

بررسی رابطه رشد اقتصادی و آلودگی زیست محیطی با استفاده از یک مدل شبیه سازی پویا

دکتر جمشید پژویان

استاد دانشکده اقتصاد دانشگاه علامه طباطبائی *

دکتر بیتا تبریزیان

استادیار دانشگاه آزاد اسلامی واحد رودهن **

صفحات: ۲۰۳-۱۷۵

تاریخ پذیرش: ۸۷/۷/۲۷

تاریخ دریافت: ۸۷/۶/۱۸

عکس العمل متقابل بین رشد اقتصادی و کیفیت محیط زیست موضوع بحث برانگیزی است که از دهه ۱۹۹۰ مورد توجه قرار گرفت. پژوهشهای تجربی درباره رابطه بین درآمد سرانه و انواع (مختلف) آلودگی متمرکز شده است، بنابراین پیشرفت فنی و سیاست محیط زیستی نادیده گرفته شده است. این مقاله برای نخستین بار (در ایران) یک مدل شبیه سازی پویا برای تحلیل کنی سیاست محیط زیستی در ایران ارائه می کند. در این مدل با استفاده از معادلات عرضه و تقاضای انرژی، مسیر انتشار آلاینده های زیست محیطی شبیه سازی می شود. معادله تقاضای انرژی تابعی از قیمت، درآمد و جمعیت است که به روش حداقل مربعات معمولی تخمین زده می شود. در معادله عرضه دو حالت مجزا برای فناوریهای آلوده کننده موجود و فناوریهای با آلودگی کم در نظر گرفته می شود. مدل برای سه آلاینده (دی اکسید کربن، اکسیدهای گوگرد و ذرات معلق) با توجه به سناریوهای مختلف شبیه سازی می شود. نتایج نشان می دهد درآمد همچنان یک متغیر مهم در تعیین مقدار انتشار آلودگی است و با اعمال سیاست محیط زیستی جانشینی گاز طبیعی با فرآورده های نفتی می توان زودتر از آنچه منحنی محیط زیستی کوزنتز نشان می دهد، آلاینده ها را کاهش داد ولی این به معنای استفاده بی رویه از این انرژی تجدید پذیر نیست؛ بنابراین با اتخاذ سیاستهای مناسب قیمتی و سرمایه گذاری در فناوریهای پاک می توان آلودگی را همراه با افزایش درآمد کاهش داد.

طبقه بندی JEL: O53; Q58; C15; Q56; O49

کلید واژه ها:

ایران، رشد اقتصادی، محیط زیست، آلودگی محیط زیست، شبیه سازی پویا

* E.mail: j_pajooyan@yahoo.com

** E. mail: bt.tabrizian@gmail.com

مقدمه

رابطه بین توسعه اقتصادی و محیط زیست تاریخچه طولانی دارد که از دهه ۱۹۷۰ با مطالعات مربوط به محدودیتهای رشد و پایداری شروع می‌شود. در طی این دهه توجه اقتصاد محیط‌زیست به رشد اقتصادی معطوف شد که به جز عوامل نیروی کار و سرمایه، منابع طبیعی نیز در تابع تولید قرار گرفت و هدف عمده آن بهترین مسیر بهینه رشد اقتصادی بود که با توجه به فرض ثابت بودن ذخیره منابع تجدیدناپذیر و منابع تجدیدپذیر بدست می‌آمد. در دهه ۱۹۵۰، «سیمون کوزنتز»^۱ (۱۹۵۵) به صورت تجربی یک رابطه U شکل معکوس بین توزیع درآمد و رشد آن پیدا کرد که «منحنی کوزنتز» نامیده شد. این رابطه شباهت نسبی آشکاری با این بحث دارد که با افزایش درآمد سرانه در اقتصاد، آثار زیست محیطی ناشی از فعالیتهای اقتصادی در ابتدا افزایش یافته و سپس به حداکثر می‌رسد و پس از آن کاهش می‌یابد و رابطه زنگ شکل بین درآمد سرانه و آلودگی «منحنی محیط زیستی کوزنتز»^۲ (که بعد از این به اختصار EKC می‌گوییم) نامیده شده است. یکی از انتقادات وارد بر این منحنی پیش فرض وجود فناوریهای کاهنده آلودگی است، در صورتیکه این فناوریها، اغلب بایستی در واکنش به سیاستهای جدید، توسعه داده شوند؛ فرآیندی که ممکن است چندین دهه زمان ببرد.^۳ در این فاصله عواملی که هزینه‌ها، منافع و اثرات فیزیکی سیاستهای محیط زیستی را تعیین می‌کند، به صورت قابل توجهی با پیشرفت فنی، تغییر می‌کند. رشد درآمد و آلاینده‌ها عمدتاً تقاضا برای تولیدات یا خدمات با شیوه‌های آلوده‌کننده را تغییر می‌دهند. مدل‌های شبیه‌سازی پویا، ما را قادر می‌سازد تا رویکرد ایستای مقایسه‌ای را با در نظر گرفتن توسعه فناوری، طی زمان (و وقفه‌ها) بهبود بخشیم.^۴ همچنین این مدل یک روش عملی برای در نظر

^۱. Simon Kuznets

^۲. Environmental Kuznets Curve

^۳. برای مثال توسعه فناوریهای سولفور زدایی از گاز مایع برای رسیدن به یک سطح عملکرد راضی‌کننده، ۲۵ سال زمان می‌برد. برخی فناوریها سریعتر پدیدار می‌شوند؛ برای مثال سوختهای بدون سرب و مبدلهای کاتالیستی برای کنترل انتشار آلودگیهای ناشی از وسایل نقلیه.

^۴. تحلیل پویا مستلزم آن است که ابزارهای مختلف سیاستی در مقاطع مختلف زمانی را بکار بگیریم؛ برای مثال روی تحقیق و توسعه (R&D) تأکید کنیم و پیش از آنکه به سمت مالیاتی کامل یا سیاستی منظم حرکت کنیم، طرحها و انگیزه‌های مالیاتی را برای نوآوری (آموزش توأم با یادگیری) در مراحل اولیه اجرا نشان دهیم.

گرفتن گزینه‌های مختلف سیاستی ارائه می‌کند. بدین ترتیب هدف اصلی رویکرد شبیه‌سازی پویا این است که به ما اجازه می‌دهد با متغیرهای فناوری و سیاست محیط زیستی بعنوان متغیرهایی مستقل از درآمد رفتار کنیم که این یک جنبه مهم در این مدل است.^۱

در روند حرکت جهانی به سوی توسعه پایدار، توجه به آسیب‌های محیط زیستی ناشی از بخش انرژی امری ضروری محسوب می‌شود. این مدل از معادلات عرضه و تقاضای انرژی و انتشار آلاینده‌ها منتج می‌شود. مسیر انتشار آلاینده‌ها با استفاده از یک مدل شبیه‌سازی پویا نشان داده می‌شود. بخش دوم به ادبیات رابطه رشد اقتصادی و محیط زیست پرداخته و در بخش سوم نیز روش کار و مدل بیان خواهد شد. در بخش چهارم مدل کاربردی برای ایران ارائه می‌شود. این مدل در دو حالت، برای نشان دادن سیاست‌های محیط زیستی متفاوت و در چهار سناریوی مختلف رشد اقتصادی و قیمت برای سه آلاینده دی‌اکسید کربن، اکسیدهای گوگرد و ذرات معلق مورد بررسی قرار می‌گیرد و در نهایت در بخش پنجم به ارزیابی نتایج و توصیه‌های سیاستی می‌پردازیم.

ادبیات رابطه رشد اقتصادی و محیط زیست

پژوهش‌های مقطعی بسیاری درباره آنچه که فرضیه یا منحنی U شکل معکوس محیط زیستی کوزنتز نامیده می‌شود، انجام شده است. در این روش انتشارات یا چگالی انتشارات آلاینده‌ها به یک تابع درجه دوم یا سوم درآمد سرانه مرتبط می‌شود. برای تعدادی از آلاینده‌ها، این مطلب یافت می‌شود که در بین کشورها آلودگی با درآمد افزایش می‌یابد؛ به اوج می‌رسد و سپس کاهش می‌یابد. به نظر می‌رسد این کاهش به دلیل مثبت بودن اثرکشش درآمدی نسبت به کیفیت محیط زیست در درآمدهای بالا است. هنگامی که درآمدها بالا است، برای ارائه سیاست‌های لازم، فشارهایی به دولت‌ها وارد می‌شود که فقط جوامع با درآمد بالا شرایط بکارگیری این سیاست‌ها را دارند. برخی مطالعات، متغیرهایی نظیر چگالی جمعیت را در معادلات بکار برده‌اند ولی معمولاً درآمدهای سرانه بر سایر متغیرها غلبه دارد. این

^۱ بطور مشابه برخی از فرضیه پردازیهای اخیر در زمینه اقتصاد محیط زیست، مدل‌های سیاستی محیط زیستی را گسترش داده‌اند که رقابت ناقص، عدم تقارن اطلاعاتی و سایر تورش‌های اقتصادی را در بر می‌گیرد.

مدل‌ها عمدتاً شامل یک فرم خلاصه شده است که رابطه بین یک شاخص مؤثر محیط زیستی و درآمد سرانه را نشان می‌دهد. متغیر معمول و مستقل اغلب مدل‌ها درآمد سرانه است ولی برخی مطالعات، اطلاعات مربوط به درآمد را به برابری قدرت خرید تبدیل و از آن استفاده می‌کنند. عده‌ای نیز درآمد را بر حسب نرخ مبادله بازار بکار می‌برند. مطالعات مختلف متغیرهای دیگری نظیر چگالی جمعیت، باز بودن تجارت، توزیع درآمد، متغیرهای جغرافیایی و نهادی را نیز در نظر می‌گیرند^۱.

در مقابل، مطالعات مهندسی-اقتصادی حاکی از این است که اگر سیاستها در جای مناسب بکار گرفته شود، نقطه عطف، چندین دهه زودتر اتفاق می‌افتد و دلیل آن نیز گزینه‌هایی است که در حال حاضر برای کاهش آلودگی در دسترس می‌باشد؛ این گزینه‌ها برای کشورهای صنعتی در دسترس نبوده و تنها کشورهای در حال توسعه در صورت تمایل می‌توانند در مراحل اولیه توسعه اشکال مختلف آلودگی داخلی و منطقه‌ای را کاهش دهند. برای نشان دادن این موضوع لازم است که از یک تک معادله به سوی یک مدل معادلات همزمان شامل تقاضای مصرف کننده، گزینه‌های فناوری و جایگزینی در طرف عرضه، انتشارات، هزینه‌ها و قیمت برویم. مدل‌هایی از این نوع گاهی برای مطالعات تفسیر آب و هوا نیز بکار برده می‌شوند.

«شفیک»^۲ (۱۹۹۴) در مقاله خود بحث تجربی را با استفاده از یک تکنیک مدلسازی نسبتاً ساده بر اساس تعداد زیادی شاخصهای کیفیت محیط زیستی در کشورها بکار می‌گیرد. مدل به صورت رگرسیون پانل^۳ و بر اساس تخمینهای حداقل مربعات معمولی با استفاده از اطلاعات مربوط به ۱۴۹ کشور برای دوره ۹۰-۱۹۶۰ تخمین زده می‌شود. متغیر وابسته شاخص کیفیت محیط زیست و متغیر توضیحی درآمد سرانه است. نتایج نشان می‌دهد که با افزایش درآمد، برخی شاخصهای محیط زیستی نظیر آب و فاضلاب بهبود یافته و برخی

^۱ فرضیه EKC به شاخص کل آلودگی مربوط می‌شود. اگر به گازهای گلخانه‌ای و ضایعات وزن بیشتری داده شود، دیگر مدرکی برای وجود EKC نخواهیم داشت و نیز اگر آلودگی هوا در شهر، وزن بسیار زیادی در این شاخص داشته باشد احتمالاً فرضیه EKC صحیح است.

^۲ Nemat shafik

^۳ Panel

شاخصها نظیر ذرات معلق و دی اکسید گوگرد نخست بدتر شده و سپس بهبود می‌یابند و بعضی دیگر از این شاخصها؛ مانند اکسیژن حل شده در رودخانه‌ها، زباله‌های جامد شهری و انتشار کربن به آهستگی بدتر می‌شوند. فناوری که متغیر روند زمانی جانشین آن شده است اثر مثبتی بر روی کیفیت محیط زیست دارد و سطح درآمد را کنترل می‌کند. نتایج حاکی از این است که بیشتر کشورها سیاستهایی را اتخاذ می‌کنند و سرمایه‌گذاریهایی را انجام می‌دهند که تخریب محیط زیست مربوط به رشد را کاهش می‌دهند. وی خاطر نشان می‌کند که فناوری و سیاستهای محیط زیستی را در مدل وارد نکرده است. این نتایج با یافته‌های «گروسمن و کروگر»^۱ (۱۹۹۳) «وسلدن و سانگ»^۲ (۱۹۹۲) که معتقدند بین آلوده‌کننده‌های هوا و درآمد، سازگار است. گروسمن و کروگر سطح غلظتهای محیطی آلودگی هوا و آب شهری را روی مکعب تولید ناخالص داخلی (GDP)، مقادیر با وقفه چند جمله‌ای GDP، روند زمانی، تراکم جمعیت و شاخصهای ماهیت محیط اطراف (ساحلی، مسکونی و غیره) تخمین زدند. آنها در یک مدل با اثرات تصادفی، رابطه کاهش یکنواخت بین متغیرهای ذرات معلق و درآمد پیدا کردند؛ نتایج آنها در مدل با اثرات ثابت با نتایج شفیک که یک رابطه «زنگ شکل» بدست آمده بود، در تضاد است. در نتایج تجربی سلدن و سانگ نیز نقاط عطف بالاتری برای آلوده‌کننده‌های هوا یافت شد. آنها جریان انتشار کل را استفاده کردند که بطور مستقیم کیفیت محیط زیست و اثر سلامتی را اندازه می‌گیرد. ولی شفیک از معیار موجودی آلودگی هوای محیط شهری استفاده می‌کند؛ چرا که درآمد مناطق شهرنشین از درآمدهای ملی بالاتر است. تخمین نقاط عطف بر اساس آلودگی شهری و درآمد محلی بیشتر از تخمین نقاط عطف برای انتشار کل و درآمد ملی است. «هلتز، ایکین و سلدن»^۳ (۱۹۹۲) انتشارات دی‌اکسیدکربن را با استفاده از معادلات درجه دوم سطوح و لگاریتم GDP بررسی کردند. آنها دریافتند انتشار کربن به صورت یکنواخت افزایش می‌یابد. «گالوتی و لانزا»^۴ (۲۰۰۴) مهمترین انتقاد در تحلیل EKC را حذف متغیرهای توضیحی مربوطه در رابطه اصلی

¹ Grossman & Kruger, (1993).

² Selden & Song, (1992).

³ Holtz & Eakin & Selden, (1992).

⁴ Galeatti & Lanza , (2004).

می‌دانند. بدین ترتیب علاوه بر متغیرهای درآمد و زمان باید متغیر تجارت را بدلیل فرضیه پناهگاه آلودگی^۱ (PHH)، متغیر قیمت انرژی را برای محاسبه شدت استفاده از مواد خام و تعداد دیگری از متغیرهای اقتصادی و سیاسی را به دلیل ماهیت کالای عمومی محیط زیست در نظرمی‌گیرند.

در همین رابطه، یکی از انتقادات «کل»^۲ (۲۰۰۴) بر EKC آن است که این منحنی، الگوهای تجاری را که ممکن است خود تا حدی باعث کاهش آلودگی در اقتصاد با درآمد بالا و به صورت معکوس در اقتصاد با درآمد پایین شود، را در نظر نمی‌گیرد. اگر فرضیه PHH وجود داشته باشد، آنگاه EKC انتقال آلودگی از کشورهای شمال به کشورهای جنوب را نشان می‌دهد. توضیح دیگر درباره استقرار مجدد بنگاهها (از کشورهای توسعه یافته به کشورهای در حال توسعه) وابستگی صنایع سنگین به بازارهای داخلی است. این حقیقت که کشورهایی با مقررات محدود، ویژگیهای معینی نظیر ارتشاء، زیربنای ضعیف و قانونگذاری نامطمئن و غیرقابل اعتماد دارند، موجب می‌شود که سرمایه‌گذاری انجام نپذیرد و این امکان وجود دارد که سرمایه‌گذاران خارجی به دلیل نگرانی از شهرت بین المللی خود خواهان استفاده از مزیت خلاء مقررات محیط زیستی نباشند. دلیل آخر این است که گرچه سهم بیشترین بخشهای آلوده بر از GDP مانند تولید صنعتی اغلب، در حال کاهش است، ولی سطوح تولید کاهش نمی‌یابد.

نمای کلی مدل شبیه‌سازی

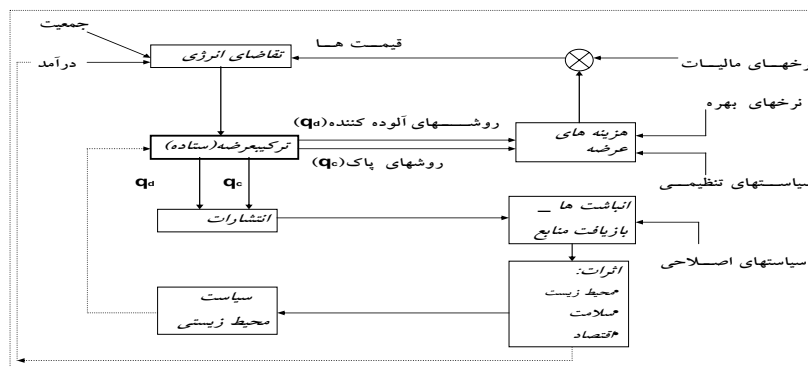
ساختار مدل به صورت اجمالی در شکل نخست دیده می‌شود که دنیسون در سال ۲۰۰۱ این مدل را ارائه داد و اجزای اولیه شامل:

معادلات تقاضا، ترکیب عرضه، هزینه‌های عرضه، قیمتها و مالیاتها، انتشارات و انباشتها، اثرات زیست محیطی و منافع اقتصادی است. روش تخمین پارامترها انتخابی است.

۱. کاهش در موانع تجاری سبب می‌شود که صنعت آلوده‌بر از کشورهای با مقررات شدید؛ یعنی همان کشورهای توسعه یافته، به کشورهای با مقررات ضعیف‌تر یعنی کشورهای در حال توسعه هستند منتقل شود.

۲. Malthew A. Cole, (2004).

در اینجا از مطالعات اقتصادسنجی برای تخمین روابط تقاضا و از ادبیات مهندسی- اقتصاد برای تشخیص فناوریهای انتخابی و هزینه‌های آنها و ویژگیهای آلودگی استفاده می‌شود. ساختار مدل‌های شبیه‌سازی بگونه‌ای است که با استفاده از این مدل‌ها می‌توان به پرسشهای «اگر ... آنگاه» پاسخ داد. در بخش محیط زیست به دلیل کمبود آمار و اطلاعات از مدل‌های شبیه‌سازی استفاده می‌شود. محاسبه ضرایب آلاینده‌ها برای کشورهای مختلف از طریق استانداردهای موجود امکانپذیر است.



شکل ۱. نمای کلی مدل شبیه‌سازی

منبع: اندرسون و کاوندیش (۲۰۰۱).

تابع تقاضای انرژی

در این مدل نیاز داریم که تابع تقاضای انرژی را تخمین بزنیم. در مبحث مدل‌سازی تقاضای انرژی، علاوه بر روش‌شناسی اقتصادی- که عمدتاً به طرح مدل‌های اقتصادسنجی منجر می‌شود- روشهای دیگری نیز بکار می‌رود. در مدل‌های اقتصادسنجی و آماری، روابط فنی وسایل انرژی بر در نظر گرفته نمی‌شود. این مدل‌ها برای برآورد تقاضای انرژی در تمامی سطوح مصرف‌کننده بکار می‌روند، بدون اینکه ساختار تکنولوژیکی شبکه‌های مصرف را مدنظر

قرار دهند، بنابراین روشهای مهندسی یا تحلیل فرآیند بوجود آمدند ولی در نظر نگرفتن متغیرهای اقتصادی نظیر قیمت و درآمد از ایرادات این مدلها بوده و نیاز به داشتن اطلاعات دقیق و کامل استفاده از آنها را محدود نموده است. ولی مزیت مدلهای اقتصادسنجی نیاز آنها به دادههای کم در مقایسه با مدلهای مهندسی می باشد. بدین ترتیب روشهای تلفیقی که در آن روشهای مهندسی - اقتصادسنجی و یا سایر روشها به کمک یکدیگر می آیند، تدوین می شوند. مدلهای مبتنی بر تئوریهای اقتصاد خرد بر رفتار عقلایی مصرف کننده انرژی استوار است.

مدلهای اقتصادسنجی می توانند بر حسب بخشهای مختلف اقتصادی نیز طراحی شوند. در واقع این مدلها از تلفیق رفتار تک تک حاملهای اقتصادی هر بخش متجانس حاصل می شود. البته در بسیاری موارد جمعی سازی با تورشهایی همراه است که دلیلش تفاوت عاملهای اقتصادی هر بخش می باشد؛ اما برای دستیابی به مدلهای سطح بالاتر، بکارگیری برخی فرضهای ساده سازی ضروری می نماید. با تکیه بر واقعیات موجود و نیز تئوریهای اقتصادی می توان تقاضای انرژی و یا انواع آن را برای بخش خاصی طراحی نمود.^۱ در حالت کلی رابطه تقاضای انرژی بدین صورت است:

$$D_t = f(y_t, P_t, N_t) \quad (1)$$

که D_t : تقاضای انرژی، y_t : درآمد سرانه، P_t : قیمت انرژی و N_t جمعیت است. این معادله را به صورت سرانه، dt ، و نسبت به سال پایه، d_0 ، نیز می توان نوشت:

$$\left(\frac{d_t}{d_0}\right) = \left(\frac{y_t}{y_0}\right)^\alpha \left(\frac{P_t}{P_0}\right)^\beta \quad (2)$$

^۱. تهیه مدل ریاضی عوامل مؤثر در تقاضای انرژی به تفکیک حاملهای انرژی، مؤسسه مطالعات بین المللی انرژی، (۱۳۷۴)، جلد ۲۰.

α و β به ترتیب کشش درآمدی و قیمتی هستند. اساس این مدل‌ها در ارتباط بین متغیرهای تولید ناخالص داخلی (درآمد) و قیمت حاملهای انرژی و تقاضای حاملها بوده که رفتار حاکم بر این متغیرها در گذشته به آینده نیز تعمیم داده می‌شود.

عرضه و انتخاب فناوری در کنترل آلودگی: مبانی نظری

در اینجا نیاز به ارائه مطالعات بیشتری داریم تا بتوانیم ارزیابی بالقوه‌ای از پیشرفت فنی برای حل مسائل محیط زیستی انجام دهیم. «کمپ»^۱ (۱۹۹۷) در مطالعه خود نتیجه می‌گیرد که هزینه هر واحد کاهش انتشار ناشی از سولفور زدایی گاز خروجی سالیانه ۴٪ در طی دوره بیست ساله کاهش نشان داده و هزینه مبدل‌های کاتالیستی در طی ده سال تا ۹٪ کاهش یافته است.

در مدل عرضه بهینه انرژی^۲ نیز نشان داده می‌شود که جایگزین کردن نیروگاههای سیکل ترکیبی و گازی به ترتیب با ۶۰ و ۶۱ ریال بر کیلو وات ساعت با احتساب هزینه محیط زیستی و کنترل آلودگی برتری دارد. همچنین استفاده از انرژی تجدید پذیر نو نظیر انرژی زمین گرمایی و آبی کوچک نسبت به انرژی خورشیدی و زیست توده مقرون به صرفه‌تر است. همچنین استفاده از نیروگاه بخاری گازسوز هزینه تهیه آب گرم از برق را به چهار ریال بر کیلو وات ساعت می‌رساند. در مطالعه دیگری که توسط محمد صادق احدی و همکاران (۱۳۸۵) انجام شده، نشان داده می‌شود اعمال توأم سیاست قیمت‌گذاری و بهره‌وری انرژی روند رشد تقاضای حاملهای انرژی را از ۵/۳ درصد در سال به ۱/۸۳ درصد می‌رساند. جایگزینی گاز طبیعی به عنوان یک سوخت تمیز به جای فرآورده‌های نفتی نیز اهمیت بسزایی در کاهش انتشار آلاینده‌ها و افزایش درآمدهای نفتی دارد. شهرام وصفی اسفستانی و زنگویی‌نژاد (۱۳۸۵) در مطالعه خود نشان می‌دهند که در صنایع انرژی بر، بایستی در پی استفاده از تکنولوژی‌های جدید و روشهای تولید سازگار با محیط زیست باشیم.

^۱. Kemp, (1997).

^۲. دفتر برنامه‌ریزی انرژی، گروه عرضه، مدل عرضه بهینه انرژی، وزارت نیرو، معاونت امور انرژی، (بهمن ۱۳۷۷).

از نظر اقتصادی و زیست محیطی این فناوریهای تمیز سه ویژگی مشترک دارند: نخست، تغییر فنی موجب کاهش زیاد انتشار می‌شود. به جز اکسیدهای نیتروژن ما شاهد کاهش دو تا سه برابر انتشار در هر واحد ستاده و در برخی موارد حذف کامل آلاینده هستیم. همچنین ما شاهد عدم پیوستگی در انتقال از موقعیت آلوده‌کننده به وضعیتی با آلوده‌کنندگی کمتر هستیم. بنابراین باید به دنبال فرم ساختاری باشیم که نمونه مجزایی از حداقل دو گروه فناوری در نظر بگیرد. دوم، در حالیکه تغییر در روشها با افزایش هزینه‌ها همراه است، تأثیرات آن روی کل هزینه‌های عرضه نسبتاً کوچک است و به دلیل دستاوردهایی که در کارایی بخش دیگری ایجاد می‌کند ارزشمند است؛ برای مثال با استفاده از گاز هزینه‌های عرضه انرژی کاهش می‌یابد (استراتژی برد-برد). سوم، ما نیاز داریم که وقفه‌ها را در نظر بگیریم. وقفه بین تصمیمات سیاسی اولیه برای کاهش آلودگی و زمانی که آلودگی بالاخره با مقبولیت اجتماعی آن تصمیم کاهش می‌یابد، قابل توجه است. حتی وقتی فناوریها در دسترس هستند، محدودیتهایی در میزان بکارگیری وجود دارد که به دلیل طول عمر کارخانجات (آلوده‌کننده) موجود و تجهیزات، مورد استفاده است. این اطلاعات مبنایی برای تصمیم‌گیری بر روی اشکال ساختاری است؛ برای مثال تا چه حد تغییرات فنی در سرمایه‌گذاری جدید متبلور می‌شود یا از طریق جایگزینی نهاده‌ها صورت می‌پذیرد؟

ساختار مدل

اگر انتشار آلاینده‌های یک بخش خاص مثلاً تولید برق را در نظر بگیریم با فرض عدم پیوستگی مربوط به تغییرات فنی نیاز به معادلات جداگانه برای هر فناوری داریم که آن را با دو گروه معادله نشان می‌دهیم: یک معادله فناوریهای آلوده‌کننده موجود و دوم فناوریهای با آلوده‌کنندگی کم رانشان می‌دهد. q_t به کل عرضه انرژی در دوره t ، سهم سرمایه‌گذاری اضافی¹ در روشهای با آلوده‌کنندگی کم، δ نرخ استهلاک موجودی سرمایه و اندیس d, c به ترتیب به گزینه‌های کم آلوده‌کننده (پاک) و آلوده‌کننده (کثیف) اشاره می‌کنند. با فرض تعادل بین عرضه و تقاضا $[q_t = f(y_t, p_t, N)]$ ، افزایش ستاده مستلزم این

¹. Incremental

است که سرمایه‌گذاریهای جدید با تقاضای اضافی، Δd_t ، به علاوه موجودی سرمایه مستهلک شده، δq_t ، برابر باشد. در اینجا نرخ استهلاک یا استهلاک زود هنگام فناوریهای آلوده کننده توسط یک متغیر انتخاب r_t در نظر گرفته می‌شود. r_t نرخ استهلاک (یا کنار گذاشتن زود هنگام) بخشی از موجودی سرمایه است که به پایان عمر اقتصادی معمول خود نمی‌رسد.^۱ بدین ترتیب، ستاده‌ای که از فناوریهای پاک‌تر در دوره t بدست می‌آید با مجموعه تولید ناشی از سرمایه‌گذاری جدید در دوره t و تولید ناشی از سرمایه دوره قبل به علاوه استهلاک زود هنگام (به دلیل جایگزینی با سرمایه جدید) برابر است.

$$q_{c,t} = s_t(\Delta d_t + \delta q_{t-1}) + (1 - \delta) q_{c,t-1} + r_t q_{d,t-1} \quad (۳)$$

و به صورت مشابهی برای فناوریهای آلوده کننده می‌توان نوشت:

$$q_{d,t} = (1 - s_t)(\Delta d_t + \delta q_{t-1}) + (1 - \delta) q_{d,t-1} - r_t q_{d,t-1} \quad (۴)$$

اگر معادله (۳) و (۴) را جمع کنیم داریم: $\Delta q_t = \Delta d_t$ نرخ کنار گذاشتن کارخانه‌ای که به پایان عمر اقتصادی خود نزدیک می‌شود در بخش انرژی ۰/۰۳ با طول عمر ۲۵-۳۰ سال است.^۲ دو روش برای مواجهه با متغیر s_t که نشان‌دهنده سهم سرمایه‌گذاری جدید در فناوریهای پاک‌تر است داریم. نخست اینکه تابع درونزایی از مالیاتهای آلودگی یا سیاستها در نظر بگیریم. دوم آن را یک متغیر تصمیم‌گیری برونزا در نظر گرفته و مسیرهای مختلفی برای s_t پیدا کنیم. روش دوم ما را قادر می‌سازد تا سناریوهای گوناگونی را در نظر بگیریم و هزینه‌های کاهش آلودگی را برای مسیرهای زمانی مختلف این کاهش تخمین بزنیم. معادله‌های (۳) و (۴) هسته اصلی مدل هستند. این معادله‌ها موقعیتی را نشان می‌دهند که

^۱ هنگامی که یک کارخانه زود کنار گذاشته می‌شود و یا با یک کارخانه جدید جایگزین می‌شود.

^۲ Dennis Anderson and William Cavendish, "Dynamic Simulation on Environmental Policy Analysis: Beyond Comparative Statics and the Environmental Kuznets Curve", *Oxford Economic Papers*, 53, (2001), p. 729.

افزایش در تقاضا به علاوه سرمایه‌گذاری مستلزم جایگزینی با داراییهایی هستند که مستهلک شده‌اند که به یکی از دو روش می‌تواند صورت پذیرد: ابتدا، از طریق سرمایه‌گذاری پیوسته در فناوریها و روشهای جاری دوم از طریق تغییر روش جهت ایجاد همان محصول یا خدمت-کیلو وات ساعت، گرما، روشنایی و غیره- ولی با سطوح کمتر آلودگی.

مسیر زمانی انتشار آلاینده‌ها: شبیه‌سازی پویا در مقابل EKC

کل انتشار آلاینده با $E_{j,t}$ نشان داده می‌شود که بدین صورت بدست می‌آید:

$$E_{j,t} = \theta_{c,j,t} q_{c,t} + \theta_{d,j,t} q_{d,t} \quad (5)$$

را نشان می‌دهند. $\theta_{c,j,t}$ و $\theta_{d,j,t}$ به ترتیب انتشار آلاینده j در واحد ستاده با روشهای پاک و آلوده‌کننده

اگر روشهای پاک کاملاً جانشین روشهای آلوده کننده شوند آنگاه $q_t = q_{c,t}$ ، سطح بلندمدت انتشار نسبت به سطوح اولیه آن خواهد بود:

$$E_{j,t} / E_{j,0} = (\theta_{c,j,t} / \theta_{d,j,0}) \times (q_t / q_0) \quad (6)$$

نسبت $\theta_{c,j,t}$ به $\theta_{d,j,t}$ در بخش انرژی از 10^{-1} تا 10^{-3} و حتی بیشتر می‌تواند باشد¹ بطوریکه وقتی فناوریهای جدید جایگزین روشهای قدیمی می‌شوند به کاهش بسیار بزرگی در انتشار آلودگیها - حتی با وجود افزایش زیاد ستاده- می‌توان دست یافت. برای اینکه شکل روشن‌تری از مسیر پویایی انتشار بدست آوریم معادله‌های (3) و (4) را در (5) جایگزین می‌کنیم. چون $q_{c,t} + q_{d,t} = q_t = f(y_t, p_t, N)$ را به صورت زیر بنویسیم:

¹. *Ibid*, p. 732.

$$E_{j,t} = \theta_{d,j,t} f(y_t, p_t, N_t) + (\theta_{c,j,t} - \theta_{d,j,t}) q_{c,t} \quad (۷)$$

اگر معادله (۳) را به صورت برگشتی حل و در معادله ۷ جایگزین کنیم، برای اعمال سیاست محیط زیستی n سال قبل از t داریم:

$$E_{j,t} = \theta_{d,j,t} f(y_t, P_t, N_t) + \sum_{v=t-n}^t (1-\delta)^{t-v} (\theta_{c,j,v} - \theta_{d,j,v}) \times [s_v(\Delta q_v + S q_{v-1}) + r_v(q_{d,v-1})] \quad (۸)$$

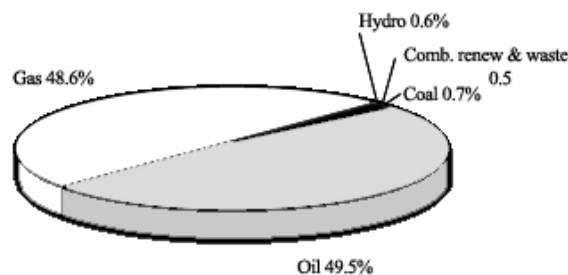
اگر این معادله را با معادله EKC مقایسه کنیم، ثابت بودن سیاست در معادله EKC و استفاده از درآمد به عنوان تنها متغیر توضیحی مهمترین انتقاد وارد بر EKC است. در مدل شبیه سازی پویا، درآمد هنوز یک عنصر مهم انتشار آلاینده ها به دلیل تأثیری که روی رشد تقاضا می گذارد، است. اما همانطور که عبارت دارای وقفه طولانی معادله بالا نشان می دهد، آنچه اهمیت بیشتری دارد واکنش بخشهای آلوده کننده به مداخله های سیاستی است. این عبارت (همانطور که نشان داده شده یا به صورت معادلات همزمان) به راحتی برای تجربیات سیاستی مورد استفاده قرار می گیرد. برای مثال اگر سیاست محیط زیستی وجود نداشته باشد، $(S_t, I_t = 0)$ آلودگی مستقیماً با تقاضا افزایش می یابد. اگر سیاست معرفی شود ولی فناوریهای پاک در دسترس نباشد، آنگاه S_t و I_t ممکن است در ابتدا کوچک باشند ولی با توسعه فناوری و کاهش هزینه، فناوریهای قدیمی را می توان کنار گذاشت و آلودگی در نهایت به سطح پایین مفروض این معادله $E_{j,t} = \theta_{c,j,t} f(y_t, p_t, N_t)$ می رسد. اگر هیچ سیاستی اعمال نشود ولی فناوریها در دسترس باشد (مانند موردی که آلاینده های زیادی در کشورهای در حال توسعه وجود دارد) جایگزینها نسبت به کشورهای توسعه یافته می تواند سریعتر اتفاق بیفتد. بالاخره، وجود متغیر قیمت در (۸) بدین معنی است که مسیر انتشار (غیرمستقیم) از ساختار هزینه صنعت و همچنین تحقیق و توسعه و اثرات آموزش بایادگیری متأثر می شود؛ لذا یک اثر بازخوردی ایجاد می شود. شبیه سازی سیاستی روی هزینه هم از طریق تغییرات آنی در هزینه فناوریهای آلوده کننده و پاک و هم از طریق انباشت موجودی سرمایه اثر

می‌گذارد. در مجموع، با در نظر گرفتن پیشرفت فنی در کاهش آلودگی و نقشی روشن برای سیاست محیط‌زیستی شبیه‌سازی پویا یک مبنای راضی‌کننده برای نشان دادن مسیر زمانی انتشار آلاینده‌ها است.

مدل کاربردی برای ایران

بررسی اجمالی مصرف انرژی در ایران

کشور ایران با جمعیتی بیش از هفتاد میلیون نفر و وسعتی بیش از ۱/۵ کیلومتر مربع پس از عربستان بزرگترین ذخائر نفت و پس از روسیه بیشترین میزان ذخائر گاز جهان را داراست. اولین چاه نفت در پنجم خرداد ماه ۱۲۸۷ شمسی در مسجد سلیمان به نفت رسید و تولید نفت در سال ۱۲۹۰ با تولید روزانه ۵۵۰ بشکه در روز آغاز شد. در طی ۹۰ سال گذشته ۹۷ درصد انرژی مورد نیاز کشور از مصرف مواد نفتی تأمین می‌شود. در طی دوره ۸۴-۱۳۵۵ مصرف گاز طبیعی در ایران سی و چهار برابر و مصرف فرآورده های انرژی سه برابر شده است که نشان‌دهنده جایگزین شدن گاز طبیعی با دیگر فرآورده‌های انرژی‌زا است. شکل (۲) سهم عرضه انرژی اولیه در سال ۲۰۰۴ را نشان می‌دهد.



شکل ۲. سهم عرضه انرژی اولیه

Source: <http://www.iea.org/statist/index.htm>

بررسی مدل شبیه‌سازی در ایران

مدل مورد بررسی را به سه صورت میتوان شبیه‌سازی کرد. نخست مدل را به شکل معادله‌های همزمان تخمین بزنیم و سپس شبیه‌سازی کنیم. دوم، شکل خلاصه شده (۸) را تخمین و بعد شبیه‌سازی کنیم و سوم با تبیین دقیق کلیه متغیرها، شبیه‌سازی معین انجام دهیم. به دلیل کمبود آمار و اطلاعات در بخش محیط‌زیست^۱ روش اول و دوم منجر به تورش تخمینها می‌شود؛ لذا معادله (۸) در دو حالت مختلف برای سه آلاینده (دی اکسیدکربن، اکسیدهای گوگرد و ذرات معلق) در چهار سناریو شبیه‌سازی می‌شود. شبیه‌سازی با استفاده از نرم‌افزار Eview5 و به صورت شبیه‌سازی معین انجام می‌پذیرد. در این روش مقادیر متغیرها و پارامترها در رابطه اصلی جایگزین می‌شود. برای شبیه‌سازی دو حالت مختلف در نظر گرفته می‌شود: الف) هیچ‌گونه سیاست محیط زیستی جهت کاهش انتشار آلاینده‌ها اتخاذ نشود ($S_t = T_t = 0$) ب) اعمال سیاست محیط زیستی (جانمایی گاز طبیعی با فرآورده‌های نفتی) از سال ۱۳۶۸.

تصریح تابع تقاضای انرژی و روش‌شناسی داده‌ها

تابع تقاضایی که در مدل شبیه‌سازی استفاده می‌شود به صورت زیر می‌باشد:

$$\frac{d_t}{d_a} = \left(\frac{ngdp}{ngdp_0} \right)^\alpha \left(\frac{npe}{npe_0} \right)^\beta e^{-yt} e^{@ trend} \quad (9)$$

این تابع را بصورت سرانه در نظر می‌گیریم تا از تعداد متغیرهای توضیحی و مشکلات مربوط به آن (هم‌خطی) کاسته شود. در این تابع dt و $ngdp$ به ترتیب متغیرهای تقاضای سرانه و درآمد سرانه هستند که به جای آنها مصرف سرانه انرژی و تولید ناخالص داخلی سرانه

^۱ آمار مربوط به آلاینده‌های زیست محیطی برای ده سال پیاپی موجود است.

بکار برده می‌شود.^۱ npe ، متوسط قیمت انرژی را نشان می‌دهد که برای سالهای ۸۴-۱۳۵۵ به صورت زیر محاسبه شده است:

قیمت نفت گاز × سهم آن + قیمت نفت سفید × سهم آن + قیمت گاز طبیعی^۲ × سهم آن در مصرف نهایی از انرژی) ۱/۷ = متوسط قیمت انرژی (قیمت برق × سهم آن + قیمت گاز مایع × سهم آن + قیمت بنزین × سهم آن + قیمت نفت کوره × سهم آن +

ngdp₀ و npe₀ به ترتیب تقاضای انرژی سرانه، تولید ناخالص داخلی سرانه و متوسط قیمت انرژی سرانه در زمان اولیه را نشان می‌دهند. نکته حائز اهمیت این است که قیمت به عنوان یک متغیر برونزا استفاده می‌شود.^۳ تمامی آمارهای مربوط به متغیرها از نظر مانایی بررسی شدند. نتایج آزمون «دیکی فولر تعمیم یافته»^۴ نشان می‌دهند که تفاضل مرتبه اول کلیه متغیرها از مقادیر بحرانی «مک‌کینون»^۵ بالاتر است.^۶

۱. آمار مربوط به متغیر مصرف سرانه انرژی و متغیر تولید ناخالص داخلی سرانه از ترازنامه انرژی برای سالهای ۸۴-۱۳۵۵ استخراج شده است.

۲. قیمت گاز طبیعی، بنزین (معمولی)، نفت سفید، نفت گاز، نفت کوره، گاز مایع از آمارنامه شرکت ملی پخش فرآورده‌های نفتی ایران، قیمت برق و سهم گاز طبیعی و فرآورده‌های نفتی و برق از ترازنامه انرژی استخراج شده است.

۳. پیندیک (Pyndic) در رابطه با محدودیتهای موجود بر سر راه مطالعه بر روی ساختار تقاضای انرژی در کشورهای کمتر توسعه یافته می‌گوید: «اغلب این کشورها آمار محدودی بویژه در مورد قیمت‌های خرده‌فروشی و عمده‌فروشی سوخت‌های مختلف وجود دارد. بنابراین تخمین مدل‌های اقتصادسنجی تصریح شده برای بیان نقش قیمت‌ها غیر ممکن است. مساله دوم آن است که مدل‌های تقاضا متکی بر این تصور که مصرف‌کنندگان خانگی و صنعتی با توجه به قیمت‌های بازار و حداقل ساختن هزینه یا حداکثر ساختن مطلوبیت تصمیم‌گیری می‌نمایند در مورد بسیاری از کشورهای در حال توسعه کاربرد ندارد. سومین مساله آن است که در بسیاری از کشورهای در حال توسعه ساختار اقتصادی می‌تواند به طریقی تغییر کند که ساختار تقاضای انرژی نیز به نوبه خود به سرعت تغییر نماید. این تغییرات می‌تواند پارامترهای تخمین زده شده در مدل‌های متکی بر ساختار ایستای تقاضای انرژی را تورش دار نماید.»

۴. GLS Dicky Fuller

۵. Mac Kinon

۶. نخست متغیرها در سطح مورد بررسی قرار گرفتند که چون مانا نبودند تفاضل مرتبه اول مورد بررسی قرار گرفت چون تفاضل مرتبه اول متغیرها مانا هستند مانایی پسماندها نیز مورد بررسی قرار گرفت و نتایج نشان داد که پسماند معادله تخمینی در سطح مانا است لذا رگرسیون جعلی نیست.

تخمین تابع تقاضای انرژی

معادله تقاضای انرژی به صورت لگاریتمی- لگاریتمی با استفاده از روش حداقل مربعات معمولی^۱ برای دوره زمانی ۸۴-۱۳۵۵ برآورد می‌شود. نتیجه برآورد به شکل زیر است.

$$\text{Log } d_t = -1/12 + 0/3 \log \text{ngdp} - 0/07 \log \text{npe} + 0/04 @\text{Trend} \quad (R^2=0/98) \quad (10)$$

$$(-2/24) \quad (5/22) \quad (-3/25) \quad (13/11)$$

$$DW=1/29, F=535/58$$

در این تابع d_t : مصرف سرانه انرژی، ngdp : تولید ناخالص داخلی سرانه، npe : متوسط قیمت سرانه انرژی و Trend متغیر روند^۲ است. عرض از مبدأ و ضرایب $\log \text{ngdp}$ و Lognpe به ترتیب نرخ بهبود کارایی انرژی، کشش در آمدی و کشش قیمتی انرژی هستند. مقادیر داخل پرانتز مقادیر عددی تابع آزمون کننده t را نشان می‌دهند که در تابع فوق معنادار هستند. ضریب تعیین مدل (R^2) نیز ۹۸ درصد است. آماره دوربین واتسون (DW) نیز نشان‌دهنده عدم خودهمبستگی بین اجزای اخلاص است. در اینجا کشش قیمتی منفی و کوچکتر از یک و کشش درآمدی نیز مثبت و کوچکتر از یک است. کشش قیمتی نیز از کشش در آمدی کوچکتر است.^۳

^۱ این روش بر اساس رویکرد انگل-گرنجر می‌باشد و متغیرها بر وزن تعیین می‌شوند. در این روش ابتدا ایستایی متغیرها و سپس جزء اخلاص بررسی می‌شود و بعد مدل برآورد می‌شود ولی در رویکرد همجمعی متغیرها درونزا بوده و برای برآورد، مراحل زیر طی می‌شود: (۱) بررسی مانایی متغیرها (۲) برآورد به روش VAR (۳) برآورد روابط بلندمدت و بررسی همگرایی آنها و در نهایت مدل به روش ECM (تصحیح خطای برداری) برآورد می‌شود؛ ولی چون در این روش نیاز به وقفه داریم و درجه آزادی از دست می‌دهیم با توجه به محدودیت داده و حفظ درجه آزادی از این روش صرف نظر شده است.

^۲ استفاده از متغیر روند به پایا کردن مدل و روند زدایی کمک می‌کند و بکار گرفتن این متغیر یا براساس تئوری است و یا از طریق نمودار متوجه می‌شویم متغیر تحت تأثیر زمان هست یا خیر. در مورد متغیر مصرف انرژی نمودار نشان می‌دهد این متغیر تحت تأثیر زمان است.

^۳ با توجه به اینکه مقدار دوربین واتسون در محدوده ۱/۶-۱/۱ قرار می‌گیرد شواهدی که بر مبنای آنها بتوان نسبت به وجود یا عدم وجود همبستگی سریالی مرتبه اول مثبت تصمیم‌گیری کرد، وجود نخواهد داشت. نتایج آزمونهای رمزی، نرمال بودن پس ماند، خود همبستگی سریالی LM و وایت همگی دال بر تصریح صحیح مدل و عدم نقض فروض کلاسیک است.

مدل شبیه‌سازی انتشار آلاینده‌ها: الف- بدون اعمال سیاست زیست محیطی

اگر سیاست زیست‌محیطی توسط دولت اعمال نشود ($S_t=I_t=0$)، رابطه (۶) به صورت زیر شبیه‌سازی می‌شود:

$$\frac{E_{j,t}}{E_{j,o}} = \left(\frac{\theta_{c,j,t}}{\theta_{d,j,o}} \right) \left[\left(\frac{ngdp}{ngdp_o} \right)^\alpha \left(\frac{npe}{npe_o} \right)^\beta e^{-\gamma t} e^{@trend} \right] \quad (11)$$

جدول ۱ ضرایب انتشار آلاینده‌ها را به تفکیک نشان می‌دهد.

جدول ۱. ضرایب انتشار آلاینده‌ها

آلاینده	θ_e	θ_D	$\theta_c \theta_d$	$\theta_e - \theta_D$
CO ₂	88.4	100	0.88	-12
SO _x	0.1	100	0.001	-99.9
SPM	5.6	100	0.056	-94.4

منبع: ترازنامه انرژی، وزارت نیرو، (۱۳۸۵).

همان گونه که در جدول (۱) نشان داده می‌شود مسیر انتشار سه آلاینده در چهار سناریو شبیه‌سازی می‌شود. نمودارهای (۱) تا (۳) شبیه‌سازی سه آلاینده را نشان می‌دهند. همانطور که در نمودارها مشاهده می‌شود با اعمال سیاست قیمتی (افزایش قیمت انرژی) می‌توان سرعت افزایش انتشار آلاینده‌ها را کاهش داد. چون افزایش متوسط قیمت انرژی با کاهش تقاضای انرژی موجب مصرف کمتر انرژی و در نتیجه کاهش انتشار آلاینده‌ها می‌شود، ولی با توجه به کم بودن کشش قیمتی اعمال این سیاست به تنهایی مانع افزایش انتشار

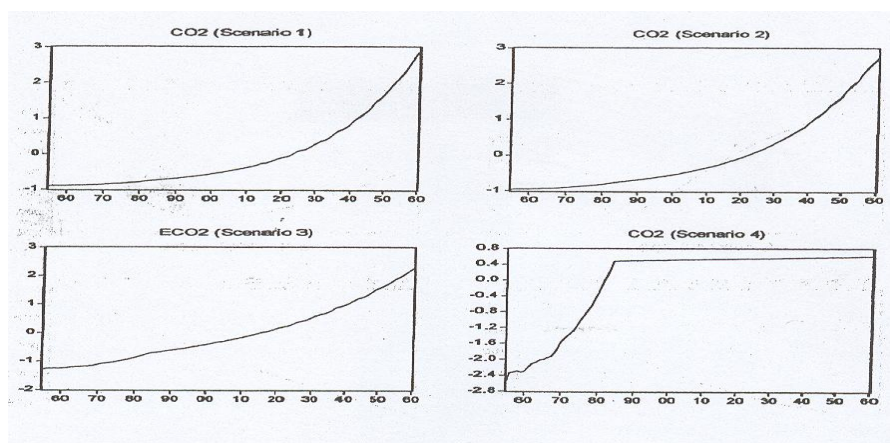
۱. ضریب انتشار روشهای آلوده‌کننده θ_D با ۱۰۰ شاخص‌بندی می‌شود.

آلاینده‌ها نمی‌شود. در سناریوی اول متوسط رشد قیمت انرژی همان روند افزایش قیمت در سالهای قبل در نظر گرفته می‌شود، ولی در سناریوهای بعدی سیاست قیمتی اعمال می‌شود. خصوصا در سناریوی چهارم که قیمت‌ها دو برابر می‌شوند سرعت انتشار آلاینده‌ها کند می‌شود. در کلیه نمودارها محور افقی سال و محور عمودی میزان انتشار آلاینده‌ها را نشان می‌دهد.

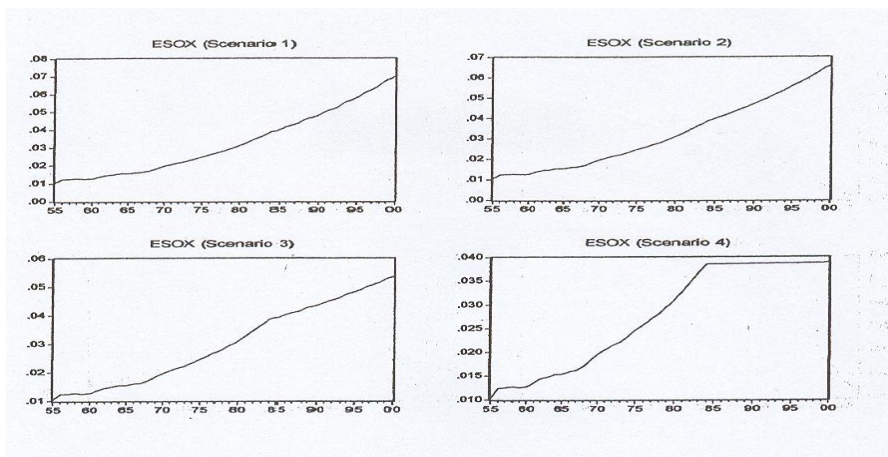
جدول ۲. سناریوهای مختلف

سناریو	متوسط رشد قیمت انرژی	متوسط رشد تولید ناخالص داخلی
سناریو اول	۱۸ درصد	۳ درصد*
سناریو دوم	۳۰ درصد	۳ درصد
سناریو سوم	۵۰ درصد	۳ درصد
سناریو چهارم	۱۰۰ درصد	۳ درصد

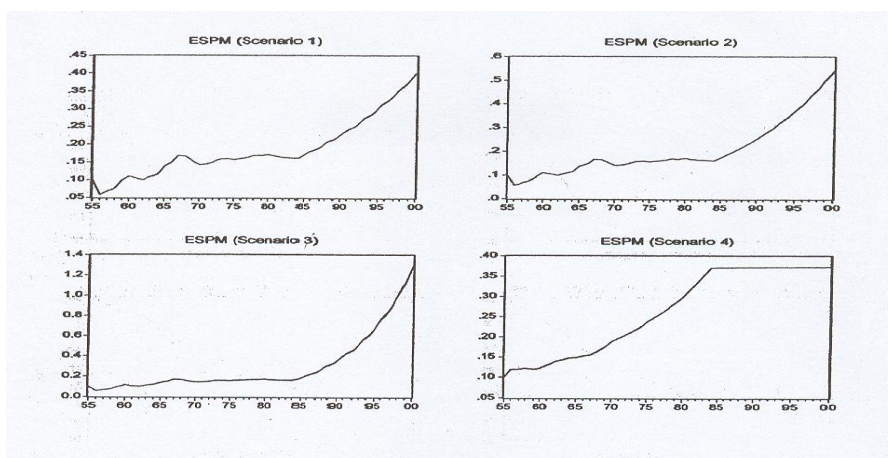
* اندرسون و کاوندیش در مقاله خود نرخ رشد gdp را برای کشورهای در حال توسعه ۰/۰۳ در نظر گرفته است.



نمودار ۱. دی اکسید کربن



نمودار ۲. اکسیدهای گوگرد



نمودار ۳. ذرات معلق

ب) اعمال سیاست محیط زیستی از سال ۱۳۶۸

باتوجه به اعمال سیاست جایگزینی گاز طبیعی با فرآورده‌های نفتی از سال ۱۳۶۸

معادله (۸) به صورت زیر شبیه‌سازی می‌شود:

(۱۲)

$$E_{j,t} = \theta_{d,j,t} f(y_t, P_t, N_t) + \sum_{v=t-n}^t (1-\delta)^{t-v} (\theta_{c,j,v} - \theta_{d,j,v}) \times [s_v(\Delta q_v + S q_{v-1}) + r_v(q_{d,v-1})], n=17$$

عرضه فرآورده‌های نفتی به عنوان ستاده آلوده‌کننده (Q d) و عرضه گاز طبیعی به عنوان ستاده پاک در نظر گرفته می‌شود.^۱ qt عرضه انرژی است. متغیر دیگر S_t است که سهم سرمایه‌گذاری در فناوری پاک را نشان می‌دهد. این متغیر بصورت یک تابع لاجیت در نظر گرفته می‌شود.^۲ همانگونه که در بخش قبل توضیح داده شد؛ متغیر I_t نرخ کنار گذاشتن فناوریهای آلوده‌کننده است.^۳ مقادیر اولیه انتشار آلاینده‌ها و متغیرهای برونزا در جدول چهار نشان داده می‌شود.

۱. آمار مربوط به عرضه گاز طبیعی و فرآورده‌های نفتی از آمارنامه شرکت ملی پخش فرآورده‌های نفتی استخراج شده است.
 ۲. با توجه به اینکه جایگزینی کامل آلاینده دی اکسید کربن ۹۰ سال و آلاینده های اکسید های گوگرد و ذرات معلق ۳۰ سال طول می‌کشد (Knapp, ۱۹۹۹). برای نشان دادن این موضوع که در طی این زمان سهم سرمایه‌گذاری در فناوریهای پاک از ۰/۱ به ۰/۹ می‌رسد نیاز داریم که از یک تابع لاجیت استفاده کنیم که به صورت زیر میباشد:

$$S_t = 1 / (1 + \exp \left\{ \left(2.2 + \frac{4.4T_2}{T_2 - T_1} - \frac{4.4t}{T_2} - T_1 \right) \right\})$$

T₁ و T₂ زمانهایی هستند که S_t به ترتیب ۰/۱ و ۰/۹ می‌رسد. با توجه به سه آلاینده مورد بررسی دو متغیر S_t به صورت جداگانه محاسبه می‌شود: (۱) از سال ۱۳۶۸ تا ۱۴۵۸ (۲) از سال ۱۳۶۸ تا ۱۳۹۸.

۳. برای آسانی فرض می‌شود فناوریهای آلوده‌کننده به تدریج و به صورت یک تابع فرسایشی نمایی (exponential decay) کنار گذاشته می‌شوند لذا این متغیر بدین صورت در نظر گرفته می‌شود:

$$rt = 1 / (1 + [(1-r0) / r0] * e^{-.02 t}) \quad r0 = .9 \quad t1368 = 1$$

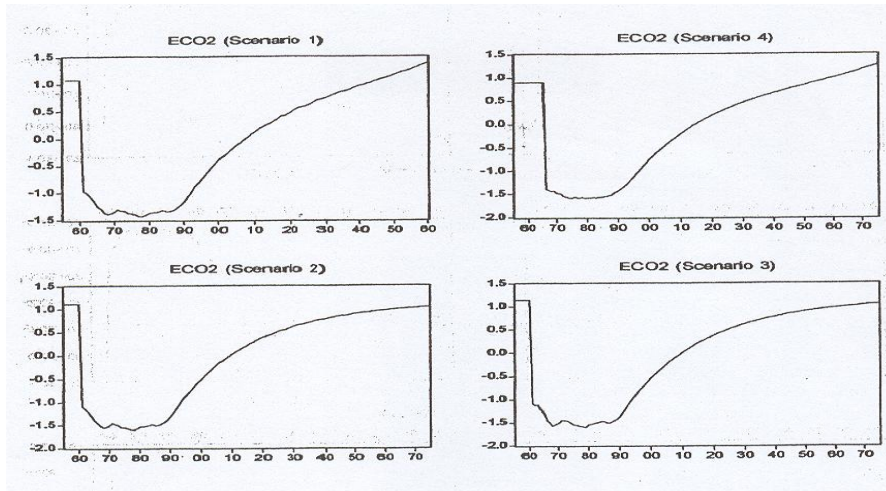
البته می‌توان طول عمر یک کارخانه را به صورت توزیعهای مختلف از جمله تابع توزیع نرمال در نظر گرفت.

جدول ۳. مقادیر اولیه متغیرها

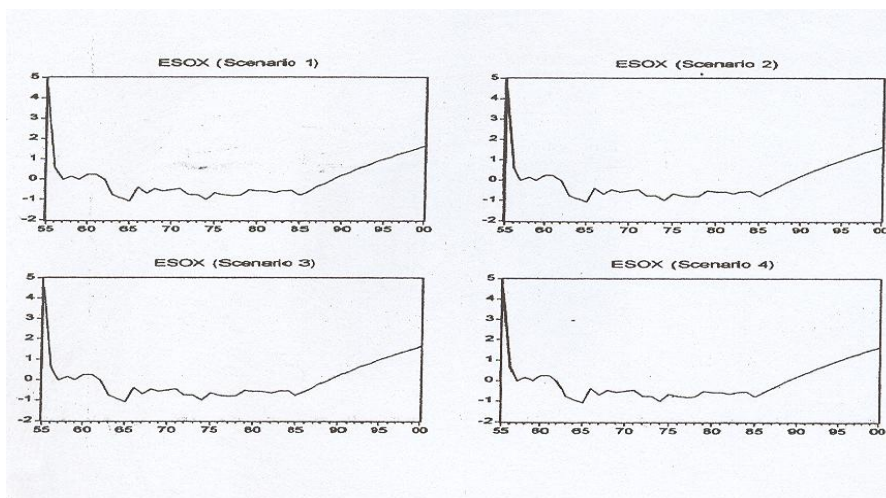
ذرات معلق	اکسیدهای گوگرد	دی اکسید کربن	کمیت
۲	۱۰/۴	۱۴۲۱	مقادیر اولیه انتشار اولیه
۷۱۸۸/۸۲۷	۷۱۸۸/۸۲۷	۷۱۸۸/۸۲۷	تولید ناخالص داخلی سرانه اولیه
۰/۹۷	۰/۹۷	۰/۹۷	متوسط قیمت انرژی سرانه اولیه
۳۰ سال	۳۰ سال	۹۰ سال	زمانی که طول می‌کشد S _t از ۰/۱ به ۰/۹ برسد
۰/۰۳	۰/۰۳	۰/۰۳	نرخ استهلاك
۱۳۶۸	۱۳۶۸	۱۳۶۸	سال شروع سیاست جایگزینی

منبع: تراز نامه انرژی (۱۳۸۵) و اندرسون و کاوندیش (۲۰۰۱).

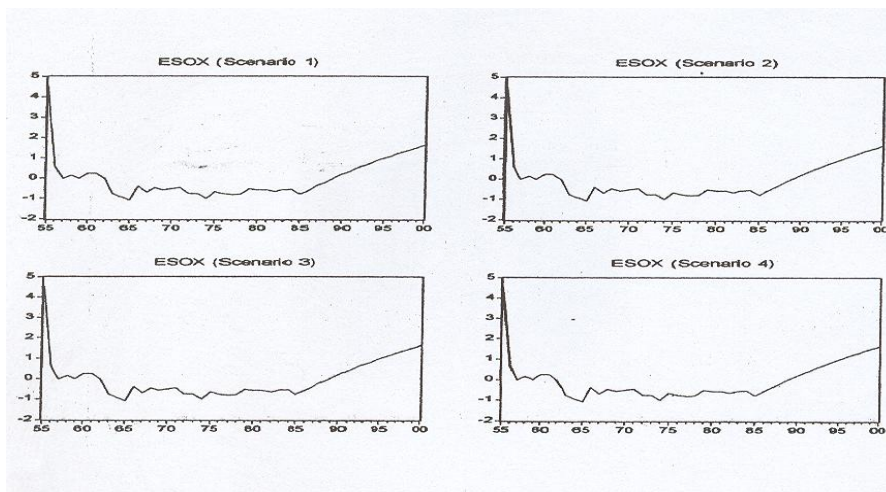
نمودارهای (۴) تا (۶) نشان می‌دهند اعمال سیاست جاننشینی گاز طبیعی از سال ۱۳۶۸ به تنهایی با روند افزایش قیمت ۱۸ درصد، تنها در این سال انتشار آلاینده دی اکسید کربن، اکسیدهای گوگرد و ذرات معلق را کاهش داده است و سپس روند نوسانی داشته و بعد افزایش می‌یابد. البته این افزایش در مقایسه با حالت اول که هیچ سیاست محیط زیستی اعمال نمی‌شود بسیار کمتر است. دلیل روند افزایشی انتشار آلاینده‌ها بخصوص در مورد آلاینده دی‌اکسید کربن می‌تواند این باشد که سهم گاز طبیعی در انتشار دی اکسید کربن ۴۷ درصد است، پس نمی‌توان انتظار داشت جایگزینی گاز طبیعی در کاهش انتشار این آلاینده نقش مهمی بازی کنند هرچند که سرعت افزایش انتشار را تا حد زیادی به تأخیر می‌اندازد. البته اعمال سیاست محیط زیستی به همراه سیاست قیمتی (سناریو ۲، ۳ و ۴) میزان انتشار آلاینده‌ها را نسبت به حالت قبل بیشتر کاهش می‌دهد.



نمودار ۴. دی اکسید کربن



نمودار ۵. اکسیدهای گوگرد



نمودار ۶. ذرات معلق

بررسی رابطه رشد اقتصادی و انتشار آلاینده‌ها

در مدل مورد بررسی درآمد هنوز عنصر مهمی در تعیین انتشار است. از طرفی عبارت دوم سمت راست مدل
$$\left[s_v(\Delta q_v + S q_{v-1}) + r_v(q_{d,v-1}) \right]$$
 نشانگر آن است که از طریق سیاست‌های محیط زیستی و استفاده از فناوریهای پاک می‌توان در دوره زمانی کوتاه‌تری انتشار آلاینده‌ها را کاهش داد.

نتیجه‌گیری

رابطه رشد اقتصادی و آلاینده‌های زیست محیطی ابتدا در چارچوب منحنی محیط‌زیستی کوزنتز بیان شد، ولی بدلیل ایستا بودن مدل و در نظر نگرفتن دو عامل مهم پیشرفت فنی و سیاست محیط‌زیستی مورد انتقاد قرار گرفت. لذا برای غلبه بر این محدودیتها یک چارچوب تحلیلی براساس یک مدل شبیه‌سازی پویا ارائه می‌شود. ویژگیهای مهم این مدل عبارتند از:

۱. معادلات تقاضا، اثرات تغییر درآمدی، قیمتی و جمعیتی را روی عرضه نشان می‌دهد؟

۲. طرف عرضه روابط برگشتی همزمان و مشارکت پیشرفت فنی در کاهش آلودگی را در نظر می‌گیرد و مسائل مربوط به توسعه و جایگزینی فناوریهای جدید به جای موجودی سرمایه آلاینده در طی عمر اقتصادی بلند مدت را نشان می‌دهد.
۳. در این مدل می‌توان نتایج مسیرهای سیاستی مختلف را ترسیم نمود.

مشاهده می‌شود که با سیاست قیمتی می‌توان سرعت افزایش انتشار آلاینده‌ها را کاهش داد ولی با توجه به کم بودن کشش قیمتی در مقایسه با کشش در آمدی و نیز خود کشش قیمتی (۰/۰۷) در صورتی که درصد افزایش قیمت و در آمد یک میزان باشد نه تنها اثر افزایش قیمت خنثی خواهد شد بلکه خالص اثر آن افزایش مصرف خواهد بود. تجربه کشورهای توسعه یافته صنعتی نشان می‌دهد که ابزارهای غیر قیمتی در صرفه جویی انرژی نقش اساسی ایفا نموده‌اند. لذا تدوین سیاستهای غیر قیمتی از جمله سرمایه گذاری در فناوریهای پاک و سیاستهای محیط زیستی می‌تواند زمینه لازم جهت صرفه جویی انرژی و محیط زیست پاک تر را فراهم آورد. در حالت دوم که سیاست محیط زیستی جانشینی گاز طبیعی در سال ۱۳۶۸ اعمال می‌شود، میزان آلاینده‌های زیست محیطی ناشی از احتراق انرژی کاهش می‌یابد؛ هرچند که افزایش انتشار را در سالهای بعدی شاهد هستیم؛ ولی اگر گاز طبیعی یا فرآورده‌های نفتی در این دوره جایگزین نمی‌شود، میزان آلاینده‌های زیست محیطی ناشی از احتراق انرژی (با فرض یکسان بودن حجم مصرف) به بیش از میزان برآورد شده می‌رسید. اما باید توجه داشت که سهولت دسترسی، پاکیزگی و عدم محدودیت مصرف گاز طبیعی از عواملی است که مصرف این حامل انرژی را بدون ملاحظات صرفه جویانه تشویق می‌نماید و این امر از منافع اقتصادی و محیط زیستی این جایگزینی، به میزان قابل ملاحظه‌ای کاسته است.

سه یافته مهم را در اینجا می‌توان نام برد. نخست نقش محوری پیشرفت فنی در کاهش آلودگی در طی دوره رشد اقتصادی. حتی سطوح بالای تولید و استفاده را همزمان با سطوح پایین آلودگی می‌توان داشت که این خود یک نتیجه کاربردی برای آلودگی داخلی و

منطقه‌ای است و برای کاهش سطح گازهای گلخانه‌ای نیز در بلندمدت می‌تواند بکار برده شود. دوم، اهمیت سیاستهای محیط زیستی است. می‌توان انتظار داشت ابزارهای استاندارد مالیات بر آلودگی، مقررات محیط زیستی و یا مجوزهای قابل مبادله موجب توسعه فناوری شود، گرچه پیشنهاد می‌شود فن‌آوری برای دستیابی به بهبود محیط‌زیست (صرفه‌های خارجی مثبت ابداع و نوآوری در این حالت زیاد است) بویژه برای توسعه فناوریهای غیرکربنی جهت مشکل تغییر آب و هوا مورد ارزیابی قرار گیرد. سوم وقفه بین شروع یک سیاست و اثرات آن طولانی است. لذا با گسترش جلوگیری و کنترل آلودگی کشور های در حال توسعه فرصت دارند که آلودگی ناشی از تولید و استفاده ناشی از انرژی را در مرحله زودتری از توسعه نسبت به کشورهای صنعتی کاهش دهند.

اگر درصد جلوگیری از بروز بحرانهای بعدی آلودگی باشیم، نیازمند مقابله جدی با مشکلات محیط زیستی خود خواهیم بود. با گسترش بیشتر نواحی گاز خیز می‌توانیم با استفاده از گاز طبیعی که سوختی پاک‌تر از نفت است، نیازهای انرژی خود را تأمین نماییم. کاهش اتکا به استفاده از نفت و دلارهای نفتی به تنهایی به کاهش آلودگی کمک نخواهد کرد، اما این مسئله به گسترش تنوع در اقتصاد ایران کمک می‌کند. در انرژی‌های تجدیدپذیر ویژگیهایی همچون سازگاری با طبیعت، عدم آلودگی محیط زیست، تجدید پذیری، پراکندگی و گستردگی منابع آنها در تمام جهان باعث شده تا این انرژی‌ها بویژه در کشورهای در حال توسعه از جاذبه بیشتری برخوردار گردند. در ایران نیز می‌توان به دنبال این انرژی‌های تجدید پذیر بود و به توسعه آنها همت گماشت. با افزایش تدریجی قیمت فرآورده‌های نفتی و سایر حاملهای انرژی ضمن ترغیب مردم به صرفه‌جویی انرژی از طریق جلوگیری از ضایعات و مصرف غیرمنطقی آن، سیاستهای غیرقیمتی طی یک برنامه مدون در کنار آن اجرا شوند. ضمن اینکه اجرای این سیاستها نیازمند سرمایه‌گذاری بخشهای دولتی و خصوصی است. یکی از روشهای دفاع از محیط‌زیست می‌تواند فراهم ساختن امکانات دسترسی آزاد به فناوریهایی پاک‌تر، عدم استفاده از سوختهای فسیلی، حذف روحیه انحصار طلبی در امر توسعه انرژی‌های تجدیدپذیر و مشارکت دادن کشورهای در حال توسعه در فرآیند های مربوطه باشد.

در تحقیقات بعدی می‌توان این مدل را در بخشهای دیگر از جمله آب و بهبود شبکه
فاضلاب و نیز برای آلاینده‌های دیگر هوا بکار برد.

پی‌نوشتها:

۱. دفتر برنامه‌ریزی انرژی، گروه عرضه، مدل عرضه بهینه انرژی، وزارت نیرو، معاونت امور انرژی، (۱۳۷۷).
۲. ترازنامه انرژی، دفتر برنامه‌ریزی انرژی، معاونت امور انرژی، وزارت نیرو، سالهای مختلف.
۳. امیرمعینی، مهران. «بازارهای صرفه‌جویی انرژی سیاستهای قیمتی یا غیرقیمتی». دومین همایش ملی انرژی ایران، (۱۳۷۶).
۴. تهیه مدل ریاضی عوامل مؤثر در تقاضای انرژی به تفکیک حاملهای انرژی، مؤسسه بین‌المللی انرژی، (۱۳۷۴).
۵. احدی، محمدرضا و همکاران. «ارزیابی اثرات توسعه بخش انرژی کشور بر انتشار آلاینده‌های هوا و گازهای گلخانه‌ای». *فصلنامه مطالعات اقتصاد انرژی*، سال سوم، شماره ۱۰، (۱۳۸۵)، ۲۷-۵.
۶. وصفی اسفستانی، شهرام و زنگویی‌نژاد، ابودر. «سیاستگذاری بین‌المللی برای مبارزه با بحرانهای زیست‌محیطی: با تأکید بر CDM». بررسیهای اقتصاد انرژی، سال سوم، شماره ۹، (۱۳۸۶)، ۹۳-۶۹.
۷. تبریزیان، بیتا. «برآورد تابع مصرف برق در ایران و مقایسه آن با کشورهای OECD». *پایان‌نامه کارشناسی ارشد*، دانشکده اقتصاد، دانشگاه تهران، (۱۳۷۶).
8. Anderson, Dennis and Cavendish, William. "Dynamic Simulation on Environmental Policy Analysis: Beyond Comparative Statics and the Environmental Kuznets Curve"., *Oxford Economic Papers*, 53, (2001): 721-746 .
9. Anderson, Dennis and Winne, Sara. "Energy System Change and External Effects in Climate Change"., Imperial college London., (2006).
10. Grossman, G. M. and Krueger, A. B. "Economic Growth and the Environment"., *Quarterly Journal of Economics*, Vol.110, (1995):353-78.
11. Holtz-Eakin, D. and Selden, T. "Stoking the Fires? CO2 Emissions and Economic Growth"., *Journal of Public Economics*, Vol.57, (1992): 85-101.
12. Kemp, R. Environmental Policy and Technical Change. Edward Elgar, Cheltenham, 1997.
13. Knapp, Karl, E. "Exploring Energy Technology Substitution For Reducing Atmospheric Carbon Emmissions"., *The Energy Journal*, Vol.20, (1999):121-43.
14. Selden, T. M. and Song, D. "Environmental Quality and Development: Is There a Kuznets Curve for Air Pollution Emissions?"., *Journal of Environmental Economics and Management*, Vol.27, (1994):147-62.
15. Shafic, N. "Economic Development and Environmental Quality: an Econometric Analysis"., *Oxford Economic Papers*, Vol.46, (1994):757-73.
16. Kuznets, S. "Economic Growth and Income Inequality"., *American Economy Review*, Vol.45, No.1, (1955):11-18.

17. Matthew, A. Cole. "Trade, the Pollution Haven Hypothesis and the Environmental Kuznets Curve: Examining the Linkages"., *Ecological Economics*, Vol.48, (2003):71-81.
18. Galeatti, M. & Lanza, A. "Desperately Seeking Environmental Kuznets"., *Environmental Modelling & Software*, Vol.20, (2005):1379-1388.