

فصلنامه مدل‌سازی اقتصاد سنجی (سال اول، شماره دوم «پیاپی ۲»، پاییز ۱۳۹۳، صفحات ۵۳-۸۰)

## شبیه‌سازی منحنی زیست محیطی کوزنتس در ایران با استفاده از الگوریتم ژنتیک و الگوریتم بهینه‌سازی انبوه ذرات

دکتر حسین صادقی

استادیار دانشکده مدیریت و اقتصاد دانشگاه تربیت مدرس

[sadeghih@modares.ac.ir](mailto:sadeghih@modares.ac.ir)

امید ستاری

دانشجوی دکتری اقتصاد دانشگاه تربیت مدرس

[omid.sattari@gmail.com](mailto:omid.sattari@gmail.com)

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۳/۰۹/۰۸

تاریخ دریافت: ۱۳۹۲/۰۷/۲۷

### چکیده

بر اساس فرضیه زیست محیطی کوزنتس رابطه بین درآمد سرانه و سرانه انتشار آلاینده‌ها به شکل U وارونه است. اکثر مطالعات در این مورد بر اساس برآورد مدل‌های رگرسیون کاملاً پارامتریک درجه دوم و درجه سوم به بررسی این فرضیه پرداخته‌اند. هدف این مقاله شبیه‌سازی رابطه بین انتشار سرانه دی اکسید کربن ( $CO_2$ ) و درآمد سرانه در ایران با استفاده از الگوریتم ژنتیک (GA) و الگوریتم بهینه‌سازی انبوه ذرات (PSO) است. سه فرم تبعی (خطی، درجه دوم و نمایی) در نظر گرفته شده است. با بررسی معیارهای دقت پیش‌بینی دقیق‌ترین مدل برای پیش‌بینی میزان سرانه انتشار  $CO_2$  تا سال ۲۰۲۵ انتخاب و پنج سناریو مورد نظر قرار گرفته است. عملکرد بهتر الگوریتم ژنتیک و انتخاب فرم نمایی بعنوان دقیق‌ترین فرم تبعی و رابطه مستقیم مصرف انرژی فسیلی و انتشار  $CO_2$  و رابطه غیرمستقیم درآمد سرانه و انتشار  $CO_2$  نتایج اولیه این پژوهش هستند.

طبقه‌بندی JEL: C63, Q52, Q53, Q54

کلیدواژه‌ها: منحنی زیست محیطی کوزنتس، شبیه‌سازی، پیش‌بینی، الگوریتم ژنتیک، الگوریتم بهینه‌سازی انبوه ذرات

## ۱. مقدمه

از زمانی که موضوع پدیده گرم شدن کره زمین<sup>۱</sup> و پیامدهای زیست محیطی آن جدی‌تر شده‌اند، پژوهش‌های زیادی توسط محققان علوم مختلف در این حوزه صورت گرفته است. هدف اصلی این پژوهشها حرکت به سوی درک و پیش‌بینی چگونگی تغییرات کیفیت محیط زیست در طول زمان بوده است (Kijima, Nishide, & Ohyama, 2010). اقتصاددانان نیز همگام با سایر دانشمندان مطالعات سازمان‌یافته‌ای را پیرامون اثرات متقابل محیط زیست و فعالیت‌های اقتصادی شکل داده‌اند. از نظر بسیاری از دانشمندان سطوح بالاتر از فعالیت اقتصادی (تولید یا مصرف) نیازمند انرژی و مواد اولیه‌ی بیشتری است و در نتیجه مقادیر بیشتری از مواد زائد فرعی ایجاد می‌شود. استخراج رو به افزایش منابع طبیعی، تجمع مواد زائد و تمرکز آلاینده‌ها<sup>۲</sup> از ظرفیت تحمل زیست کره<sup>۳</sup> بالاتر خواهد رفت و به تخریب محیط زیست منجر می‌شود (نصرالهی و غفاری گولک، ۱۳۸۸).

از طرف دیگر عده‌ای از محققان معتقدند سریع‌ترین راه برای بهبود کیفیت محیط زیست در امتداد مسیر رشد اقتصادی قرار دارد. در این دیدگاه رشد به عنوان پیش‌زمینه‌ای برای بهبود کیفیت محیط زیست تلقی می‌شود (پژویان و مرادحاصل، ۱۳۸۶). در همین زمینه فرضیه زیست محیطی کوزنتس<sup>۴</sup> بیان می‌کند که با افزایش درآمد سرانه، آثار منفی زیست محیطی ناشی از فعالیت اقتصادی در ابتدا افزایش و به حداکثر می‌رسد و پس از آن دوباره شروع به کاهش می‌کند که نشان‌دهنده‌ی منحنی به شکل U معکوس در فضای متغیرهای کیفیت محیط زیست و رشد اقتصادی است که منحنی زیست محیطی کوزنتس<sup>۵</sup> (EKC) نامیده می‌شود. این رابطه نام خود را از سایمون کوزنتس<sup>۶</sup> که رابطه‌ی ای به شکل U وارونه بین درآمد سرانه و نابرابری توزیع درآمد یافت، گرفته است. به درآمد سرانه‌ای که در آن، سطح آلودگی به حداکثر می‌رسد و پس از آن کاهش می‌یابد، نقطه عطف یا نقطه بازگشت<sup>۷</sup> گفته می‌شود. اگر این فرضیه درست باشد می‌توان پیش‌بینی کرد که کشورهای درحال توسعه، سطح آلودگی و

<sup>1</sup> Global Warming

<sup>2</sup> Pollutant

<sup>3</sup> Biosphere

<sup>4</sup> Environmental Kuznets Hypothesis

<sup>5</sup> Environmental Kuznets Curve

<sup>6</sup> Simon Kuznets

<sup>7</sup> Turning Point

تخریب محیط زیست را تا رسیدن به نقطه مذکور افزایش می‌دهند (صادقی و اندرگلی، ۱۳۹۰).

اکثر مطالعات با موضوع بررسی صحت این فرضیه بر اساس برآوردهای کاملاً پارامتریک، با فرمهای از پیش تعیین شده درجه دوم و درجه سوم بنا شده‌اند. این رهیافت از آنجا که ممکن است در تشخیص رابطه در شرایطی که فرمهای تعیین شده رخ نداده باشد ناتوان باشند، انعطاف پذیری لازم را ندارند (He & Richard, 2010).

در این پژوهش با بررسی انتقادات وارد شده به رهیافت‌های رایج بررسی فرضیه زیست-محیطی کوزنتس و با توجه به مزیت‌های استفاده از روش‌های غیرکلاسیک در شبیه‌سازی و پیش‌بینی، با رویکردی جدید اقدام به بررسی اثر رشد اقتصادی بر کیفیت زیست محیطی ایران شده است. بدین صورت که با استفاده از الگوریتم ژنتیک و PSO، شکلهای تبعی موردانتظار برای منحنی کوزنتس شبیه‌سازی شده است. سپس با استفاده از معیارهای مقایسه عملکرد مدل‌های رقیب، دقیق‌ترین فرم تبعی انتخاب و مبنای سناریوسازی و پیش‌بینی رابطه رشد اقتصادی و کیفیت محیط زیست تا سال ۲۰۲۵ قرار گرفته است. براین اساس در بخش دوم این مقاله به بررسی ادبیات و پیشینه تحقیقات خارجی و داخلی انجام گرفته در این زمینه پرداخته شده است. در بخش سوم مبنای نظری رابطه بین درآمد سرانه و کیفیت محیط زیست ارائه می‌شود. در بخش چهارم ضمن بررسی انتقادات وارد بر رهیافت‌های رایج بررسی صحت منحنی کوزنتس، روش شبیه‌سازی مورد استفاده در این پژوهش توضیح داده شده و پس از اجرا، نتایج و پیش‌بینی‌های به دست آمده ارائه می‌گردد و بر این اساس اقدام به نتیجه‌گیری خواهد شد.

## ۲. پیشینه تحقیق

با آغاز انقلاب صنعتی در اوایل قرن نوزدهم میلادی و رشد روزافزون تحولات بشری تغییرات گوناگونی در زندگی انسانها رخ داده است. افزایش جمعیت کره زمین که سبب تغییر کاربری زمین، تخریب جنگلها، افزایش فعالیت‌های کشاورزی و دامداری و تولید ضایعات جامد و مایع شده، تبعات گوناگونی برای کیفیت محیط زیست داشته است. مهمتر از آن نیاز بشر به انرژی و مصرف انواع سوخت‌های فسیلی نظیر زغالسنگ، نفت و

گاز طبیعی سبب افزایش شدید گازهای گلخانه‌ای<sup>۱</sup> (GHGs) شده است (صادقی و اندرگلی، ۱۳۹۰).

جو اطراف زمین نقش بسیار مهمی در جلوگیری از کاهش دمای آن ایفا می‌کند. به طوری که در صورت نبود اتمسفر متوسط درجه حرارت کره زمین به سطحی زیر دمای انجماد می‌رسد. برخی گازهای موجود در اتمسفر مثل دی اکسید کربن ( $\text{CO}_2$ ) و بخار آب ( $\text{H}_2\text{O}$ ) و کلروفلورو کربن‌ها (CFCs)، متان ( $\text{CH}_4$ ) و اکسید نیتروژن ( $\text{N}_2\text{O}$ ) همانند لایه‌ای در اطراف زمین عمل می‌کنند، به نحوی که از یک طرف حرارت ساطع شده از خورشید و از طرف دیگر حرارت بازتاب شده از طرف کره زمین (تشعشعات مادون قرمز) توسط اتمسفر جذب و به این ترتیب باعث افزایش درجه حرارت کره زمین و محافظت این کره از انجماد می‌گردند. اما متأسفانه فعالیت‌های تولیدی و اقتصادی بشر در سالهای اخیر، عامل مهمی در جهت افزایش بیش از حد انتشار گازهای گلخانه‌ای در جو زمین بوده است. گازهای موجود در جو زمین همانند یک محافظ شیشه‌ای عمل می‌کنند؛ بطوریکه در مقابل تشعشعات مادون قرمز ساطع شده از طرف زمین همانند یک جسم کدر عمل کرده و می‌توانند تا مدت زیادی حرارت را در خود نگه دارند، و در مقابل نور خورشید همانند جسم شفاف عمل می‌کنند (صالح و همکاران، ۱۳۸۸). برآیند این دو پدیده که موجب حفظ تشعشعات خورشیدی در سطح زمین و در نتیجه گرم شدن کره زمین است، به اثر گلخانه‌ای<sup>۲</sup> مشهور شده است. گرم شدن کره زمین آثار و پیامدهای گوناگونی خواهد داشت. موج گرما، دوره گرمای غیرمعمول در مناطق مختلف، تغییر زمانی فصل‌ها، بارش باران و برف سنگین، سیلاب‌ها و طوفان‌های غیرمنتظره و در کنار این موارد، خشکسالی و آتش‌سوزی‌های کم سابقه بخشی از این پیامدها هستند. همچنین ذوب شدن یخ‌ها و گرم شدن اقیانوس‌ها و به همراه آن انبساط آب دریاها به سبب گرمای بیش از حد، باعث بالا آمدن سطح دریاها شده و پیش‌بینی می‌شود در قرن آینده تا حدود یک متر از سواحل سرتاسر جهان را زیر آب ببرد. تبخیر سریع آب‌های شیرین و کاهش منابع قابل شرب نیز برای انسان‌ها مشکلی اساسی خواهد بود. گونه‌های مختلف جانوری منطقه‌ی زیست خود را تغییر می‌دهند، زمان رویش گیاهان عوض می‌شود و کوچ پرندگان و دیگر جانوران از مناطق سردسیر به گرمسیر دچار اختلال و بی‌نظمی می‌گردد. بررسی‌های اقتصاددانان در این زمینه نشان می‌دهد که چنانچه هیچ

<sup>۱</sup> Green House Gases

<sup>۲</sup> Green House Effect

عملی در زمینه کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای صورت نگیرد، هزینه‌ها و ریسک کلی حاصل از تغییرات آب و هوا معادل حداقل کاهش ۵ درصد از تولید ناخالص جهان در هر سال خواهد بود (Stern, 2007).

تقریباً ۶۰٪ از آثار گازهای گلخانه‌ای ناشی از فعالیت‌های بشر در زمینه انتشار گاز دی‌اکسید کربن است. CO<sub>2</sub> را مهمترین گاز گلخانه‌ای می‌دانند زیرا از چرخه ماندگاری طولانی‌تری برخوردار است (بین ۵۰ تا ۲۰۰ سال). از سال ۱۹۹۰ تا ۲۰۰۷ ایران بعد از چین بیشترین میزان رشد انتشار دی‌اکسید کربن را با رشد ۱۶۵/۸ درصدی در این دوره داشته است (صادقی و اندرگلی، ۱۳۹۰).

فعالیت‌های آلاینده محیط زیست و افزایش انتشار گازهای گلخانه‌ای توسط انسانها عمدتاً در اختیار هدف دستیابی به رشد اقتصادی بالاتر بوده است. اما سوال اساسی این است که آیا رشد اقتصادی نیز بر کیفیت محیط زیست اثرگذار است؟ عده‌ای بر اصل تعادل تاکید دارند که بیان می‌کند مواد اولیه و انرژی متناسب با فعالیت‌های اقتصادی مصرف می‌شوند و لذا رشد اقتصادی بطور اجتناب‌ناپذیری باعث ظهور آسیب‌های زیست محیطی خواهد شد (صالح و همکاران، ۱۳۸۷). نظریه مخالف این است که رشد اقتصادی می‌تواند به بهبود کیفیت محیط زیست کمک کند.

مقاله گروسمن و کروگر<sup>۱</sup> (۱۹۹۵) راجع به اثرات زیست‌محیطی پیمان تجارت آزاد آمریکای شمالی (NAFTA)<sup>۲</sup> و پیش از آن انتشار گزارش سال ۱۹۹۲ توسعه جهان<sup>۳</sup> بر اساس پژوهش شافیک و باندیوپادهای<sup>۴</sup> (۱۹۹۲) و پژوهش پانایوتو<sup>۵</sup> (۱۹۹۳) با معرفی رابطه رشد اقتصادی و محیط زیست در قالب منحنی زیست محیطی کوزنتس، با توجه به مشاهدات خود رابطه به شکل U وارونه بین سطح درآمد سرانه و برخی شاخص‌های آلودگی مثل فاضلاب‌ها، انتشار سولفور و مونو اکسید کربن و ذرات معلق را با عنوان فرضیه زیست محیطی کوزنتس معرفی نمودند. بر اساس این فرضیه رابطه‌ی رشد اقتصادی و کیفیت محیط زیست، چه مثبت و چه منفی در طول مسیر توسعه‌ی یک کشور ثابت نیست. در حقیقت هنگامی که کشور به حدی از درآمد می‌رسد که تقاضای مردم برای یک محیط زیست پاکیزه‌تر و تلاش آنان برای زیرساخت‌های کارا تر بیشتر می‌شود، علامت این رابطه از مثبت به منفی تغییر می‌یابد. منحنی زیست محیطی

1 Grossman & Krueger

2 North American Free Trade Agreement

3 World Development Report

4 Shafik & Bandyopadhyay

5 Panayotou

کوزنتس به دنبال تشریح یک فرایند پویای تغییر است. به این معنی که در سطوح پایین توسعه یافتگی هم کیفیت و هم شدت تخریب زیست‌محیطی به اثرات فعالیت اقتصادی مداوم بر منابع طبیعی و هم چنین به مقادیر ضایعات تجزیه پذیر محدود می‌شود. اما در دوره جهش صنعتی، با شدت گرفتن استخراج منابع طبیعی و کشاورزی، تهی‌سازی منابع طبیعی و هم چنین تولید ضایعات سرعت می‌یابد. در سطوح بالاتر توسعه، تغییرات ساختاری به سمت صنایع و خدمات وابسته به اطلاعات، تکنولوژی‌های برتر رفته و تقاضای فزاینده برای کیفیت محیط زیست، به کاهش در تخریب محیط زیست می‌انجامد (نصرالهی و غفاری گولک، ۱۳۸۸).

از لحاظ نظری، سه سازوکار اثرگذاری رشد اقتصادی بر کیفیت زیست محیطی قابل شناسایی است که به ترتیب عبارتند از افزایش مقیاس تولید، رشد فنی و تغییرات ساختاری. در سازوکار افزایش مقیاس تولید، سطوح بالاتر تولید ناخالص داخلی به معنای نیاز هرچه بیشتر به نهاده‌ها و در نتیجه منابع طبیعی برای افزایش تولید است. سازوکار رشد فنی به معنای بهبود تکنولوژی و استفاده کارتر از نهاده‌ها، جایگزینی نهاده‌ها، یا فرایند‌های کمتر آلاینده، حرکت به سوی تولید محصولات بوم‌گرا، تولید کمتر ضایعات، و یا تبدیل آنها به اشکال کمتر آلاینده است. آخرین سازوکار با تغییر ساختار اقتصادی عمل می‌کند. در نخستین گام‌های توسعه اقتصادی، تولید از بخش کشاورزی به بخش صنعتی انتقال می‌یابد که نتیجه تبعی آن افزایش آلودگی و کاهش کیفیت محیط زیست است. اما با تداوم فرایند صنعتی شدن، بهبود نهاده‌های عمومی و تغییر نیازهای مصرف‌کنندگان، تولید در گذر زمان از صنایع انرژی بر به صنایع دانش محور و بخش خدمات انتقال می‌یابد که این تغییر ساختار، نرخ افزایش آلاینده‌ها را کاهش می‌دهد. بخش صعودی منحنی زیست محیطی کوزنتس به معنای غلبه سازوکار افزایش مقیاس تولید بر دو سازوکار رشد فنی و تغییرات ساختاری است که در نهایت منجر به افزایش آلاینده‌های زیست محیطی می‌شود. اما در بخش دوم و نزولی منحنی، دو سازوکار کاهش دهنده، قدرتی بیشتر از سازوکار نخست می‌یابند که به کاهش آلودگی زیست محیطی کشورها می‌انجامد (میرشجاعیان حسینی و رهبر، ۱۳۹۰).

منحنی زیست محیطی کوزنتس رابطه غیرخطی (درجه دوم) بین کیفیت محیط زیست و رشد اقتصادی (درآمد سرانه) را بیان می‌دارد و بطور عام این منحنی به دنبال بررسی وجود یا عدم وجود نقطه بازگشت است (وائقی و اسماعیلی، ۱۳۸۸). نقطه‌ای که نشان دهنده میزان درآمد سرانه‌ای خواهد بود که با فراتر رفتن درآمد سرانه از آن نقطه،

آلودگی زیست محیطی کاهش می‌یابد. بایستی توجه داشت که همه آلاینده‌ها از این قاعده تجربی تبعیت نمی‌کنند. به عنوان مثال در مطالعه مربوط به بررسی روند انتشار سالیانه شش نوع آلودگی اتمسفری در اسپانیا که توسط روکا و همکاران<sup>۱</sup> (۲۰۰۱) صورت گرفت، تنها آلودگی از نوع  $SO_2$  به صورت تدریجی با فروض EKC سازگار شد. برخی از آلاینده‌ها هم که به نظر می‌رسد این قاعده را دنبال می‌کنند، ممکن است در سطوح بالای درآمد سرانه مجدداً میل به افزایش آلودگی را نشان دهند که در این صورت EKC به شکل U وارونه نبوده و N شکل خواهد بود که نشان می‌دهد که هرگونه ارتباطی موقتی است. بعنوان مثال می‌توان به مطالعات سنگوپتا<sup>۲</sup> (۱۹۹۶) و مارتینز و بنگوچئا<sup>۳</sup> (۲۰۰۴) اشاره کرد.

برخی از نظریه پردازان اعتقاد دارند که از دیدگاه نظری رابطه U وارونه برای انتشار  $CO_2$  کمتر محتمل است. زیرا انتشار این آلاینده مسائلی در سطح جهانی ایجاد می‌کند برای مثال هزینه گرم شدن کره زمین بین کشورها و نسل‌های مختلف تقسیم می‌شود. بنابراین انگیزه سواری مجانی<sup>۴</sup> بسیار قدرتمندتر است و رابطه مثبت بین درآمد سرانه و انتشار  $CO_2$  حتی در سطوح درآمد بسیار بالا ماندگار است (Arrow). در مقابل مدل‌های تئوریک در دفاع از فراز و فرود EKC نیز وجود دارد که در بخش مبانی نظری، رهیافت آندرونی و لوینسون<sup>۵</sup> (۲۰۰۱) در این زمینه ارائه شده است.

بر این اساس نتایج مطالعات تجربی نیز بر نتیجه خاصی توافق ندارند. در پژوهش سانک، ژنگ و تانگ<sup>۶</sup> (۲۰۰۸) فرضیه زیست محیطی کوزنتس راجع به گازهای آلاینده، فاضلاب و زائدات جامد بعنوان شاخص‌های کاهش کیفیت محیط زیست بررسی شده و رابطه U وارونه برای هر سه آنها مورد تایید قرار گرفت. همچنین مطالعات صبوری، سلیمان و مهل<sup>۷</sup> (۲۰۱۲)، فدها و زقدود<sup>۸</sup> (۲۰۱۰)، احمد و لانگ<sup>۹</sup> (۲۰۱۲)، بئک و کیم<sup>۱۰</sup> (۲۰۱۲) و تاسکین و زعیم<sup>۱۱</sup> (۲۰۰۰) و گالتوتی، لانزا و پائولی<sup>۱</sup> (۲۰۰۶) فرضیه زیست محیطی

<sup>۱</sup> Roca et al.

<sup>۲</sup> Sengupta

<sup>۳</sup> Martinez & Bengochea

<sup>۴</sup> Free Riding

<sup>۵</sup> Andreoni & Levinson

<sup>۶</sup> Song, Zheng & Tong, L.

<sup>۷</sup> Saboori, Sulaiman & Mohd

<sup>۸</sup> Fodha & Zaghoud

<sup>۹</sup> Ahmed & Long

<sup>۱۰</sup> Baek & Kim

<sup>۱۱</sup> Taskin & Zaim

کوزنتس در ارتباط با انتشار CO<sub>2</sub> به ترتیب در کشورهای مالزی، تونس، پاکستان، کره جنوبی، در مجموعه ۵۶ کشور، کشورهای عضو سازمان همکاری و توسعه اقتصادی (OECD) تایید شد. اما در مطالعات دو، وی و کای<sup>۱</sup> (۲۰۱۲)، وانگ<sup>۲</sup> (۲۰۱۲)، استیو و تماریت<sup>۴</sup> (۲۰۱۲)، اکبستانسی، آسیک و تنک<sup>۵</sup> (۲۰۱۲) و آزماهو، لاسنی و وان<sup>۶</sup> (۲۰۰۶) و فوکاچی<sup>۷</sup> (۲۰۰۵) به ترتیب در چین، مجموعه ۹۸ کشور، اسپانیا، مجموعه ۱۰۰ کشور و در هند و چین و برزیل تایید نشده است.

در بین مطالعات داخلی نیز در پژوهشهای صادقی و اندرگلی (۱۳۹۰)، واثقی و اسماعیلی (۱۳۸۸)، پورکاظمی و ابراهیمی (۱۳۸۷)، پژویان و مراد حاصل (۱۳۸۶) به ترتیب در کشورهای عضو پیمان کیوتو، ایران، کشورهای خاورمیانه، در مجموعه ۶۷ کشور جهان فرضیه EKC تایید شده است. در مطالعه میرشجاعیان و رهبر (۱۳۹۰) با بررسی کشورهای آسیایی فرضیه کوزنتس در مورد CO<sub>2</sub> تایید و در مورد ذرات معلق رابطه با درآمد سرانه، یکنواخت و افزایشی به دست آمده است. نتایج پژوهش آماده و همکاران (۱۳۸۶) حاکی از وجود یک الگوی EKC ناقص در ایران است. همچنین مقدسی و ضیایی (۱۳۹۰) با بررسی پنج گروه کشور که با توجه به سطح درآمد طبقه بندی شده بودند به این نتیجه رسیدند که هر پنج گروه کشور بر روی شاخه صعودی EKC قرار دارند. نصرالهی و غفاری گولک (۱۳۸۸) برای کشورهای آسیای جنوب غربی یک رابطه افزایشی خطی و برای کشورهای عضو پیمان کیوتو یک رابطه N شکل به دست آورده‌اند و غزالی و زیبایی (۱۳۸۸) با بررسی داده‌های استانی برای ایران به رابطه N شکل دست یافته‌اند. نتایج مطالعه صالح و همکاران (۱۳۸۸) نشان می‌دهد که نرخ رشد حجم گاز دی اکسید کربن بیشتر از نرخ رشد تولید ناخالص داخلی است، لذا منحنی زیست محیطی کوزنتس در شرایط ایران فرم مورد انتظار مطرح شده در تحلیلهای نظری را ندارد.

<sup>1</sup> Galeotti, Lanza & Pauli

<sup>2</sup> Du, Wei & Cai

<sup>3</sup> Wang

<sup>4</sup> Esteve & Tamarit

<sup>5</sup> Akbostancı, Aşık & Tunç

<sup>6</sup> Azomahou, Laisney & Van

<sup>7</sup> Focacci



### ۳. مبانی نظری

برای تبیین رابطه  $U$  وارونه بین میزان آلودگی و درآمد سرانه اندرونی و لوینسون (۲۰۰۱)، مدلی بر مبنای یک اقتصاد یک نفره<sup>۱</sup> و بنابراین بدون در نظر گرفتن اثرات جانبی<sup>۲</sup> - که تضمین می‌کند راه حل مدل، کارای پرتو<sup>۳</sup> باشد - معرفی نمودند که در این پژوهش مورد استفاده قرار می‌گیرد. بدیهی است که بایستی در نهایت تحلیل را به یک اقتصاد با تعدادی مصرف کننده تعمیم داد و اقدام به نتیجه گیری نمود. یک عامل اقتصادی وجود دارد که مطلوبیت وی تابعی از میزان مصرف از کالای خصوصی<sup>۴</sup>  $C$  و همچنین تابعی از کالای بد به نام آلودگی<sup>۵</sup>  $P$  می‌باشد:

$$\begin{aligned} U &= U(C, P) \\ U_C &> 0, U_P < 0 \end{aligned} \quad (1)$$

تابع مصرف نسبت به  $C$  و  $P$ ، شبه مقعر<sup>۶</sup> است. با فرض اینکه آلودگی از فرآیند تولید ناشی می‌شود و مصرف کننده منبعی مانند  $E$  در اختیار دارد که با صرف مخارج روی آن می‌تواند آلودگی را کاهش دهد یا از ایجاد آن جلوگیری کند (در واقع  $E$  وجوهی است که مصرف کننده در جهت حفظ محیط زیست می‌پردازد)، لذا تابع انتشار آلودگی به صورت زیر خواهد بود:

$$\begin{aligned} P &= P(C, E) \\ P_C &> 0, P_E < 0 \end{aligned} \quad (2)$$

نهایتاً فرض می‌شود که مصرف کننده بودجه محدودی مثل  $M$  در اختیار دارد که صرف مصرف یا مخارج کاهش آلودگی می‌شود. با فرض اینکه قیمت نسبی مصرف و کاستن از آلودگی نرمال و با یک برابر شود، قید مسئله به صورت  $C+E=M$  خواهد بود. حال با در نظر گرفتن شکل صریحی از تابع مطلوبیت و تابع آلودگی خواهیم داشت:

$$U = C - zP \quad (3)$$

$$P = C - C^\alpha E^\beta \quad (4)$$

<sup>1</sup> one-person model

<sup>2</sup> Externality

<sup>3</sup> Pareto efficient

<sup>4</sup> Consumption of one Private Good

<sup>5</sup> Pollution

<sup>6</sup> QuasiConcave

تابع مطلوبیت (۳) نسبت به  $P$  و  $C$  خطی و جمع پذیر است و عامل  $z > 0$  مطلوبیت نهائی منفی<sup>۱</sup> عامل آلودگی را نشان می‌دهد که مقداری ثابت در نظر گرفته شده است. تابع آلودگی هم شامل دوجزاست. جز اول آلودگی ناخالص است (آلودگی پیش از اعمال فرآیند کاهش) که متناسب و به صورت یک به یک با مصرف تغییر می‌کند. جز دوم که تلاش در جهت کاستن از آلودگی<sup>۲</sup> را منعکس می‌کند و در واقع آلودگی را بایک تابع مقعر استاندارد کاهش می‌دهد.

ابتدا فرض می‌شود که  $Z=1$  باشد. باقراردادن معادله (۴) در معادله (۳) و با توجه به قید بودجه مسئله، با حداکثرکردن مطلوبیت مصرف‌کننده، مقادیر بهینه مصرف و مخارج برای کاهش آلودگی به شکل زیر به دست می‌آید:

$$\begin{aligned} C^* &= \frac{\alpha}{\alpha + \beta} M \\ E^* &= \frac{\beta}{\alpha + \beta} M \end{aligned} \quad (۵)$$

اکنون می‌توان معادله میزان آلودگی بهینه با توجه به بودجه یا منحنی زیست محیطی کوزنتس را با قراردادن معادلات (۵) در (۴) به دست آورد:

$$P^*_{(M)} = \frac{\alpha}{\alpha + \beta} M - \left(\frac{\alpha}{\alpha + \beta}\right)^\alpha \left(\frac{\beta}{\alpha + \beta}\right)^\beta M^{\alpha + \beta} \quad (۶)$$

شیب منحنی زیست محیطی کوزنتس عبارتست از:

$$\frac{\partial P^*}{\partial M} = \frac{\alpha}{\alpha + \beta} - (\alpha + \beta) \left(\frac{\alpha}{\alpha + \beta}\right)^\alpha \left(\frac{\beta}{\alpha + \beta}\right)^\beta M^{\alpha + \beta - 1} \quad (۷)$$

علامت شیب به  $\alpha$  و  $\beta$  بستگی دارد. اگر  $\alpha + \beta = 1$  باشد به این معنی است که تلاش صرف شده برای کاهش آلودگی بازدهی ثابت نسبت به مقیاس دارد و در این شرایط شیب مقداری است ثابت و رابطه انتشار آلودگی و درآمد با فرض  $\beta \leq 1$  و  $\alpha \geq 0$  رابطه ای است خطی و صعودی. با فرض  $\alpha + \beta \neq 1$  مشتق دوم به صورت زیر خواهد بود:

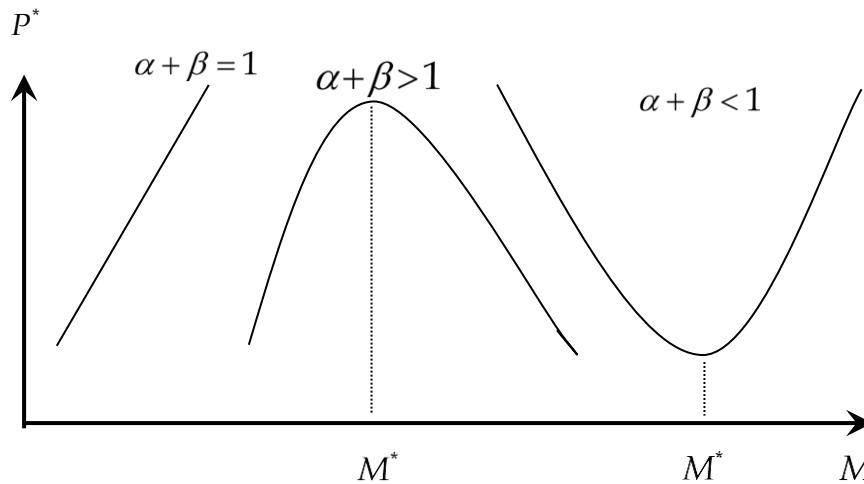
$$\frac{\partial^2 P^*}{\partial M^2} = -(\alpha + \beta - 1)(\alpha + \beta) \left(\frac{\alpha}{\alpha + \beta}\right)^\alpha \left(\frac{\beta}{\alpha + \beta}\right)^\beta M^{\alpha + \beta - 2} \quad (۸)$$

<sup>۱</sup> Disutility

<sup>۲</sup> Abatement

بر اساس رابطه ۸ مسیر بهینه رابطه آلودگی - درآمد در حالات مختلف بصورت های زیر خواهد بود:

شکل ۱: مسیر زمانی بهینه آلودگی - درآمد



می‌توان نشان داد که حتی زمانی که  $z \neq 1$  باشد نیز منحنی درآمد-آلودگی بهینه  $U$  شکل باقی خواهد ماند، اگر و تنها اگر تکنولوژی کاهش آلودگی بازده صعودی نسبت به مقیاس داشته باشد؛ یعنی  $\alpha + \beta > 1$  باشد. در این حالت داریم:

$$C^* = \frac{\alpha}{\alpha + \beta} M + \frac{1 - z}{z(\alpha + \beta)C^{\alpha-1}(M - C)^{\beta-1}} = \frac{\alpha}{\alpha + \beta} M + \gamma \frac{1 - z}{z} \quad (9)$$

در این رابطه  $\gamma > 0$  است. اگر  $z < 1$  باشد، مطلوبیت نهایی منفی حاصل از پدیده آلودگی برای فرد مفروض کمتر است و در نتیجه  $C^*$  در معادله (۹) از  $C^*$  در معادله (۵) بیشتر است. لذا آلودگی در معادله (۹) در هر سطح درآمد بیشتر است و اگر  $z > 1$  باشد عکس این نتایج برقرار است. در واقع تغییر مقدار  $z$  تنها سبب انتقال منحنی می‌شود. با در نظر گرفتن اقتصاد با یک مصرف‌کننده اثرات جانبی حذف شد، اما در گام آخر می‌توان نشان داد که با در نظر گرفتن اثرات جانبی از طریق افزایش مصرف‌کنندگان هم مانعی بر شکل‌گیری منحنی زیست محیطی کوزنتس نیست. اگر جمعیت معادل  $N$  در نظر گرفته شود مدل به صورت زیر خواهد بود:

$$\begin{aligned}
 U_i &= C_i - P \\
 P &= C - C^\alpha E^\beta \\
 C &= \sum_i^N C_i, E = \sum_i^N E_i, \alpha, \beta \in (0,1)
 \end{aligned} \tag{10}$$

$$M_i = C_i + E_i$$

$N$  مصرف کننده مطلوبیت خود را به عنوان بازیگران ناش<sup>۱</sup> حداکثر می کنند. به عبارت دیگر فرض می کنند مطلوبیت دیگران از مطلوبیت خودشان مستقل است. از حل شرایط مرتبه اول داریم:

$$C_i^* = \frac{\alpha}{\alpha + \beta} M_i + \left[ \frac{\alpha}{\alpha + \beta} \sum_{j \neq i} M_j - \sum_{j \neq i} C_j \right] \tag{11}$$

اگر همه افراد به همین صورت عمل کنند تعادل ناش برای همه آنها (افراد جامعه) برابر خواهد بود با:

$$C_i^* = \frac{\alpha}{\alpha + \beta} M_i \tag{12}$$

در این مورد که تصمیم‌گیری تحت شرایط عدم تمرکز<sup>۲</sup> است، آلودگی همان مسیری راطی می کند که در معادله (۶) مربوط به مثال یک مصرف کننده طی می کرد. در واقع مسیر آلودگی - درآمد مقعر و دارای اوج<sup>۳</sup> است اگر و تنها اگر  $\alpha + \beta > 1$  باشد. البته لازم به یادآوری است که در مثال وجود  $N$  مصرف کننده مسئله بافرض عدم تمرکز است و از دیدگاه پرتو بهینه نیست. برای درک بهتر فرض کنید برنامه ریز مرکزی مجموع مطلوبیت ها را حداکثر می کند:

$$\text{MAX} : \sum_i U_i = \sum_i C_i - NP \tag{13}$$

با توجه به اینکه این تابع برابر با تابع شماره (۳) است، بنابراین تمام راه حل ها یکسان خواهد بود که منجر به مصرف بهینه به دست آمده از معادله (۹) می شود. با جایگزین کردن  $z$  با  $N > 1$  مشاهده می شود که در راه حل غیرمتمرکز معادله (۹)، افراد بسیار مصرف می کنند و کمتر از حد بهینه اجتماعی آلودگی را کاهش می دهند، افزایش تعداد مصرف کنندگان دلالت های راجع به شکل منحنی کوزنتس را تغییر نمی دهد. این شکل به تکنولوژی کاهش آلودگی بستگی دارد و نه تعداد آلوده کنندگان یا نسبت

<sup>1</sup> Nash Players

<sup>2</sup> Decentralized

<sup>3</sup> Peaked

مطلوبیت نهایی مصرف و کیفیت محیط زیست. افزایش  $N$  همانند افزایش  $Z$  صرفاً مسیر بهینه آلودگی درآمد را به پایین انتقال می‌دهد.

### ۳-۱. انتقادات وارده بر رهیافت‌های رایج بررسی صحت منحنی کوزنتس

اکثر مطالعات صورت گرفته در مورد فرضیه زیست محیطی کوزنتس بر اساس مدل‌های کاملاً پارامتریک درجه دوم و درجه سوم بنا شده‌اند. در واقع فرم تبعی زیر مورد توجه قرار گرفته است:

$$Y_{it} = \beta_0 + \beta_1 x_{it} + \beta_2 x_{it}^2 + \beta_3 x_{it}^3 + \beta_4 z_{it} + \varepsilon_{it}$$

که در چنین مدلی  $Y_{it}$  شاخص آلاینده زیست محیطی و  $x_{it}$  درآمد سرانه و  $z_{it}$  مجموعه متغیرهای دیگری که باعث تخریب محیط زیست می‌شوند خواهند بود. تحلیل این مقالات به این صورت بوده است که اگر  $\beta_1 = \beta_2 = \beta_3 = 0$  باشد، گفته می‌شود که هیچ رابطه‌ای بین  $Y_{it}$  و  $x_{it}$  وجود ندارد. اگر  $\beta_3 = 0$ ،  $\beta_2 = 0$  و  $\beta_1 > 0$  باشد، رابطه یکنواخت افزایشی و اگر  $\beta_3 = 0$ ،  $\beta_2 < 0$  و  $\beta_1 > 0$  باشد رابطه  $U$  وارونه بین  $Y_{it}$  و

$x_{it}$  برقرار است و نقطه چرخش یا بازگشت منحنی برابر است با  $x = -\frac{\beta_1}{2\beta_2}$  و اگر

$\beta_3 = 0$ ،  $\beta_2 > 0$  و  $\beta_1 < 0$  باشد رابطه  $U$  شکل بین  $Y_{it}$  و  $x_{it}$  برقرار است. اگر  $\beta_3 > 0$ ،  $\beta_2 < 0$  و  $\beta_1 > 0$  باشد رابطه  $N$  شکل و اگر  $\beta_3 < 0$ ،  $\beta_2 > 0$  و  $\beta_1 < 0$  باشد رابطه‌ای به شکل  $N$  معکوس بین  $Y_{it}$  و  $x_{it}$  برقرار است.

این رویکرد بررسی فرضیه زیست محیطی کوزنتس انتقاداتی را در پی داشته است. مهمترین موارد در سه دسته زیر قابل بیان هستند:

۱- این رویکرد فرم‌های تبعی خاص را بعنوان پیش شرطی برای تخمین رابطه درآمد-آلودگی فرض می‌کنند که در واقعیت رابطه درآمد و محیط زیست می‌تواند پیچیده‌تر از فرم‌های تبعی مذکور باشد. (Kijima, Nishide & Ohya, A. 2010)

۲- علاوه بر این در مطالعاتی که رابطه  $U$  وارونه در قالب فرم‌های تبعی تایید می‌شود، اختلاف زیادی در برآورد نقطه برگشت وجود دارد که به نظر می‌رسد ناشی از انتخاب فرم تبعی است. برای مثال با بررسی مطالعات صورت گرفته مشخص می‌شود که محققانی که از مدل‌های خطی لگاریتمی استفاده نموده‌اند، معمولاً نقطه بازگشت بالاتری را پیشنهاد می‌کنند (He & Richard 2010). مدل‌های پارامتریک علاوه بر تحمیل یک فرم مشخص بر رابطه آلودگی-درآمد نا همخوانی‌های آشکاری با مشاهدات صورت گرفته دارند. بعنوان مثال در اکثر مطالعات فرم درجه دوم یا درجه سوم مورد توجه قرار

گرفته است. درحالی‌که تایید فرم درجه سوم براین دلالت دارد که کاهش کیفیت محیط زیست نهایتاً به مقدار  $+\infty$  یا  $-\infty$  می‌گراید. پذیرش فرم درجه دوم هم دلالت بر میل کردن آلودگی به سمت صفر در سطح درآمد مشخص و بالایی دارد که این یافته به وسیله شواهد تجربی تایید نمی‌شود. همچنین ایراد دیگر پذیرش تابع درجه دوم تقارن آن است. در واقع تایید فرم درجه دوم به معنی هم شیب بودن شاخه صعودی و نزولی منحنی است که نشان می‌دهد زمانی که درآمد سرانه فراتر از آستانه (نقطه بازگشت) می‌رود، تخریب محیط زیست با همان نرخ که قبلاً بالا رفته بود، کاهش می‌یابد که این بسیار نامحتمل است. زیرا در واقعیت بسیاری از اشکال تخریب محیط زیست غیر قابل جبران است. به طور مثال بسیاری از آلاینده‌ها تمایل به انباشت و ماندگاری برای دوره زمانی سیار طولانی دارند بطوریکه عموماً کاهش آنها از تولید آنها بسیار دشوارتر است.

۳- نکته حائز اهمیت دیگر در طراحی روش و مدل این است که معمولاً به دلیل محدودیت داده‌ها در این مطالعات از داده‌های تابلوئی استفاده می‌شود. استفاده از داده‌های تابلویی محل بحث است. رهیافتی که مبتنی بر استفاده از داده‌های سری زمانی مربوط به یک کشور خاص باشد، به دلایل گوناگون بر تبیین فرضیه EKC براساس داده‌های مجموعه‌ای از کشورها برتری دارد. مهمترین دلیل این است که چنین رویکردی به محقق اجازه می‌دهد که تجارب تاریخی خاص یک کشور مثل سیاست‌های زیست محیطی، توسعه روابط تجاری و شوک‌های برونزا مثل شوک نفتی که در داده‌های انتشار آلاینده‌ها منعکس شده است را در نظر بگیرد (Kijima, Nishide & Ohyama, 2010). از سوی دیگر تحلیل سری زمانی یک کشور مفیدتر از تحلیل مقطعی است، زیرا بر پویایی‌های عوامل شکل دهنده الگوی EKC متمرکز می‌شود (Lindmark, 2002). به بیان دیگر استفاده از مجموعه سری زمانی طولانی‌تر مربوط به یک کشور از این جهت که ماهیت پویای منحنی زیست محیطی کوزنتس را منعکس می‌کند، نسبت به استفاده از داده‌های دارای طول زمانی کمتر مربوط به چندین کشور ارجحیت دارد. همچنین وقوع پدیده افزایش انتشار گازهای گلخانه‌ای در کشورهای مختلف متفاوت است. بطوریکه در بعضی کشورها رشد و توسعه فناوری در آینده می‌تواند موجب کاهش انتشار شود در حالی‌که در همه کشورها الزاماً چنین حالتی وجود ندارد (واثقی و اسماعیلی، ۱۳۸۸).

در جمع‌بندی انتقادات وارد شده بر روش‌های معمول آزمون فرضیه زیست محیطی کوزنتس می‌توان نتیجه‌گیری کرد که بررسی این فرضیه نیازمند روشی است که فرم تبعی درجه دوم و درجه سوم را بر مدل تحمیل نکند و ثانياً روش از نظر دقت در تشخیص الگو و شبیه‌سازی رابطه بین انتشار آلاینده و درآمد سرانه تکنیک خبره‌ای باشد. به عبارت دیگر دستیابی به تکنیکی قدرتمند باتوانایی‌های بالا و خطای کم در شبیه‌سازی و پیش‌بینی اهمیت بسزایی دارد. ثالثاً به جای تمرکز بر داده‌های تابلویی بهتر است بر داده‌های سری زمانی مربوط به یک کشور متمرکز شد.

#### ۴. برآورد و شبیه‌سازی مدل

امروزه روش‌های نوینی برای مدل‌سازی و پیش‌بینی پدیده‌های مختلف ابداع گشته است که الگوریتم‌های تکاملی<sup>۱</sup> در میان این روشها از جایگاه ویژه‌ای برخوردارند. در بسیاری از سیستم‌های پیچیده و خصوصاً غیرخطی که مدل‌سازی و به دنبال آن پیش‌بینی و کنترل آنها از طریق روش‌های کلاسیک و تحلیلی امری بسیار دشوار و حتی بعضاً غیرممکن می‌نماید، از این الگوریتم‌ها که از ویژگی‌هایی همچون هوشمندی مبتنی بر معرفت و خبرگی برخوردار هستند، استفاده می‌شود. الگوریتم ژنتیک<sup>۲</sup> و الگوریتم بهینه‌سازی انبوه ذرات<sup>۳</sup> (PSO) جز کارآمدترین الگوریتم‌های تکاملی می‌باشند که در این مطالعه برای شبیه‌سازی و پیش‌بینی مورد استفاده قرار گرفته‌اند. این الگوریتم‌ها بصورت مجزا و بصورت معدود به طور همزمان، عمدتاً در پژوهش‌های مربوط به حوزه انرژی برای شبیه‌سازی مصرف و تقاضای انرژی مورد استفاده قرار گرفته‌اند که در این میان می‌توان به مطالعات خارجی پاکسوی و همکاران<sup>۴</sup> (۲۰۱۱)، کانیرت و اوزتورک<sup>۵</sup> (۲۰۰۶)، سیلان و اوزتورک<sup>۶</sup> (۲۰۰۴) و پژوهش‌های داخلی صادقی و همکاران (۱۳۹۱)، قنبری، خضری و اعظمی (۱۳۸۷)، صادقی و همکاران (۱۳۸۸)، میبدی، خضری و اعظمی (۱۳۸۸) اشاره کرد.

<sup>۱</sup> Evolutionary Algorithms

<sup>۲</sup> Genetic Algorithm

<sup>۳</sup> Particle swarm optimization Algorithm

<sup>۴</sup> Paksoy & et al.

<sup>۵</sup> Canyru and Ozturk

<sup>۶</sup> Ceylan and Ozturk

#### ۴-۱. الگوریتم ژنتیک

الگوریتم ژنتیک شناخته‌شده‌ترین نوع از الگوریتم‌های تکاملی است که طی سالهای ۱۹۶۰ تا ۱۹۸۰ توسط جان هالند و همکارانش ابداع و گسترش یافت و امروزه به عنوان یک روش مؤثر و کارا برای حل مسائل بهینه‌سازی در زمینه‌های مختلف تجاری، علوم پایه، علوم مهندسی مورد استفاده قرار می‌گیرد. هدف این الگوریتم بهینه کردن تابع شایستگی (تابع برازندگی) است. تحقیقات بر روی الگوریتم ژنتیک دقیقاً پس از تحقیقات روی شبکه‌های عصبی مصنوعی<sup>۱</sup> آغاز شد که در هر دو شاخه از سیستم‌های بیولوژیکی به‌عنوان مدل انگیزشی و محاسباتی الهام گرفته شده است. این الگوریتم به گونه‌ای نظریه‌ی تکاملی داروین را دنبال می‌کند. داروین در تئوری تکاملی خود بیان می‌کند که در جهان با منابع محدود و جمعیت پایدار، افراد برای بقا با یکدیگر رقابت می‌کنند و افراد با ویژگی و قابلیت‌های بهتر، شانس بیشتری برای بقا و تکثیر دارند و این افراد نیز ویژگی‌های خود را در طی نسل‌ها به فرزندان خود منتقل می‌کنند.

در این الگوریتم هر کدام از اعضا جمعیت، بر اساس شایستگی و مطلوبیتی که از خودشان نشان می‌دهند در محیط یا فضای مساله باقی می‌مانند و افراد با شایستگی بالاتر شانس بیشتری برای ازدواج و تولید مثل خواهند داشت. این الگوریتم دارای روند تکراری بوده و در هر تکرار با یک راه حل یا چندین راه حل مختلف کار می‌کند. الگوریتم ژنتیک جستجو را با جمعیتی از راه‌های اولیه تصادفی آغاز می‌کند. اگر معیارهای نهایی ارضا نشود، سه عملگر متفاوت تکثیر<sup>۲</sup>، جهش<sup>۳</sup> و ادغام<sup>۴</sup> به کار گرفته می‌شوند تا جمعیت به روز شود. هر تکرار از این سه عملگر به عنوان یک نسل<sup>۵</sup> شناخته می‌شود. از آنجا که نمایش راه‌ها در الگوریتم ژنتیک بسیار شبیه کروموزوم‌های طبیعی است و همچنین عملگرهای الگوریتم ژنتیک شبیه به عملگرهای ژنتیکی عمل می‌کنند، روند فوق را به نام الگوریتم ژنتیک نامگذاری کرده‌اند. در واقع، الگوریتم ژنتیک فضای حل را با تکرار سه گام ساده جستجو می‌کند. گام اول، گروهی از نقاط جستجو را که جمعیت نامیده می‌شود، بر اساس تابع هدف ارزیابی می‌کند. در گام دوم، بر اساس وضعیت ارزیابی شده، برخی از نقاط به عنوان کاندیداهای حل مساله انتخاب

<sup>1</sup> Artificial Neural Networks

<sup>2</sup> Reproduction

<sup>3</sup> Mutation

<sup>4</sup> Crossover

<sup>5</sup> Generation



می‌شوند. در گام سوم نیز عملگرهای ژنتیک روی این کاندیدها اعمال می‌شوند تا جمعیت نسل بعدی ساخته شوند. بعد از آن که نسل بعد تولید شد، یک مرحله از اجرای الگوریتم به پایان رسیده است. در پایان هر مرحله از اجرای الگوریتم، شرط توقف بررسی می‌شود. شرط توقف می‌تواند بر اساس گذشت زمان و تعداد مراحل تکرار الگوریتم صورت گیرد یا با توجه به پاسخ الگوریتم انجام شود. در صورت اجرا نشدن شرط توقف، الگوریتم بارها و بارها تکرار می‌شود تا شرط توقف ارضا شود و اجرای الگوریتم پایان یابد. معیار نهایی زمانی است که نتیجه‌ای در حد قابل قبول به دست آید یا تعداد حداکثر نسل تکرار شود و در پایان، بهترین جواب به دست آمده در خروجی ظاهر خواهد شد.

#### ۴-۲. الگوریتم بهینه‌سازی انبوه ذرات

الگوریتم بهینه‌سازی انبوه ذرات یک الگوریتم تکاملی جهت بهینه‌سازی توابع غیرخطی است که بر مبنای رفتار اجتماعی پرندگان ارائه شده است. این الگوریتم در سال ۱۹۹۵ توسط کندی<sup>۱</sup> و ابرهارت<sup>۲</sup> مطرح شد که بر گرفته از رفتار ذرات هجومی همچون دسته کلاغها بوده است؛ به این گونه که در حرکت یک دسته از کلاغها، یک کلاغ (سرگروه) دارای بهترین موقعیت می‌باشد و بقیه کلاغها با توجه به موقعیت خود و کلاغهای مجاور سعی در بهتر کردن مکان و نزدیک شدن به سرگروه را دارند. در این حین، چنانچه یکی از اعضا بتواند موقعیت بهتری نسبت به سرگروه پیدا کند، به عنوان سرگروه انتخاب می‌شود. عملکرد الگوریتم انبوه ذرات نیز به این گونه است؛ به این صورت که دسته‌ای از ذرات (به عنوان متغیرهای مسأله بهینه‌سازی) در محیط جستجو پخش می‌شوند. واضح است که بعضی از ذرات، موقعیت بهتری نسبت به ذرات دیگر خواهند داشت. در نتیجه، بر طبق رفتار ذرات هجومی بقیه ذرات سعی می‌کنند موقعیت خود را به موقعیت ذرات برتر برسانند؛ در عین حال که موقعیت ذرات برتر نیز در حال تغییر می‌باشد. در این روش، تغییر موقعیت هر ذره بر اساس تجربه خود در حرکات قبلی و تجربه ذرات همسایه صورت می‌گیرد. در واقع، هر ذره از برتری یا عدم برتری خود نسبت به ذرات همسایه و همچنین نسبت به کل گروه آگاه است (صادقی و همکاران ۱۳۹۱).

<sup>1</sup> Kennedy

<sup>2</sup> Eberhart

### ۳-۴. داده‌های تحقیق

مدل در نظر گرفته شده برای شبیه‌سازی رابطه درآمد سرانه و انتشار سرانه گاز CO<sub>2</sub> با توجه به مباحث مطرح شده در بخش‌های مبانی نظری و ادبیات موضوع به شکل زیر خواهد بود:

$$CO_2 = f(GDP, FUS)$$

که در آن CO<sub>2</sub> میزان انشار سرانه گاز دی اکسید کربن بر حسب تن سرانه در ایران و GDP تولید ناخالص داخلی سرانه بر حسب دلار ثابت سال ۲۰۰۵، FUS میزان مصرف سوخت‌های فسیلی در ایران بر حسب کیلو تن معادل نفت خام است. سری زمانی تمامی متغیرها در دوره ۱۹۸۰-۲۰۰۹ از مجموعه داده‌های بانک جهانی استخراج و مورد بررسی قرار گرفته است.

### ۴-۴. شبیه‌سازی مدل

به منظور دستیابی به دقیق‌ترین شبیه‌سازی ممکن و همچنین جلوگیری از عدم تحمیل فرم تبعی خاص به مدل، سه فرم تبعی مختلف به کار گرفته شده است که عبارتند از فرم خطی و فرم درجه دو و فرم نمایی. این سه فرم بصورت صریح به شکل زیر هستند:

$$CO_{2t} = a_0 + a_1GDP_t + a_2FUS_t$$

$$CO_{2t} = a_0 + a_1GDP_t + a_2FUS_t + a_3GDP_t^2 + a_4FUS_t^2 + a_5GDP_t.FUS_t$$

$$CO_{2t} = a_0 + a_1GDP_t^{a_2} + a_3FUS_t^{a_4}$$

در این پژوهش به کمک الگوریتم ژنتیک و الگوریتم بهینه‌سازی انبوه ذرات و با استفاده از نرم افزار MATLAB اقدام به بهینه‌سازی ارزش پارامترهای مدل شده است. برای شروع کار با الگوریتم‌ها بایستی مقادیر ثابتی را تعریف نمود. پارامترهای استفاده شده در الگوریتم ژنتیک و الگوریتم PSO برای تخمین ضرایب، در جدول ۱، ارائه شده است:

جدول ۱: پارامترهای مورد استفاده در الگوریتم‌ها

الگوریتم PSO		الگوریتم ژنتیک	
اندازه	پارامتر	اندازه	پارامتر
۵۰	اندازه ذرات (n)	۵۰	جمعیت اولیه
۰.۹۹۵	وزن اینرسی (w)	۱۰۰	تعداد نسل
۱۰۰	ماکزیمم تعداد تکرار (t)	۰.۹	احتمال عملگر ادغام (Pc)
		۰.۰۰۶	احتمال عملگر جهشی (Pm)

با شبیه‌سازی انتشار دی اکسید کربن، توسط الگوریتم ژنتیک معادلات زیر برای فرم خطی و درجه دوم و نمایی به ترتیب به صورت زیر برآورد گردید:

$$CO_{2t} = 2.757 - 0.0792GDP_t - 0.000012GDP_t^2 + 0.0755FUSS_t$$

$$CO_{2t} = 2.639 + 5.1993GDP_t - 1.1347FUSS_t + 0.1644GDP_t^2 + 0.00005FUSS_t^2 - 0.0209GDP_t.FUSS_t$$

$$CO_{2t} = -1.2231 + 0.6159GDP_t^{-0.1918} + 0.393FUSS_t^{0.4356}$$

همچنین نتایج شبیه‌سازی با استفاده از الگوریتم PSO به صورت زیر است:

$$CO_2 = 0.0154 - 0.3448GDP - 0.0001GDP^2 + 0.0902FUSS_t$$

$$CO_2 = 0.2195 - 0.0818GDP_t + 2.3533FUSS_t - 0.2689GDP_t^2 - 0.0047FUSS_t^2 + 0.1004GDP_t.FUSS_t$$

$$CO_2 = 0.0114 - 0.0811GDP_t^{0.0817} + 0.0247FUSS_t^{0.4619}$$

با توجه به اینکه هدف اصلی این پژوهش آزمون فرضیه زیست محیطی کوزنتس و همچنین پیش‌بینی مقادیر آتی انتشار دی‌اکسیدکربن تا سال ۲۰۲۵ بوده است، ارزیابی عملکرد توابع شبیه‌سازی شده در پیش‌بینی مصرف با استفاده از سه معیار میانگین مجذور خطا (MSE)، میانگین خطای مطلق (MAE)، میانگین قدرمطلق درصد خطا (MAPE)، انجام شده است. با بررسی و مقایسه برآوردهای به دست آمده از شبیه‌سازی توابع فوق توسط الگوریتم ژنتیک و الگوریتم PSO نتایج زیر به دست آمد. براساس جدول ۲ می‌توان گفت که اولاً الگوریتم ژنتیک در شبیه‌سازی تابع رابطه بین درآمد سرانه و انتشار دی‌اکسید کربن در هر سه فرم تبعی دقیق‌تر از الگوریتم PSO عمل کرده است. ثانیاً در میان فرمهای تبعی مختلف، فرم نمایی با دقت بسیار بالاتری شبیه‌سازی را انجام داده است.

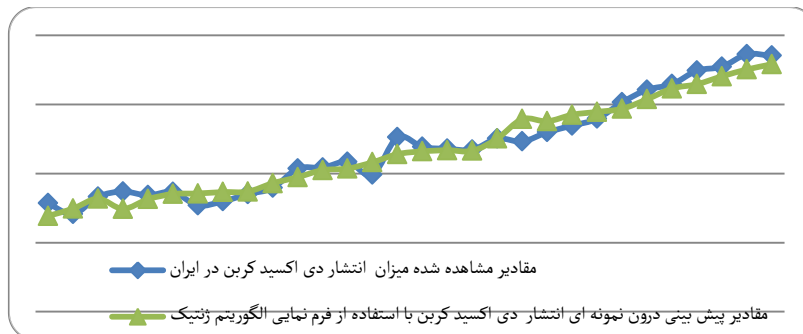
جدول ۲: مقایسه عملکرد پیش‌بینی فرمهای تبعی مختلف (محاسبات محقق)

الگوریتم	معیار دقت برازش	فرم تبعی تابع تقاضای پول		
		مدل خطی	مدل درجه دوم	مدل نمایی
الگوریتم ژنتیک	MSE	۴.۱E۰۵	۹.۰۱E۱۲	۰.۰۷۸۹
	MAE	۱۵۲۲.۳	۲.۴۲E۰۶	۰.۲۳۲۳
	MAPE	۳۸۵.۵	۴.۸۳E۰۵	۰.۰۵۱۵
الگوریتم PSO	MSE	۸.۴۴E۰۶	۹.۷۳E۱۳	۰.۱۰۳۹
	MAE	۲۴۶۴.۶	۸.۷۷E۰۶	۰.۲۶۹۹
	MAPE	۵۲۷.۱۶	۲.۰۲E۰۶	۰.۰۶۰۶

تفاوت قابل ملاحظه دقت فرم نمایی با سایر فرم‌ها مبین این واقعیت است که تحمیل قید نمای خاص بر متغیر درآمد سرانه در این مطالعه امکان دقت شبیه‌سازی را به شدت

کاهش می‌دهد و بر همین اساس قدرت پیش‌بینی مدل را نیز تضعیف می‌کند. بنابراین تا حدود زیادی می‌توان انتقادات وارده بر تحمیل فرم‌های خاص بر مدل در فرضیه زیست محیطی کوزنتس پذیرفت.

نمودار ۱: مقایسه مقادیر پیش‌بینی شده توسط مدل برتر با مقادیر مشاهده شده



همانگونه که نمودار شماره ۱ نشان داده شده است پیش‌بینی‌های درون نمونه‌ای انجام گرفته توسط فرم نمایی از دقت قابل توجهی برخوردار است و به همین دلیل این فرم به عنوان دقیق‌ترین شبیه‌سازی برای پیش‌بینی خارج از نمونه تا سال ۲۰۲۵ مورد استفاده قرار گرفته است.

#### ۴-۵. پیش‌بینی خارج از نمونه

پس از مقایسه کارایی هر روش در پیش‌بینی درون نمونه ای میزان انتشار  $CO_2$  و تشخیص بهترین الگو، با دو هدف اقدام به سناریوسازی می‌شود:

اولاً منحنی زیست محیطی کوزنتس باید بعنوان یک پدیده بلندمدت مورد بررسی قرار گیرد. به عبارت دیگر EKC مسیر توسعه برای اقتصادی است که در طول زمان در حال رشد است (واثقی و اسماعیلی، ۱۳۸۸). در بلند مدت تکنولوژی‌های تولید رو به پیشرفت می‌گذارند و مسئله محیط زیست از اضطرار بیشتری برخوردار می‌گردد. از سوی دیگر پایان پذیری سوخت‌های فسیلی انگیزه کاستن از مصرف آنها و جایگزین کردن انرژی‌های تجدید پذیر و پاک را افزایش می‌دهد. بر این اساس بدون سناریوسازی راجع به این تغییرات نمی‌توان به این سوال پاسخ داد که آیا انتشار آلاینده‌هایی چون دی اکسید کربن تحت تاثیر افزایش درآمد سرانه کاهش خواهد یافت یا خیر.

ثانیاً پیش‌بینی روند آینده انتشار دی اکسید کربن تحت وقوع سناریوهای مختلف به سیاستگذاران حوزه محیط زیست مسیر بهینه حرکت در آینده را نشان داده و راهنمایی

برای سیاستگذاری های کلان در این حوزه خواهد بود. بر این اساس با انتخاب دقیق ترین مدل اقدام به پیش‌بینی میزان انتشار CO<sub>2</sub> در ایران تا سال ۲۰۲۵ تحت سناریوهای مختلف شده است.

سناریوها تصویر روشنی از آینده‌اند که برنامه‌ریزان و سیاستگذاران به کمک آنها می‌توانند مسائل، چالش‌ها و فرصت‌های محیط را به روشنی ببینند و بشناسند. بدیهی است به سبب گوناگونی عوامل و نیروهای سازنده آینده و پیچیدگی و تعامل میان آنها، هرگز نمی‌توان آینده را به طور دقیق پیش‌بینی کرد. از این رو، متخصصان آینده‌نگری، انتخاب محتمل‌ترین تصویر آینده را چندان درست نمی‌دانند. در نتیجه، باید سناریوهای مختلفی را برای برنامه‌ریزی به کار برد. بنابراین، اگر سناریو شامل همه تصاویر ممکن آینده باشد، می‌تواند ابزار قدرتمندی برای برنامه‌ریزی به شمار آید (صادقی و همکاران ۱۳۹۱). در این مطالعه به منظور پیش‌بینی میزان انتشار دی اکسید کربن و بررسی امکان وقوع فرضیه زیست محیطی کوزنتس در قالب پنج سناریوی احتمالی صورت می‌پذیرد.

جدول ۳: سناریوهای طراحی شده برای پیش‌بینی تا افق ۱۴۰۴

سناریو	درصد رشد GDP سرانه	درصد تغییر مصرف انرژی فسیلی
مصرف انرژی بالا- رشد اقتصادی پایین	۵	۱۵
مصرف انرژی پایین- رشد اقتصادی بالا	۱۵	۵
کاهش مصرف سوخت‌های فسیلی- رشد اقتصادی پایین	۵	-۱
کاهش متوسط نرخ رشد سالانه مصرف انرژی فسیلی	۵	کاهش سالانه ۵٪ از نرخ رشد
کاهش زیاد نرخ رشد سالانه مصرف انرژی فسیلی	۵	کاهش سالانه ۱۰٪ از نرخ رشد

سناریوی مصرف انرژی بالا و رشد اقتصادی پایین بدبینانه‌ترین سناریوی طراحی شده است. وقوع این سناریو همانگونه که در نمودار شماره ۲ (پیوست مقاله) نشان داده شده است منجر به افزایش فزاینده انتشار آلاینده‌ها در کشور خواهد شد. به گونه‌ای که دستیابی به نقطه برگشت به دنبال رشد اقتصادی بیشتر متصور نیست. سناریو مصرف انرژی پایین و رشد اقتصادی بالا نیز همانگونه که در نمودار شماره ۲ نشان داده شده است، منجر به شکل‌گیری روند فزاینده انتشار دی اکسید کربن خواهد شد. تفاوت این حالت با سناریوی قبل آن است که رشد نسبتاً بالای درآمد سرانه و رشد پایین مصرف انرژی فسیلی بخشی از شدت افزایش انتشار را کاهش می‌دهد. اما در این سناریو نیز نقطه بازگشتی در اقتصاد ایران قابل تعریف نخواهد بود. سناریو سوم خوشبینانه‌ترین

سناریوی احتمالی است. در این سناریو فرض شده است میتوان سالانه ۱ درصد مصرف انرژی فسیلی را کاهش داد، و این کاهش انرژی فسیلی نه تنها رشد را دچار آسیب نمی‌کند، بلکه کشور رشد سالانه ۵ درصدی را نیز تجربه می‌کند. همانگونه که در نمودار شماره ۳ (پیوست مقاله) مشاهده می‌شود، در این سناریو از آنجا که هر دو عامل درآمد و مصرف سوختهای فسیلی در جهت کاهش انتشار عمل می‌کنند، انتشار روند نزولی نسبتاً خطی را تجربه می‌کند. سناریوهای چهارم و پنجم با فرض رشد سالانه ۵ درصدی اقتصادی طراحی شده‌اند. درحالیکه میزان مصرف انرژی فسیلی در سال ۲۰۱۰، ۱۵ درصد رشد کند و در سالهای بعد سالانه ۵ درصد و در حالت دیگر سالانه ۱۰ درصد از نرخ رشد مصرف این سوختها کاسته شود. این سناریوها به واقعیت نزدیکتر است. نتایج اعمال این سناریوها در نمودار شماره ۴ (پیوست مقاله) نشان داده شده است. همانگونه که در این نمودار مشاهده می‌گردد در این شرایط روند افزایش انتشار دی‌اکسید کربن کاهنده خواهد بود و با رابطه آلودگی با منحنی زیست محیطی کوزنتس همخوانی دارد. در واقع انتظار می‌رود که نقطه بازگشتی وجود داشته باشد. در جدول زیر اطلاعات مربوط نقاط بازگشت ارائه شده است:

جدول ۴: مختصات نقاط بازگشت در صورت وقوع سناریوهای چهارم و پنجم

سناریو	درآمد سرانه در نقطه بازگشت (دلار)	میزان حداکثر آلودگی (کیلو تن)
کاهش متوسط نرخ رشد سالانه مصرف انرژی فسیلی	۱۲۰۹۷۱۹۴	۹۱۴۶۷۹
کاهش زیاد نرخ رشد سالانه مصرف انرژی فسیلی	۶۲۰۷۷۷	۵۷۱۶۷۵

در حالت کاهش ۵ درصدی نرخ رشد مصرف سوختهای فسیلی نقطه بازگشت در سال ۲۰۸۳ و در حالت کاهش ۱۰ درصدی نقطه بازگشت در سال ۲۰۷۶ خواهد بود.

## ۵. نتیجه‌گیری و پیشنهادات

در این پژوهش با تکیه بر مبانی نظری فرضیه زیست محیطی کوزنتس، اقدام به بررسی امکان وقوع آن در اقتصاد ایران پرداخته شده است. با توجه به انتقادات وارده بر روشهای رایج بررسی صحت این فرضیه از جمله تحمیل فرم های درجه دوم یا درجه سوم بر این منحنی و همچنین استفاده از داده‌های تابلویی، اقدام به شبیه‌سازی رابطه انتشار دی‌اکسید کربن و درآمد سرانه با استفاده از الگوریتم ژنتیک و الگوریتم بهینه‌سازی انبوه

ذرات (PSO) با سه فرم تبعی مختلف گردید. نتایج حاصل از شبیه‌سازی شش مدل مختلف نشان داد که اولاً الگوریتم ژنتیک شبیه‌سازی دقیق‌تری از رابطه انتشار دی‌اکسید کربن و درآمد ارائه می‌دهد. ثانیاً فرم نمایی با دقت بسیار بیشتری این رابطه را مدل‌سازی می‌کند. توانایی بسیار بالای این فرم که نسبت به دوفرم دیگر فرم آزادتری به حساب می‌آید (زیرا توان متغیرهای از قبل بر آنها تحمیل نمی‌شود و مدل در انتخاب توان آزاد است)، نشان می‌دهد که بایستی در استفاده از فرم‌های درجه دو و درجه سه برای تبیین رابطه آلودگی-درآمد احتیاط نمود. ثالثاً این برازش حاکی از رابطه غیرمستقیم میزان انتشار در اکسیدکربن با درآمد سرانه و رابطه مستقیم آن با مصرف سوخت‌های فسیلی است. از آنجا که هدف بررسی صحت فرضیه EKC تعیین نقطه بازگشت است، با طراحی پنج سناریو احتمالی امکان وقوع این نقطه بررسی شد. نتایج سناریوها نشان داد که رشد اقتصادی بالا به تنهایی قادر به کاستن از آلودگی نیست بلکه بایستی در جهت کاستن از مصرف انرژی فسیلی یا حداقل کاستن از نرخ رشد مصرف سوخت‌های فسیلی اقدام نمود که در حالت اول میزان انتشار کاهش یافته و در حالت دوم به تدریج روند صعودی انتشار به حداکثر رسیده و بسته به میزان کاهش در نرخ رشد سوخت‌های فسیلی و میزان رشد درآمد نقطه بازگشت رخ می‌دهد. در واقع وقوع منحنی زیست محیطی کوزنتس در اقتصاد ایران با فرض رشد متوسط درآمد سرانه بر کاستن تدریجی از مصرف سوخت‌های فسیلی وابسته است. در واقع رشد درآمد سرانه زمانی موجب کاستن از انتشار CO<sub>2</sub> خواهد شد که مبتنی بر فاصله گرفتن فرآیند تولید و مصرف از سوخت‌های فسیلی مبتنی باشد. نتایج همچنین نشان داد فرضیه کوزنتس قانون نیست، بلکه یک پدیده تجربی است که روی دادن آن صرفاً تابع رشد درآمد نیست. ضمن اینکه در مجموع بایستی اذعان نمود که اگر چنین منحنی را متصور باشیم ایران در سطوح اولیه این منحنی قرار دارد. برای کوتاه کردن زمان رسیدن به نقطه بازگشت نه تنها بایستی به طراحی سیاست‌های لازم برای تسریع رشد اقتصادی توجه کرد بلکه باید با وضع قوانین مناسب و استفاده از ابزارهایی چون مالیات بر کربن از انتشار فزاینده این گاز در کشور جلوگیری نمود. در این مسیر سرمایه‌گذاری در بر روی منابع انرژی پاک و تجدیدپذیر و همچنین انتقال تکنولوژی‌های برتر تولید پاک، الزامی است.

## فهرست منابع:

- آماده، حمید، حق دوست، احسان و آرش اعظمی (۱۳۸۸)، بررسی رابطه حجم گازهای گلخانه‌ای و تولید ناخالص داخلی سرانه در ایران (مطالعه موردی دی اکسید کربن)، پژوهشنامه اقتصادی زمستان ۱۳۸۸، ۹(۴) (پیاپی ۳۵): ۲۰۹-۲۳۷.
- پژویان، جمشید و نیلوفر مرادحاصل (۱۳۸۶)، بررسی اثر رشد اقتصادی بر آلودگی هوا، پژوهشهای اقتصادی، ۷(۴): ۱۴۱-۱۶۰.
- پورکاظمی، محمدحسین و ایلناز ابراهیمی (۱۳۸۷)، بررسی منحنی کوزنتس زیست محیطی در خاورمیانه، پژوهشهای اقتصادی ایران، ۱۰(۳۴): ۵۷-۷۱.
- جلایی اسفندآبادی، سیدعبدالمجید و امید ستاری (۱۳۹۰)، بررسی و پیش بینی اثر جهانی شدن اقتصاد بر توزیع درآمد در جامعه شهری ایران با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی، پژوهش های رشد و توسعه اقتصادی، ۱(۴): ۱۱۷-۱۴۱.
- صادقی، حسین و مجید اسلامی اندارگلی (۱۳۹۰)، رشد اقتصادی و آلودگی زیست محیطی در کشورهای عضو پیمان کیوتو، مطالعات اقتصاد انرژی، ۸(۳۰): ۱-۳۲.
- صادقی، حسین، ذوالفقاری، مهدی، سهرابی، حسین و یونس سلمانی (۱۳۹۱)، کاربرد الگوریتم انبوه ذرات و الگوریتم ژنتیک و در شبیه‌سازی و پیش‌بینی تقاضای انرژی، نشریه انرژی، دوره ۱۵ شماره ۲-۶۰-۴۵ :
- صادقی، حسین، ذوالفقاری مهدی و محمد حیدری زاده (۱۳۸۸)، تخمین تابع تقاضای بنزین در بخش حمل و نقل با استفاده از الگوریتم ژنتیک، مطالعات اقتصاد انرژی، ۶(۲۱): ۱-۲۷.
- صالح، ایرج، شعبانی، زهره سادات، باریکانی، سیدحامد و سعید یزدانی (۱۳۸۸)، بررسی رابطه علیت بین تولید ناخالص داخلی و حجم گازهای گلخانه‌ای در ایران (مطالعه موردی گاز دی اکسیدکربن)، اقتصاد کشاورزی و توسعه، ۱۷(۶۶): ۱۹-۴۱.
- غزالی سمانه و منصور زیبایی (۱۳۸۸)، بررسی و تحلیل رابطه بین آلودگی محیطی و رشد اقتصادی با استفاده از داده‌های تلفیقی: مطالعه موردی آلاینده مونوکسیدکربن، اقتصاد و توسعه کشاورزی (علوم و صنایع کشاورزی)، ۲۳(۲): ۱۲۹-۱۳۴.
- مقدسی، رضا و زهرا گلریزضیایی (۱۳۹۰)، بررسی رابطه بین انتشار گاز دی اکسیدکربن و تولید ناخالص داخلی بر اساس داده‌های ترکیبی، اقتصاد و توسعه کشاورزی (علوم و صنایع کشاورزی)، ۲۵(۴): ۴۸۰-۴۸۷.
- میبدی، علی، خضری، محسن و آرش اعظمی (۱۳۸۸)، شبیه سازی تابع تقاضای انرژی در ایران با استفاده از الگوریتم انبوه ذرات، فصلنامه مطالعات اقتصاد انرژی، ۶(۲۰): ۱۴۱-۱۵۹.



میرشجاعیان حسینی، حسین و فرهاد رهبر (۱۳۹۰)، بررسی منحنی فضایی زیست محیطی کوزنتس در کشورهای آسیایی (مطالعه موردی: گاز دی اکسیدکربن و ذرات معلق)، محیط شناسی، ۳۷(۵۸): ۱۴-۱.

نصرالهی، زهرا و مرضیه غفاری گولک (۱۳۸۸)، توسعه اقتصادی و آلودگی محیط زیست در کشورهای عضو پیمان کیوتو و کشورهای آسیای جنوب غربی (با تاکید بر منحنی زیست محیطی کوزنتس)، پژوهشنامه علوم اقتصادی، ۹ (۲ (پیاپی ۳۵)): ۱۰۵-۱۲۶.

واتقی، الهه و عبدالکریم اسماعیلی (۱۳۸۸)، بررسی عوامل تعیین کننده انتشار گاز CO<sub>2</sub> در ایران (کاربرد نظریه زیست محیطی کوزنتس)، محیط شناسی، ۳۵(۵۲): ۹۹-۱۱۰.

Ahmed, K. and W. Long (2012), Environmental Kuznets Curve and Pakistan: An Empirical Analysis. *Procedia Economics and Finance*, 1: 4-13.

Akbostancı, E., Türüt-Aşık, S., & G. İ. Tunç (2009), The relationship between income and environment in Turkey: Is there an environmental Kuznets curve? *Energy Policy*, 37(3): 861-867.

Andreoni, J. and A. Levinson (2001), The simple analytics of the environmental Kuznets curve. *Journal of Public Economics*, 80(2): 269-286.

Arrow, K., Bolin, B., Costanza, R., Dasgupta, P., Folke, C., Holling, C. S., Jansson, B-O., Levin, S., Maler, K-G, Perrings, Ch. and D. Pimentel (1995), Economic growth, carrying capacity, and the environment, *Ecological Economics*, 15(2): 91-95.

Azomahou, T., Laisney, F. and Phu, N.V (2006), Economic development and CO<sub>2</sub> emissions: A nonparametric panel approach, *Journal of Public Economics*, 90(6-7): 1347-1363.

Baek, J. and & H. S, Kim (2013), Is economic growth good or bad for the environment? Empirical evidence from Korea. *Energy Economics*, 36: 744-749.

Canyurt O.E. and H.K, Ozturk (2006), Three Different Applications of Genetic Algorithm (GA) Search techniques on Oil Demand Estimation, *Energy Conversion and Management*, 47: 3138-3148.

Ceylan H. and H.K, Ozturk (2004), Estimating Energy Demand of Turkey Based on Economic Indicators Using Genetic Algorithm Approach, *Energy Conversion and Management*, 45: 2525-2537.

Du, L., Wei, C. and S. Cai (2012), Economic development and carbon dioxide emissions in China: Provincial panel data analysis, *China Economic Review*, 23(2): 371-384.

Esteve, V. and C. Tamarit (2012), Threshold CO<sub>2</sub> integration and nonlinear adjustment between CO<sub>2</sub> and income: The Environmental Kuznets Curve in Spain 1857-2007, *34(6)*: 2148-2156.

- Fodha, M. and O. Zaghdoud (2010), Economic growth and pollutant emissions in Tunisia: An empirical analysis of the environmental Kuznets curve. *Energy Policy*, 38(2): 1150-1156.
- Focacci, A. (2005), Empirical analysis of the environmental and energy policies in some developing Countries using widely employed macroeconomic indicators: the cases of Brazil, China and India, *Energy Policy*, 33(4): 543-554.
- Galeotti, M., Lanza, A. and F. Pauli (2006), Reassessing the environmental Kuznets curve for CO<sub>2</sub> emissions: A robustness exercise, *Ecological Economics*, 57(1): 152-163.
- Grossman, M. G. and B. A. Krueger (1995), Economic growth and the environment, *Quarterly Journal of Economics*, 110(2): 353-377.
- He, J. and P. Richard (2010), Environmental Kuznets curve for CO<sub>2</sub> in Canada, *Ecological Economics*, 69(5): 1083-1093.
- Kijima, M., Nishide, K. and A. Ohyama (2010), Economic models for the environmental Kuznets curve: A survey. *Journal of Economic Dynamics and Control*, 34(7): 1187-1201.
- Lindmark, M. (2002), An EKC-pattern in historical perspective: carbon dioxide emissions, technology, fuel prices and growth in Sweden 1870-1997, 42(1): 333-347.
- Martínez-Zarzoso, I. and A. Bengochea-Morancho (2004), Pooled mean group estimation of an environmental Kuznets curve for CO<sub>2</sub>, *Economics Letters*, 82(1): 121-126.
- Paksoy T., Özceylan E., Pehlivan N. and G. Weber (2011), Particle Swarm Optimization Approach For Estimation of Energy Demand of Turkey, *Global Conference On Power Control And optimization*, Dubai, UAE.
- Roca, J., Padilla, E., Farré, M. and V. Galletto (2001), Economic growth and atmospheric pollution in Spain: discussing the environmental Kuznets curve hypothesis, *Ecological Economics*, 39(1): 85-99.
- Saboori, B., Sulaiman, J. and S. Mohd (2012), Economic growth and CO<sub>2</sub> emissions in Malaysia: A Cointegration analysis of the Environmental Kuznets Curve, *Energy Policy*, 51: 184-191.
- Sengupta, E. (1996), CO<sub>2</sub> emission-income relationship: policy approach for climate Control, *Pacific and Scian Journla of Energy*, 7: 207-229.
- Song, T., Zheng, T. and L. Tong (2008), An empirical test of the environmental Kuznets curve in China: A panel COintegration approach, *China Economic Review*, 19(3): 381-392.

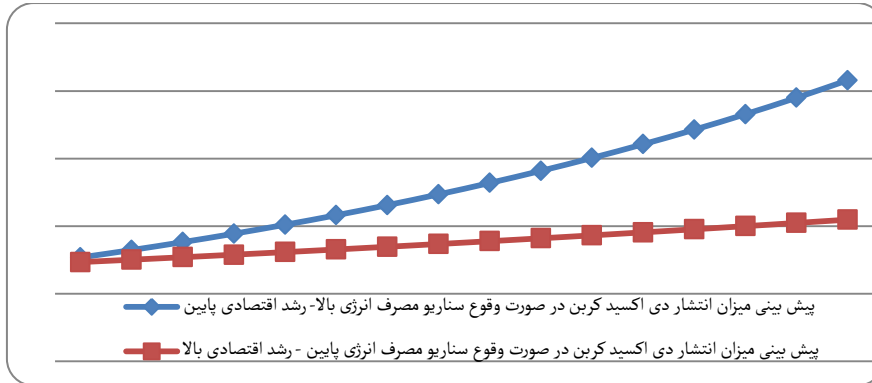
Taskin, F. and O. Zaim (2000), Searching for a Kuznets curve in environmental efficiency using kernel estimation, *Economics Letters*, 68(2), 217-223.

Wang, K-M. (2012), Modelling the nonlinear relationship between CO<sub>2</sub> emissions from oil and economic growth, *Economic Modelling*, 29(5): 1537-1547.

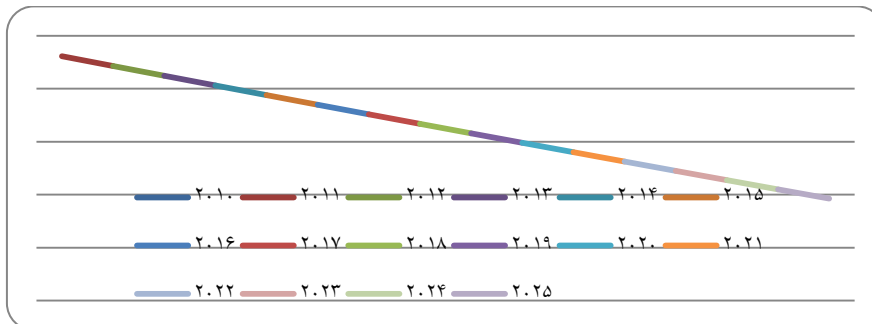
Stern, N. (2007), *The economics of climate change: the Stern review*, Cambridge: Cambridge University Press.

## پیوست‌ها:

نمودار ۲: پیش‌بینی میزان انتشار در سناریوهای اول و دوم

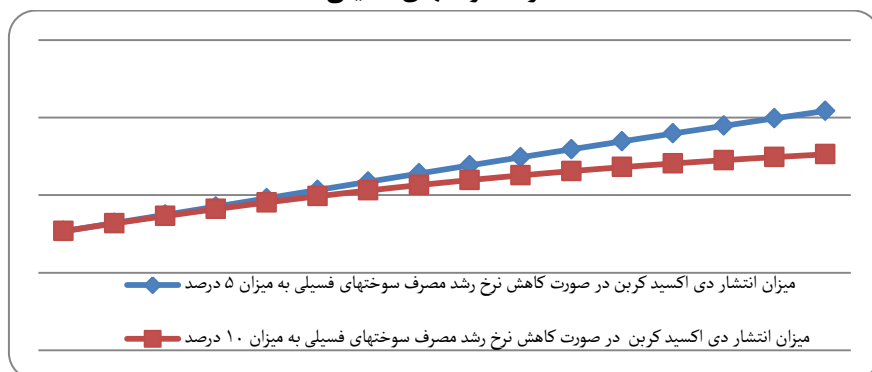


نمودار ۳: نتایج پیش‌بینی در صورت وقوع کاهش در مصرف سوخت‌های فسیلی



نمودار ۴: پیش‌بینی میزان انتشار دی‌اکسید کربن در سناریوهای مربوط به کاهش نرخ رشد

## مصرف سوخت‌های فسیلی





# Simulating Environmental Kuznets Curve in Iran using Genetic Algorithm (GA) and Particle Swarm Optimization (PSO) Algorithm

Hossein Sadeghi

Associate Professor, Department of Economics,  
Tarbiat Modares University, Tehran-Iran  
[sadeghih@modares.ac.ir](mailto:sadeghih@modares.ac.ir)

Omid Sattari

PhD Student in Economics, Department of Economics,  
Tarbiat Modares University(Corresponding author)  
[omid.sattari@gmail.com](mailto:omid.sattari@gmail.com)

## Abstract

According to the Environmental Kuznets curve hypothesis, the relationship between per-capita GDP and per-capita Pollutants has an inverted U-shape. Most studies on this subject are based on estimating fully parametric quadratic or cubic regression models. The purpose of this paper is to simulate the relationship between per-capita carbon dioxide (CO<sub>2</sub>) emission and per capita income in Iran using genetic algorithm and Particle swarm optimization algorithm concerning three functional forms (linear, quadratic and exponential). Investigating the forecasting accuracy criteria the most subtle model is used to forecast per-capita CO<sub>2</sub> emission up to 2025 concerning five scenarios. More minuteness of GA, choosing exponential form as the most subtle functional form, positive effect of Fossil fuel energy consumption and negative effect of economic growth on CO<sub>2</sub> emission are the main results.

**JEL Classification:** Q52, Q53, Q54, C63

**Keywords:** Environmental Kuznets curve hypothesis, Simulation, Forecasting, Genetic Algorithm, Particle Swarm Optimization