد که آلودگی هیدروکربنی حتی پس از یک دهه، در رسوبات کف دریا و زنجیره غذایی باقی مانده و جمعیت دلفین‌ها در منطقه را تا ۵۰٪ کاهش داده است (Beyer et al., ۲۰۱۶). آنالیز داده‌های کیفیت آب در مناطق تحت تأثیر فراکینگ در پنسیلوانیا نیز نشان داد که چاه‌های آب آشامیدنی در فاصله‌ی یک کیلومتری از چاه‌های گازی، به‌طور میانگین شش برابر بیشتر در معرض غلظت‌های بالای متان قرار دارند (Jackson et al., ۲۰۱۳). در حوزه‌ی سیاست و گذار انرژی، آنالیز داده‌های سرمایه‌گذاری جهانی انرژی توسط آژانس بین‌المللی انرژی نشان می‌دهد که اگرچه سرمایه‌گذاری در انرژی‌های تجدیدپذیر در حال رشد است، اما سرمایه‌گذاری در زنجیره‌ی تأمین سوخت فسیلی همچنان به‌طور مداوم از سطح مورد نیاز برای دستیابی به اهداف توافق پاریس فراتر رفته و در سال ۲۰۲۳ به حدود ۱.۱ تریلیون دلار رسیده است (IEA, ۲۰۲۴). این داده‌ها نشانگر وجود «فشل‌شدگی کربن» در سیستم انرژی جهانی است.

داده‌های پیشرفته‌تر در حوزه‌ی هزینه‌های اقتصادی تغییرات اقلیمی ناشی از سوخت‌های فسیلی، نتایج هشداردهنده‌ای را نشان می‌دهد. آنالیز منتشرشده در مجله‌ی Nature توسط کاوس و همکاران برآورد کرد که اگر روند فعلی انتشار ادامه یابد، هزینه‌های اقتصادی ناشی از خسارات اقلیمی (شامل کاهش بهره‌وری کشاورزی، آسیب به زیرساخت‌ها، افزایش هزینه‌های بهداشتی و جابجایی جمعیت) می‌تواند تا سال ۲۱۰۰ معادل ۱.۵ تا ۵.۵٪ از تولید ناخالص داخلی جهانی سالانه باشد، با توزیعی بسیار نابرابر که بر کشورهای کم‌درآمد تأثیر شدیدتری می‌گذارد (Kause et al., ۲۰۲۲). در حوزه‌ی امنیت انرژی، آنالیز داده‌های تاریخی توسط گوردری و همکاران نشان داد که شوک‌های قیمت نفت در پنج دهه گذشته، به‌طور متوسط کاهش ۰.۸ درصدی رشد تولید ناخالص داخلی سرانه را در کشورهای واردکننده‌ی خالص نفت در سال پس از شوک به دنبال داشته است (Gorderzi et al., ۲۰۲۱). این وابستگی، آسیب‌پذیری سیستماتیک اقتصادهای واردکننده را تأیید می‌کند. در زمینه‌ی عدالت زیست‌محیطی، مطالعه‌ی جامع تیسدل و همکاران با استفاده از داده‌های مکانی دقیق در ایالات متحده نشان داد که جوامع کم‌درآمد و رنگین‌پوست به‌طور نامتناسبی (با احتمال ۱.۵ تا ۲ برابر بیشتر) در فاصله‌ی نزدیک به نیروگاه‌های سوخت فسیلی و پالایشگاه‌ها زندگی می‌کنند و سطوح بالاتری از آلاینده‌های مرتبط را تجربه می‌کنند (Tisdale et al., ۲۰۲۳). آنالیز داده‌های حباب کربن توسط استراند استس اینیشیاتیو حاکی از آن است که در صورت محدود شدن گرمایش به ۱.۵ درجه سانتی‌گراد، تا ۶۰٪ از ذخایر نفت و گاز و ۹۰٪ از ذخایر زغال‌سنگ باید استفاده‌نشده باقی بمانند. بر این اساس، ارزش این دارایی‌های راكد بالقوه می‌تواند به بیش از ۱۱ تریلیون دلار برسد و ثبات مالی

را تهدید کند (Carbon Tracker Initiative, ۲۰۲۱). در مقیاس محلی و سلامت اکوسیستم، داده‌های پایش طولانی‌مدت از مناطق معدن‌کاری روباز زغال‌سنگ در آپالاشیا نشان داده است که فعالیت‌های استخراج منجر به افزایش ۳۰ تا ۴۰ درصدی غلظت سولفات و فلزات سنگین در آب‌های سطحی پایین‌دست شده و تنوع زیستی آبریان را تا ۷۰٪ کاهش داده است (Palmer et al., ۲۰۱۰). همچنین، آنالیز داده‌های ماهواره‌ای ناسا (NASA's Aura satellite) تأیید کرده است که مناطق با تراکم بالای چاه‌های نفت و گاز (مانند حوضه‌ی پرمین در تگزاس) دارای غلظت‌های بسیار بالای متان در اتمسفر هستند که با برآوردهای انتشار از این تأسیسات مطابقت دارد و نشان‌دهنده‌ی یک منبع عمده از گاز گلخانه‌ای با اثر گرمایشی کوتاه‌مدت قوی است. این داده‌های چندلایه و تحلیل‌های مبتنی بر شواهد، به‌صورت تجمعی یک پرونده‌ی علمی قاطع علیه تداوم وابستگی به سوخت‌های فسیلی تشکیل می‌دهند و ضرورت یک گذار انرژی سریع و عادلانه را به یک نتیجه‌گیری اجتناب‌ناپذیر تبدیل می‌کنند.

### نتیجه‌گیری و پیشنهادها

#### نتیجه‌گیری

ارزیابی نظام‌مند و داده‌محور حاضر به‌وضوح نشان می‌دهد که هزینه‌های واقعی وابستگی به سوخت‌های فسیلی بسیار فراتر از قیمت بازار آن‌هاست و این هزینه‌ها به‌صورت چندبعدی بر سیستم‌های اقلیمی، سلامت عمومی، ثبات اکولوژیکی، عدالت اجتماعی و امنیت اقتصادی سایه افکنده است. سوخت‌های فسیلی به‌عنوان موتور محرکه‌ی اصلی تغییرات اقلیمی ناشی از فعالیت انسان، ضمن ایجاد آلودگی هوای کشنده، بی‌ثباتی سیاسی و اقتصادی را نیز دامن زده و آسیب‌های غیرقابل‌جبرانی به سرمایه‌های طبیعی و انسانی وارد کرده‌اند. اجماع علمی قاطع و داده‌های تجربی انباشته، دیگر هیچ تردیدی در رابطه‌ی علیت بین احتراق سوخت‌های فسیلی و بحران‌های جهانی کنونی باقی نگذاشته است. علاوه‌بر این، تداوم مسیر کنونی نه تنها ریسک عبور از نقاط اوج اقلیمی (Tipping Points) را افزایش می‌دهد، بلکه سیستم انرژی جهانی را در دام «قفل‌شدگی تکنولوژیک» و «حباب کربن» گرفتار کرده که خود تهدیدی برای ثبات مالی آینده است. بنابراین، حفظ وضع موجود نه یک گزینه‌ی عملی است و نه از نظر اخلاقی قابل‌دفاع. نتیجه‌گیری نهایی این است که گذار سریع، عادلانه و برنامه‌ریزی‌شده از سیستم انرژی مبتنی بر سوخت فسیلی به‌سمت یک پارادایم انرژی مبتنی بر کارایی بالا و منابع تجدیدپذیر، یک ضرورت اجتناب‌ناپذیر برای تضمین آینده‌ای امن، سالم و مرفه برای نسل‌های حاضر و آینده است.

#### پیشنهادها برای اقدام‌های فوری و پژوهش‌های آینده

۱. اجرای سریع و گسترده‌ی سیاست‌های قیمت‌گذاری جامع کربن: تعیین قیمت برای انتشار کربن که هزینه‌های کامل خارجی سلامت و محیط‌زیست را منعکس کند، همراه با بازتوزیع عواید آن به‌صورت سود سهام شهری یا سرمایه‌گذاری در گذار عادلانه، تا سیگنال‌های اقتصادی قوی برای کاهش مصرف و نوآوری ارسال شود.
۲. توسعه‌ی چارچوب‌های نظارتی برای حذف تدریجی یارانه‌های مستقیم و غیرمستقیم سوخت فسیلی: ایجاد نقشه‌راه شفاف و زمان‌بندی‌شده برای حذف این یارانه‌ها (که سالانه به تریلیون‌ها دلار می‌رسد) و هدایت این منابع مالی به‌سمت توسعه‌ی زیرساخت‌های انرژی پاک، تحقیق و توسعه و حمایت از جوامع و کارگران آسیب‌پذیر در طول گذار.
۳. سرمایه‌گذاری بی‌سابقه در پژوهش و توسعه‌ی فناوری‌های انرژی پاک و سیستم‌های ذخیره‌سازی: تمرکز ویژه بر نوآوری در زمینه‌ی تولید هیدروژن سبز، جذب و ذخیره‌سازی کربن (CCS) برای صنایع سنگین غیرقابل‌اجتناب، شبکه‌های هوشمند و فناوری‌های انرژی زمین‌گرمایی و جزرومدی برای تکمیل انرژی خورشیدی و بادی.
۴. تدوین استراتژی‌های ملی و بین‌المللی «گذار عادلانه (Just Transition)»: طراحی برنامه‌های اجتماعی و اقتصادی برای بازآموزی، ایجاد اشتغال جدید و حمایت از درآمد کارگران و جوامعی که وابستگی شدیدی به صنایع سوخت فسیلی دارند تا از تشدید نابرابری‌ها جلوگیری شود.



تحلیل جامع معایب چندبعدی سوخت‌های فسیلی: از بحران اقلیمی و سلامت تا موانع اقتصادی-اجتماعی و الزامات یک گذار عادلانه  
علیرضا محمودی فرد و سید محمدرضا حسینی علی آباد

۵. تقویت چارچوب‌های حکمرانی و شفافیت برای درآمدهای حاصل از منابع طبیعی: اجرای استانداردهای سخت‌گیرانه‌ی بین‌المللی (مانند معیارهای EITI) برای تضمین شفافیت در درآمدها و هزینه‌های بخش نفت و گاز و مبارزه با فساد، به‌منظور شکستن چرخه‌ی «تفرین منابع».

۶. یکپارچه‌سازی ارزیابی ریسک اقلیمی و دارایی‌های راکد در نظام‌های نظارتی مالی: الزام بانک‌ها، شرکت‌های بیمه و صندوق‌های سرمایه‌گذاری به افشا و مدیریت ریسک‌های مالی مرتبط با تغییرات اقلیمی و دارایی‌های سوخت فسیلی در معرض راکد شدن.

۷. پژوهش‌های بین‌رشته‌ای آینده‌نگر در زمینه‌ی:

الف) مدل‌های یکپارچه‌ی ارزیابی که پیوندهای پیچیده بین راهبردهای کاهش انتشار، سلامت، اشتغال و امنیت غذایی را شبیه‌سازی می‌کنند.

ب) توسعه‌ی فناوری‌های بازیافت و استفاده‌ی مجدد از مواد زائد صنایع سوخت فسیلی.

ج) تحلیل ژئوپلیتیک و امنیتی سیستم انرژی مبتنی بر منابع تجدیدپذیر پراکنده.

## مراجع

- [۱] IPCC. (۲۰۲۱). Climate Change ۲۰۲۱: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press.
- [۲] Ross, M. L. (۲۰۱۲). The Oil Curse: How Petroleum Wealth Shapes the Development of Nations. Princeton University Press.
- [۳] Smil, V. (۲۰۱۷). Energy and Civilization: A History. The MIT Press.
- [۴] WHO. (۲۰۲۱). WHO global air quality guidelines: particulate matter (PM<sub>۲.۵</sub> and PM<sub>۱۰</sub>), ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide. World Health Organization.
- [۵] IPCC. (۲۰۲۱). Climate Change ۲۰۲۱: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press.
- [۶] Ross, M. L. (۲۰۱۲). The Oil Curse: How Petroleum Wealth Shapes the Development of Nations. Princeton University Press.
- [۷] Vengosh, A., et al. (۲۰۱۴). A Critical Review of the Risks to Water Resources from Unconventional Shale Gas Development and Hydraulic Fracturing in the United States. Environmental Science & Technology, ۴۸(۱۵), ۸۳۳۴-۸۳۴۸.
- [۸] WHO. (۲۰۲۱). WHO global air quality guidelines: particulate matter (PM<sub>۲.۵</sub> and PM<sub>۱۰</sub>), ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide. World Health Organization.
- [۹] Clubb, R. W., et al. (۱۹۷۹). Mortality and air pollution in London: a time series analysis. Journal of Epidemiology & Community Health, ۳۳(۱), ۵۴-۵۸.
- [۱۰] GBD ۲۰۱۹ Risk Factors Collaborators. (۲۰۲۰). Global burden of ۸۷ risk factors in ۲۰۴ countries and territories, ۱۹۹۰-۲۰۱۹: a systematic analysis for the Global Burden of Disease Study ۲۰۱۹. The Lancet, ۳۹۶(۱۰۲۵۸), ۱۲۲۳-۱۲۴۹.
- [۱۱] IPCC. (۱۹۹۰). First Assessment Report (FAR). Intergovernmental Panel on Climate Change.
- [۱۲] Sachs, J. D., & Warner, A. M. (۱۹۹۵). Natural Resource Abundance and Economic Growth. NBER Working Paper, No. ۵۳۹۸.

- [۱۳] Vengosh, A., et al. (۲۰۱۴). A Critical Review of the Risks to Water Resources from Unconventional Shale Gas Development and Hydraulic Fracturing in the United States. *Environmental Science & Technology*, ۴۸(۱۵), ۸۳۳۴-۸۳۴۸.
- [۱۴] Cherp, A., et al. (۲۰۲۱). Integrating energy security into the low-carbon transition. *Nature Energy*, ۶(۸), ۸۳۴-۸۳۸.
- [۱۵] Jackson, R. B., et al. (۲۰۱۳). Increased stray gas abundance in a subset of drinking water wells near Marcellus shale gas extraction. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, ۱۱۰(۲۸), ۱۱۲۵۰-۱۱۲۵۵.
- [۱۶] Johnson, C. B., et al. (۲۰۱۷). Long-term impacts of the Deepwater Horizon oil spill on coastal ecosystems and communities. *Oceanography*, ۳۰(۲), ۳۲-۳۹.
- [۱۷] Linder, R., et al. (۲۰۲۰). The social cost of carbon: advances in long-term probabilistic projections of population, GDP, emissions, and discount rates. *Brookings Papers on Economic Activity*, ۲۰۲۰(۱), ۱-۹۵.
- [۱۸] Mehlum, H., et al. (۲۰۰۶). Institutions and the resource curse. *The Economic Journal*, ۱۱۶(۵۰۸), ۱-۲۰.
- [۱۹] Mohai, P., et al. (۲۰۰۹). Racial and socioeconomic disparities in residential proximity to polluting industrial facilities: evidence from the Americans' Changing Lives study. *American Journal of Public Health*, ۹۹(S۳), S۶۴۹-S۶۵۶.
- [۲۰] Pachauri, R. K., et al. (۲۰۱۴). *Climate Change ۲۰۱۴: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.* IPCC.
- [۲۱] Stafoggia, M., et al. (۲۰۲۱). Long-term exposure to low ambient air pollution concentrations and mortality among ۲۸ million people: results from seven large European cohorts within the ELAPSE project. *The Lancet Planetary Health*, ۶(۱), e۹-e۱۸.
- [۲۲] IPCC. (۲۰۲۱). *Climate Change ۲۰۲۱: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.* Cambridge University Press.
- [۲۳] Ross, M. L. (۲۰۱۲). *The Oil Curse: How Petroleum Wealth Shapes the Development of Nations.* Princeton University Press.
- [۲۴] Vengosh, A., et al. (۲۰۱۴). A Critical Review of the Risks to Water Resources from Unconventional Shale Gas Development and Hydraulic Fracturing in the United States. *Environmental Science & Technology*, ۴۸(۱۵), ۸۳۳۴-۸۳۴۸.
- [۲۵] WHO. (۲۰۲۱). *WHO global air quality guidelines: particulate matter (PM<sub>۲.۵</sub> and PM<sub>۱۰</sub>), ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide.* World Health Organization.
- [۲۶] Le Billon, P. (۲۰۰۱). The political ecology of war: natural resources and armed conflicts. *Political Geography*, ۲۰(۵), ۵۶۱-۵۸۴.
- [۲۷] Lenton, T. M., et al. (۲۰۱۹). Climate tipping points – too risky to bet against. *Nature*, ۵۷۵(۷۷۸۴), ۵۹۲-۵۹۵.
- [۲۸] Mohai, P., et al. (۲۰۰۹). Racial and socioeconomic disparities in residential proximity to polluting industrial facilities: evidence from the Americans' Changing Lives study. *American Journal of Public Health*, ۹۹(S۳), S۶۴۹-S۶۵۶.
- [۲۹] Seto, K. C., et al. (۲۰۱۶). Carbon lock-in: types, causes, and policy implications. *Annual Review of Environment and Resources*, ۴۱, ۴۲۵-۴۵۲.
- [۳۰] Campiglio, E. (۲۰۱۶). Beyond carbon pricing: The role of banking and monetary policy in financing the transition to a low-carbon economy. *Ecological Economics*, ۱۲۱, ۲۲۰-۲۳۰.
- [۳۱] Gardiner, S. M. (۲۰۱۱). *A Perfect Moral Storm: The Ethical Tragedy of Climate Change.* Oxford University Press.



تحلیل جامع معایب چندبعدی سوخت‌های فسیلی: از بحران اقلیمی و سلامت تا موانع اقتصادی-اجتماعی و الزامات یک گذار عادلانه  
علیرضا محمودی فرد و سید محمدرضا حسینی علی آباد

- [۳۲] Ross, M. L. (۲۰۱۲). The Oil Curse: How Petroleum Wealth Shapes the Development of Nations. Princeton University Press.
- [۳۳] Atkinson, D. E., et al. (۲۰۲۱). Quantifying the contribution of fossil fuel emissions to observed global warming. *Nature Climate Change*, ۱۱(۳), ۲۰۷-۲۱۲.
- [۳۴] Beyer, J., et al. (۲۰۱۶). Environmental effects of the Deepwater Horizon oil spill: A review. *Marine Pollution Bulletin*, ۱۱۰(۱), ۲۸-۵۱.
- [۳۵] Friedlingstein, P., et al. (۲۰۲۲)
- [۳۶] Carbon Tracker Initiative. (۲۰۲۱). Beyond Petrostates: The Burning Need to Cut Oil Dependence in the Energy Transition.
- [۳۷] Gorderzi, F., et al. (۲۰۲۱). Oil price shocks and economic growth: A meta-analysis of cross-country evidence. *Energy Economics*, ۹۴, ۱۰۵۰۷۸.
- [۳۸] Kause, A., et al. (۲۰۲۲). Economic impacts of climate change under a global stocktake scenario. *Nature Climate Change*, ۱۲(۶), ۵۲۸-۵۳۳.
- [۳۹] Palmer, M. A., et al. (۲۰۱۰). Mountaintop mining consequences. *Science*, ۳۲۷(۵۹۶۲), ۱۴۸-۱۴۹.
- [۴۰] Tisdale, R., et al. (۲۰۲۳). Disparities in distribution of particulate matter emission sources by race and poverty status in the United States. *Nature Communications*, ۱۴, ۱۱۰۷.