

بررسی تعامل بین مصرف و انتشار گاز گلخانه‌ای با استفاده از کالیبراسیون یک الگوی بهینه‌یابی پویا

زهرا نصراللهی^{۱*}فائزه سعیدی^۲

تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۰۲/۱۲

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۵/۰۷/۰۱

چکیده

امروزه بهره‌برداری بیش از حد منابع از یک سو و آلودگی، ضایعات و پسماندهای تولیدی و مصرفی از سوی دیگر موانع اساسی را پیش روی توسعه کشورها قرار داده است. از جمله مخاطرات که اخیراً توجه جهانیان به آن معطوف شده، افزایش گازهای گلخانه‌ای، تخریب لایه اوزون، ذوب شدن یخ‌های قطبی، از دست دادن گونه‌ها و فرسایش زمین‌های کشاورزی است. مصرف از جمله علل کلیدی در تخلیه منابع طبیعی، انتشار گازهای گلخانه‌ای و تخریب محیط زیست است که باید در راستای توسعه پایدار مدیریت شود. در این مقاله با هدف بررسی اثر مصرف بر توسعه پایدار به پیروی از الگوی لامبرت (۱۹۸۵) و استوکی (۱۹۹۸)، از یک مدل کنترل بهینه که بر تعامل بین رفتار مصرف‌کننده و تخریب محیط زیست تمرکز دارد، استفاده شده است. به منظور حل عددی این مدل، تابع مطلوبیت با خاصیت ریسک‌گریزی نسبی ثابت در نظر گرفته شده و بر اساس اصل حداکثر پونترباگین به بهینه‌سازی مدل و یافتن مقادیر بهینه مصرف و انتشار آلودگی در وضعیت پایدار پرداخته شده است. پارامترهای مدل با استفاده از روش کالیبراسیون مقدار دهی شده و در نهایت با طرح سناریو، نتایج حاصل از تغییر پارامترهای مدل ارزیابی شده است. پس از حل مدل، مسیر بهینه متغیرها و نحوه دستیابی به نقطه بهینه در حالت پایدار تعیین شده و نتایج در یک نمودار فازی تجزیه و تحلیل شده است. نتایج، حاکی از بالا بودن مصرف و انتشار وضعیت فعلی ایران نسبت به مقادیر بهینه است، به نحوی که ایران از وضعیت بهینه پایدار دور می‌شود. علت این نتایج، عدم پایداری الگوهای مصرف در ایران است.

واژگان کلیدی: توسعه پایدار، مصرف پایدار، تخریب محیط زیست، بهینه‌یابی پویا، ایران.

Keywords: Sustainable Development, Sustainable Consumption, Environmental Degradation, Dynamic Optimization, Iran.

JEL Classification: Q56, Q01, E21, C61.

^۱. دانشیار گروه اقتصاد، دانشکده اقتصاد، دانشگاه یزد

(* - نویسنده مسئول: Email: Nasr@yazd.ac.ir)

^۲. دانشجوی کارشناسی ارشد علوم اقتصادی، دانشکده اقتصاد، دانشگاه یزد

۱- مقدمه

در جهان مدرن امروز، بیشتر زمان و انرژی مردم به تولید کالاها و خدمات برای کسب درآمد اختصاص یافته است و سپس این درآمد برای خرید اقلام گوناگون مصرفی خرج می‌شود. این فعالیت‌های تولیدی و مصرفی، سوء بهره‌برداری از انرژی، مواد، آب و خاک را شامل شده و بنابراین اساس اختلالات محیط زیستی است (ویلک^۱، ۲۰۰۲). در طول چند دهه اخیر، نقش مردم در تخریب محیط زیست به یکی از موضوعات چالش برانگیز در بین اقتصاددانان، زیست‌شناسان و کارشناسان محیط زیست تبدیل شده است. در این راستا، از یک طرف کشورهای توسعه یافته، کشورهای در حال توسعه را برای کاهش نرخ زاد و ولد تحت فشار قرار داده و از طرف دیگر کشورهای در حال توسعه، کشورهای توسعه یافته را به خاطر شیوه زندگی اسراف آمیز و مصرفی آنها مورد انتقاد قرار می‌دهند (بانگارتس^۲، ۱۹۹۳). در این میان افزایش مصرف توسط بیش از یک میلیارد مصرف کننده در کشورهای توسعه یافته و مصرف کنندگان پردرآمد در کشورهای در حال توسعه، فشار بی سابقه‌ای را بر منابع طبیعی و محیط زیست وارد کرده و بسیاری از مشکلات محیط زیستی از جمله باران اسیدی، مه‌دود شهر و گرم شدن کره زمین را بیشتر و بزرگ تر کرده است (سودارکدی، ۲۰۰۹). شاید بتوان ادعا کرد که شیوه تعریف توسعه در شکل گیری این الگوی مصرف نقش داشته است. به این صورت که اوایل دهه ۱۹۷۰، توسعه معادل با رشد فیزیکی و به معنای انباشت سرمایه بود این تعبیر از توسعه در کشورهای اروپایی عمدتاً به مفهوم بهره‌برداری از منابع طبیعی در اقصی نقاط دنیا و گشودن بازارها برای منافع آن کشورها بود. چنین مفهومی از توسعه، مصرف بیشتر را به همراه داشت. بنگاه‌های تولیدی به منظور سود بیشتر، دست به تولید انبوه می‌زدند و به طور طبیعی به دنبال یافتن بازار برای مصرف کالاها خود بودند. تبلیغات گوناگون که به انگیزه بازاریابی و سود بیشتر بنگاه‌ها رونق یافته بود، مصرف گرایی و گرایش به مصارف کاذب و تجمل گرایی را به همراه داشت. نتیجه دیگر چنین توسعه‌ای، سرازیر شدن منابع طبیعی به سمت کالاهای مصرفی و غیر ضروری بود که موجب تخریب محیط زیست و از بین رفتن منابع طبیعی شد (فراهانی فرد، ۱۳۸۹). یکی دیگر از علل مصرف ناپایدار، عدم ارائه الگوی صحیح مصرف است. امروزه شرکت‌ها با به کارگیری شیوه‌های خاص تبلیغاتی و استفاده از ابزارهای لازم، سعی در ایجاد و تبدیل فرهنگ‌ها و نیز خلق نیازهای غیر ضروری در کشورها

^۱. Wilk (2002)

^۲. Bongaarts (1993)

دارند. شرکت‌های جهانی همه به این نتیجه رسیدند که آنچه می‌تواند باعث رونق و دوام بازار فروش کالاهای تولیدی شود، سلطه بر آرا، افکار و اندیشه‌های افراد است.

مطالعات محیط زیستی به طور عمده روی تولید متمرکز است (راپک^۱، ۲۰۰۵)، اما امروزه تمایل افراطی به مصرف برای کسب رفاه بیشتر و به دنبال آن تولید انبوه کالاهای مصرفی، بیانگر اهمیت الگوهای مصرفی و لزوم تمرکز روی این متغیر کلان اقتصادی است. تحقیقات در مورد مصرف و محیط زیست از اواسط دهه ۱۹۹۰ به سرعت رشد کرده و موضوع مصرف در اقتصاد محیط زیست، به طور برجسته در دستور کار قرار گرفته است (برنامه توسعه سازمان ملل متحد^۲، ۱۹۹۸).

افزایش مصرف از طریق افزایش شدت استفاده از منابع تجدیدناپذیر انرژی باعث افزایش ضایعات و انتشار گازهای گلخانه‌ای و نابودی محیط زیست می‌شود. اثرات محیط زیستی ناشی از مصرف شامل فشار مستقیم و غیر مستقیم است؛ از جمله فشارهای مستقیم را می‌توان تولید گازهای گلخانه‌ای ناشی از احتراق سوخت خانواده‌ها نام برد و فشارهای غیر مستقیم، انتشار گازهای آلاینده ناشی از تولید کالاها و خدمات مصرفی خانواده‌هاست (سودارکودی^۳، ۲۰۰۹).

با توجه به پیامدها و آثار نامطلوب ناشی از الگوهای ناصحیح مصرف، به عنوان یکی از علل عمده تخریب محیط زیست و ضرورت اصلاح این الگوها برای دستیابی به توسعه پایدار، در این پژوهش اثر مصرف بر محیط زیست بررسی شده است.

هدف این مقاله بررسی تعامل بین اثرات محیط زیستی مستقیم و غیر مستقیم ناشی از مصرف و انتشار گاز گلخانه‌ای دی اکسید کربن است.

۲- پیشینه تحقیق

در این بخش به شرح پژوهش‌هایی پرداخته شده که به دنبال بررسی ارتباط بین تخریب محیط زیست و رشد اقتصادی (تولید ناخالص داخلی) بوده‌اند. از آنجا که علت اصلی تولید، مصرف است و این تقاضای مصرفی است که عرضه محصولات مصرفی را شکل می‌دهد، تولید به عنوان متغیر جایگزین مصرف به کار رفته (ادرنگی^۴، ۲۰۰۴) و به بررسی ارتباط تولید و آلودگی متناسب با موضوع پژوهش پرداخته می‌شود که از جمله آن تحقیقات مربوط به منحنی محیط زیستی کوزنتس^۵ است.

^۱ Ropke (2005)

^۲ UNDP

^۳ Sudarkodi (2009)

^۴ Adrangi (2004)

^۵ Kuznets

از جمله مطالعات خارجی در راستای موضوع به شرح زیر است:

فارستر^۱ (۱۹۷۳) در مقاله خود تحت عنوان "برنامه‌ریزی مصرف بهینه در یک محیط زیست آلوده" مبادله بین مصرف و آلودگی را با استفاده از روش بهینه‌یابی پویا مدل‌سازی کرد. نتایج مطالعه او نشان داد، آلودگی قابل کنترل است و رسیدن اقتصاد به سطح صفر یا غیر صفر آلودگی، به ترجیحات جامعه، فن‌آوری و مشخصه‌های محیط زیست بستگی دارد.

سویتاس^۲ (۲۰۰۷) رابطه علی بین سه متغیر مصرف انرژی، رشد اقتصادی و انتشار کربن را برای ترکیه مورد بررسی و تحلیل قرار داد. وی از متغیرهای نیروی انسانی، سرمایه، رشد اقتصادی و انتشار کربن برای بررسی چگونگی ارتباط بین رشد اقتصادی و انتشار کربن استفاده کرد. نتایج مطالعه سویتاس حاکی از وجود رابطه‌ای یک طرفه از مصرف به انتشار کربن در ترکیه است. ولی او وجود چنین رابطه‌ای بین انتشار کربن و درآمد ملی را نتیجه نگرفت و بر این اساس استنباط کرد که کاهش انتشار کربن موجب کاهش رشد اقتصادی در ترکیه نمی‌شود.

کاستانتینی و مونی^۳ (۲۰۰۸) به بررسی ارتباط علی بین محیط زیست، توسعه انسانی و رشد اقتصادی برای گروه کشورهای منتخب طی دوره زمانی ۱۹۷۰-۲۰۰۳ پرداختند. نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که رابطه بین توسعه انسانی و رشد اقتصادی مثبت و در مقابل رابطه منابع طبیعی و رشد منفی بوده است. بررسی رابطه پایداری و توسعه انسانی در قالب منحنی محیط زیستی کوزنتس نشان می‌دهد بین ناپایداری و توسعه انسانی یک رابطه U وارون برقرار است.

نازال و همکاران^۴ (۲۰۱۳) در مقاله‌ای با عنوان "رویکرد بهینه‌یابی برای گسترش طول عمر محصول و مصرف پایدار" با استفاده از یک مدل بهینه‌سازی ریاضی چند دوره‌ای که روی تعاملات تولیدکننده، سیاست‌گذار و مصرف‌کننده تمرکز دارد، سود تولیدکننده و مصرف‌کننده را حداکثر کردند و دریافتند که افزایش دوام محصولات با میزان سود رابطه مستقیم دارد. نتایج بهینه‌سازی این مدل‌های کمی برای ارزیابی اثر سیاست‌های نظارتی مختلف و سرمایه‌گذاری برای افزایش طول عمر و دوام خدمات محصول کاربرد دارد.

از جمله مطالعات داخلی در راستای موضوع می‌توان به موارد زیر اشاره نمود:

¹. Forester (1973)

². Soyatas (2007)

³. Costantini and Monni (2008)

⁴. Nazzal (2013)

نصراللهی و غفاری (۱۳۸۸) در مقاله خود با عنوان "توسعه اقتصادی و آلودگی محیط زیست" رابطه انتشار سرانه دی اکسید کربن و شاخص توسعه انسانی را به کمک داده‌های تلفیقی (پنلی) در قالب فرضیه کوزنتس، برای کشورهای آسیای جنوب غربی و کشورهای عضو پیمان کیوتو در دوره ۲۰۰۴-۱۹۹۰ مورد آزمون قرار دادند. نتایج بررسی برای کشورهای آسیای جنوب غربی یک رابطه افزایشی خطی بین انتشار CO_2 و HDI را نشان می‌دهد و این رابطه برای کشورهای پیمان کیوتو به صورت یک رابطه N شکل به دست آمد.

پژویان و لشکری‌زاده (۱۳۸۹) در پژوهش خود به بررسی عوامل مؤثر بر رابطه رشد و آلودگی پرداختند، زیرا که آن را مبنای سیاست‌گذاری محیط زیستی در سطح ملی و بین‌المللی می‌دانند. در این پژوهش با استفاده از روش داده‌های تابلویی، اثر رشد اقتصادی، تغییرات فن‌آوری، تغییر ترجیحات و تغییرات سیاسی (نقش دولت‌ها) بر میزان آلاینده‌های مهم هوا در ۵۶ کشور منتخب با سطوح توسعه‌یافتگی متفاوت از جمله ایران، در دوره ۲۰۰۵-۱۹۹۵ آزمون شده و یافته‌ها نشان داده‌اند که به رغم رابطه مثبت رشد اقتصادی و میزان آلاینده‌ها، ارتقای سطح فن‌آوری در کاهش آلاینده‌های دی اکسید کربن و نیتروژن و بهبود شاخص‌های مربوط به اثر سیاسی در کاهش آلاینده دی اکسید کربن نقش مهمی داشته است.

اریاب و عباسی‌فرد (۱۳۹۱) با آزمون رابطه کوزنتس برای کشورهای در حال توسعه و توسعه‌یافته به این نتیجه رسیدند که تمام کشورهای توسعه‌یافته از نقطه بازگشت عبور کرده‌اند. در حالی که اکثر کشورهای در حال توسعه همچنان قبل از نقطه بازگشت هستند. آن‌ها میزان درآمد سرانه نقطه بازگشت برای کشورهای در حال توسعه را ۹۰۱ دلار تخمین زدند.

اسلاملوئیان و همکاران (۱۳۹۲) در مقاله خود با عنوان "بررسی ارتباط پویای محصول و آلودگی در چارچوب یک الگوی رشد" با استفاده از الگوی تعمیم‌یافته استوکی^۱ (۱۹۹۸) و دننگ و هوانگ^۲ (۲۰۰۹) به بررسی ارتباط پویا بین رشد اقتصادی و آلودگی از دو بعد نظری و تجربی پرداختند. در این راستا با توجه به ارتباط بلندمدت بین آلودگی محیط زیستی، سرمایه انسانی و رشد اقتصادی مجموعه شرایط لازم برای دستیابی به توسعه پایدار و قرار گرفتن اقتصاد بر روی مسیر رشد پایدار به طور نظری استخراج شده و مسیرهای بهینه متغیرهای کلیدی الگو با استفاده از داده‌های اقتصاد ایران برای دوره زمانی ۱۳۸۷-۱۳۳۸ شبیه‌سازی شده است. نتایج بیانگر آن است

^۱. Stokey (1998)

^۲. Deng and Huang (2009)

که میزان آلودگی (CO_2) سرانه در ایران همراه با افزایش تولید ناخالص داخلی سرانه طی زمان افزایش یافته است. نتایج نشان می‌دهد که اقتصاد ایران در مراحل اولیه رشد قرار دارد. به طوری که همراه با افزایش درآمد سرانه، کیفیت محیط زیست کاهش می‌یابد. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که بعد از رسیدن اقتصاد ایران به سطح آستانه این نتیجه معکوس می‌شود. بنابراین شاید بتوان ادعا کرد که فرضیه محیط زیستی کوزنتس ممکن است در آینده برای اقتصاد ایران صادق باشد.

۳- روش‌شناسی و ساختار الگو

کالیبراسیون ابزاری استاندارد در حوزه اقتصاد کلان است که به منظور کمی‌سازی و اندازه‌گیری مدل‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد. هدف کالیبراسیون، گسترش و تصحیح روش سازمان‌دهی و توصیف دقیق و جزئی داده‌هاست. کالیبره کردن عبارت است از فرآیند تعیین مقادیر پارامترهای معادله‌های ایستا و پویای یک مدل به گونه‌ای که بتوان با استفاده از مدل کالیبره شده یا مدل تصریح شده به شکل عددی، مقادیر متغیرهای درون‌زا را برای سال پایه بازتولید کرد. در واقع زمانی که پارامترهای معادله‌های مدل تعیین شد، از حل سیستم معادله‌های مدل، مقدار متغیرهای درون‌زای مدل به دست می‌آید که باید با مجموعه داده‌های سال پایه سازگار باشد (فتیحی، ۱۳۹۳). این تحقیق با هدف بررسی اثر مصرف بر توسعه پایدار به پیروی از الگوی لامبرت^۱ (۱۹۸۵) و استوکی (۱۹۹۸)، از یک مدل کنترل بهینه که بر تعامل بین رفتار مصرف‌کننده و تخریب محیط زیست تمرکز دارد، استفاده کرده است. نوآوری پژوهش جایگزین کردن تابع مطلوبیت با خاصیت ریسک‌گریزی نسبی ثابت^۲ در مدل کلی لامبرت است و پس از این جایگزینی، الگو با استفاده از مقادیر و داده‌های موجود ایران کالیبره می‌شود. در این بخش به تبیین مدل پرداخته می‌شود.

تحقق توسعه پایدار مستلزم آن است که ارضای نیازهای نسل فعلی، تأمین نیازهای نسل آتی را با مشکل مواجه نکند. بنابراین در فرموله کردن توسعه پایدار، باید در مفهوم رفاه اجتماعی نه تنها رفاه نسل امروز، بلکه رفاه نسل‌های آینده لحاظ شود. در این وضعیت توسعه پایدار بر اساس رفاه غیر

^۱. Lambert (1985)

^۲. Constant Relative Risk Aversion

کاهنده انسان در طی زمان تفسیر می‌شود و بر جنبه‌های بهینه تولید و مصرف بین نسل‌ها تأکید دارد.

در ادامه به منظور بررسی چگونگی انعکاس منافع نسل‌های آتی در تابع هدف به عنوان گامی در جهت تئوریزه کردن مفهوم توسعه پایدار، یک مسئله کنترل بهینه طراحی می‌شود که هدف آن حداکثر کردن ارزش فعلی^۱ مطلوبیت با نرخ تنزیل r و تعیین سهم بهینه مصرف و انتشار گاز گلخانه‌ای دی اکسید کربن در مسیر پایدار است.

۳-۱- تابع هدف و محدودیت‌ها

در این مدل فرض می‌شود تعداد زیادی مصرف‌کننده وجود دارد^۲ و مسئله بهینه‌سازی برنامه‌ریز اجتماعی، شامل حداکثرسازی ارزش فعلی مطلوبیت طول عمر مصرف‌کننده نمونه، نسبت به محدودیت‌هاست. رفاه مصرف‌کننده تحت تأثیر مطلوبیت حاصل از مصرف و همچنین تحت تأثیر عدم مطلوبیت ناشی از انتشار گاز گلخانه‌ای است، بنابراین تابع هدف برابر با مقدار حداکثر ارزش تنزیل شده خالص مطلوبیت ناشی از مصرف و انتشار^۳ در افق زمانی T است.

$$\text{Max} \int_0^T e^{-rt} U(f(C) - g(E)) dt \quad (1)$$

در این مدل دو محدودیت تعریف می‌شود:

بر طبق محدودیت اول، تغییرات در موجودی انتشار در طول زمان تابعی خطی از سطح مصرف و سطح انتشار است. این محدودیت، مسیر زمانی متغیر وضعیت یا معادله حرکت^۴ مسئله را که برای وجود جواب بهینه مورد نیاز است، ارائه می‌دهد:

$$E' = aC - bE \quad (2)$$

در این محدودیت، تغییر در موجودی انتشار دی اکسید کربن تحت تأثیر دو جزء است: جزء اول (aC) بیانگر کل میزان انتشار دی اکسید کربن و جزء دوم (bE) بیانگر بخشی از انتشار است که به

^۱. Percent Value

^۲. برای سادگی، جمعیت به یک نرمال شده و هیچ نرخ رشد جمعیتی وجود ندارد.

^۳. در کل مقاله منظور از انتشار، انتشار گاز گلخانه‌ای دی اکسید کربن است.

^۴. Dynamic

طور طبیعی توسط محیط زیست پاک‌سازی (جذب) می‌شود. بنابراین پارامترهای a و b ، به ترتیب ضریب آلاینده‌گی مصرف و نرخ طبیعی پاک‌سازی محیط زیست را نشان می‌دهند. دومین محدودیت بیانگر مقادیر ابتدایی و انتهای انتشار است:

$$E(0) = E_0, E(t) \leq E_T, 0 \leq t \leq T \quad (۳)$$

بر اساس آنچه شرح داده شد، مدل بهینه‌یابی مورد نظر در رابطه (۴) نمایش داده شده است:

$$\text{Max} \int_0^T e^{-rt} U(f(C) - g(E)) dt \quad (۴)$$

$$\text{st: } E' = aC - bE$$

$$E(0) = E_0, E(t) \leq E_T, 0 \leq t \leq T$$

در الگوی بهینه‌یابی (۴)، متغیر C مصرف، E انتشار گاز دی‌اکسید کربن، E' تغییرات موجودی انتشار، T نرخ تنزیل و t زمان را نشان می‌دهد که به تفصیل هر کدام در ادامه توضیح داده شده‌اند. الگوی مورد نظر در قالب یک نظریه کنترل بهینه در پی یافتن یک قانون کنترل برای سیستم است، به شکلی که ضابطه بهینگی خاصی به دست آید. مسئله کنترل تابعی از متغیرهای کنترل^۱ و وضعیت^۲ است و کنترل بهینه مجموعه‌ای از معادله‌های دیفرانسیل است که مسیری از متغیرهای کنترل و وضعیت که تابع مطلوبیت را حداکثر می‌کنند، نشان می‌دهد. به منظور حل مسئله کنترل بهینه از اصل حداکثر پونتریاگین^۳ استفاده می‌شود، این اصل یک مجموعه از شرایط ضروری است که یک کنترل بهینه را تعیین می‌کند و برای یافتن بهترین مسیر ممکن یک سیستم پویا علی‌الخصوص در حضور قیدی برای متغیرهای کنترل یا وضعیت استفاده می‌شود (شون^۴، ۲۰۰۲). در این مدل متغیر کنترل متغیر مصرف است که کنترل روی آن صورت می‌گیرد و متغیر وضعیت، انتشار گاز گلخانه‌ای دی‌اکسید کربن است.

^۱. Control

^۲. State

^۳. Pontryagin

^۴. Shone (2004)

۳-۲- حل مدل

جهت بهینه کردن مدل، تابع لاگرانژ مسئله تعیین می‌شود؛ پس از انتگرال‌گیری و ساده‌سازی این تابع، رابطه (۵) حاصل خواهد شد:

$$\begin{aligned} L &= \int_0^T \{U[f(C) - g(E)] - \lambda(t)(E' - aC + bE)\} dt \Rightarrow \\ L &= \int_0^T \{U[f(C) - g(E)] + \lambda(aC - bE) + \lambda'E\} dt - \{\lambda(T)E(T) - \lambda(0)E(0)\} \Rightarrow \\ L &= \int_0^T \{H + \lambda'E\} dt - \{\lambda(T)E(T) - \lambda(0)E(0)\} \end{aligned} \quad (5)$$

که H در رابطه (۵)، تابع همیلتونی جاری را نشان می‌دهد و تحت رابطه زیر تعریف می‌شود:

$$H = U[f(C) - g(E)] + \lambda(aC - bE)$$

طبق قضیه اصل ماکزیمم پونتریاگین، اگر متغیر کنترل بهینه C برای مسئله وجود داشته باشد، آن‌گاه متغیر هم‌وضعیت λ وجود خواهد داشت به نحوی که C و عبارت $H + \lambda'E$ را حداکثر کنند. به بیان ساده‌تر، مدل زمانی حداکثر خواهد شد که تابع لاگرانژ حداکثر شود و این زمانی تحقق می‌یابد که متغیرهای کنترل و وضعیتی وجود داشته باشند که عبارت $H + \lambda'E$ را حداکثر کنند (لامبرت، ۱۹۸۵). طبق روند حل مسئله به روش پونتریاگین: ارزش فعلی فرم همیلتونی^۱ مسئله، شرایط مرتبه اول^۲ (F.O.C) و شرط تراگردی^۳ (TV) در روابط (۶) تا (۹) و (۱۱) تعریف می‌شود:

$$H = e^{-rt} U[f(C) - g(E)] + \lambda(aC - bE) \quad (6)$$

$$\frac{\partial H}{\partial C} = 0 \Rightarrow e^{-rt} U'(\phi) f'(C) + \lambda a = 0 \quad (7)$$

$$\frac{\partial H}{\partial E} = -\lambda' \Rightarrow e^{-rt} U'(\phi) g'(E) + \lambda b = \lambda' \quad (8)$$

$$\frac{\partial H}{\partial \lambda} = E' \Rightarrow aC - bE = E' \quad (9)$$

¹. Hamiltonian

². First Order Condition

³. Transversality condition

λ متغیر هم‌وضعیت^۱ نامیده می‌شود و برابر با قیمت سایه‌ای^۲ متغیر وضعیت (انتشار) است. ارزش جاری^۳ متغیر هم‌وضعیت از ضرب مقدار فعلی آن در e^{rt} به دست می‌آید:

$$m(t) = e^{rt}\lambda(t) \quad (10)$$

شرط چهارم، شرط تراگردی مدل کنترل بهینه است، این شرط کاملاً وابسته به محدودیت نقطه پایانی مسئله $(E(t) \leq E_T)$ است، بنابراین طبق شرط تراگردی (TV)، خواهیم داشت:

$$E(0) = E_0, E(t) \leq E_T, 0 \leq t \leq T \Rightarrow \lambda(T) \leq 0, \lambda(T)[E_T - E(T)] = 0 \quad (11)$$

اگر افق زمانی نامحدود باشد، این شرط در حالت حدی برقرار خواهد بود:

$$\lim_{T \rightarrow \infty} \lambda(T) \leq 0, \quad \lim_{T \rightarrow \infty} \lambda(T)[E_\infty - E(T)] = 0$$

جهت ساده‌سازی معادله‌های دیفرانسیل و سهولت حل مدل، شرط دوم همیلتونی در e^{-bt} ضرب شده و سپس از دو طرف تساوی، انتگرال معین از S تا T گرفته می‌شود. بنابراین خواهیم داشت:

$$\begin{aligned} \lambda' - \lambda b &= e^{-rt}U'(\phi)g'(E) \xrightarrow{\times e^{-bt}} (\lambda' - \lambda b)e^{-bt} = \frac{d}{dt}[\lambda e^{-bt}] = e^{-(b+r)t}U'(\phi)g'(E) \\ \xrightarrow{\int_S^T} \lambda(T)e^{-bT} - \lambda(S)e^{-bS} &= \int_S^T e^{-(b+r)t}U'(\phi)g'(E) dt \end{aligned} \quad (12)$$

اگر در شرط تراگردی، مقدار انتشار نهایی برابر با حداکثر مقدار مجاز خود نشود، آنگاه قیمت سایه‌ای ناشی از انتشار (λ) صفر خواهد بود $(\lambda(T) = 0 \leq E(\hat{T}) \neq E_T)$. با این فرض و ضرب رابطه (۱۲) در $e^{(b+r)S}$ ، ارزش جاری قیمت سایه‌ای (m)، برابر است با:

$$\xrightarrow{\times e^{(b+r)S}} m(s) = - \int_S^T e^{-(b+r)(t-s)}U'(\phi)g'(E) dt \quad (13)$$

شرط تراگردی بیانگر این است که قیمت سایه‌ای ناشی از انتشار غیر مثبت است، بنابراین ارزش جاری این متغیر (m) نیز غیر مثبت خواهد بود. قدر مطلق m هزینه انتشار آلودگی را نشان می‌دهد.

^۱. Costate

^۲. Shadow Price

^۳. Current Value

جهت پرهیز از پیچیدگی معادله‌های دیفرانسیلی، مجموعه‌ای از فروض ساده‌کننده در نظر گرفته می‌شود: فرض می‌شود تابع $f(C)$ و تابع $g(E)$ در مدل به ترتیب مقعر و محدب هستند و همچنین تابع مطلوبیت خطی است. بنابراین فروض، شرایط همیلتونی برای بهینه‌سازی مدل نه تنها لازم بلکه کافی نیز خواهد بود (لامبرت، ۱۹۸۵). با توجه به فرض خطی بودن تابع $U(\phi) = U(f(C) - g(E))$ ، بدون از دست دادن کلیت مسئله، مشتق مرتبه اول مطلوبیت برابر $U'(\phi) = 1$ در نظر گرفته می‌شود. بنابراین، شرایط مرتبه اول ذکر شده در روابط (۷) تا (۹) پس از جایگذاری m و استفاده از فرض $U'(\phi) = 1$ ، معادله‌های دیفرانسیلی زیر را نتیجه خواهد داد:

$$f'(C) = -ma = a \int_s^T e^{-(b+r)(t-s)} g'(E) dt \quad (14)$$

$$g'(E) + m(b+r) = m' \quad (15)$$

$$E' = aC - bE \quad (16)$$

۳-۳- وضعیت پایدار

مطلوبیت بین دوره‌ای در شرایط پایدار حداکثر است و ویژگی وضعیت یا مکان پایدار این است که تغییر متغیرهای کلیدی مدل در آن صفر باشد. به منظور استخراج شرایط لازم جهت قرار گرفتن در وضعیت پایدار^۱، تغییرات متغیرهای وضعیت و هم‌وضعیت در طی زمان صفر قرار داده می‌شود.

پس از ادغام سیستم معادلات دیفرانسیلی ۱۴، ۱۵ و ۱۶ و اعمال شرط پایداری، ضابطه دو منحنی زیر حاصل خواهد شد:

$$f' \left(\frac{E'+bE}{a} \right) = -ma \xrightarrow{E'=0} m = \frac{-f' \left(\frac{bE}{a} \right)}{a} \quad (17)$$

$$g'(E) = m' - (b+r)m \xrightarrow{m'=0} m = \frac{-g'(E)}{b+r} \quad (18)$$

تقاطع حاصل از دو منحنی به دست آمده، فضای دو بعدی $(E-m)$ را به ۴ ناحیه تقسیم می‌کند. نقطه تقاطع، همان نقطه بهینه (نقطه تعادلی پایدار) در شرایط وضعیت پایدار (پایا) است که رشد متغیرها در آن صفر است.

^۱. Steady State

معادله‌های دیفرانسیلی (۱۷) و (۱۸)، علامت E', m' را در وضعیت ناپایدار ($E' \neq 0, m' \neq 0$) تعیین می‌کنند و به این وسیله مسیر حرکت متغیرها در زمان در هر ناحیه مشخص می‌شود. در بخش‌های بعد به تعیین این مسیرها پرداخته می‌شود.

۳-۴- حل مدل با استفاده از تابع مطلوبیت ریسک‌گریز

به منظور حل عددی مدل، از تابع مطلوبیت با خاصیت ریسک‌گریزی نسبی ثابت (CRRA) که حالت خاصی از توابع با خاصیت ریسک‌گریزی مطلق هذلولی^۱ یا HARA است و به خاطر انعطاف‌پذیری‌شان از پرکاربردترین توابع مطلوبیت هستند، استفاده شده است. از آنجا که به منظور استخراج وضعیت پایدار بهینه با یک نرخ مثبت، لازم است تا کشش مطلوبیت نهایی مصرف طی زمان ثابت باشد، از این نوع تابع مطلوبیت استفاده می‌شود (بارو و سالایی مارتین^۲، ۲۰۰۴). فرم کلی این گونه توابع به صورت زیر است:

$$U(C) = \begin{cases} \frac{[C(t)]^{1-\theta}-1}{1-\theta} & \theta > 0, \theta \neq 1 \\ \ln(C) & \theta = 1 \end{cases} \quad (19)$$

با توجه به این که ضریب نسبی ریسک‌گریزی^۳ این نوع توابع، ثابت و برابر θ است ($\frac{-C U''(C)}{U'(C)} = \theta > 0$)، تصمیم‌گیری از طریق این توابع تحت تأثیر مقیاس قرار نمی‌گیرد و این قابلیت، این توابع را به پرکاربردترین توابع در این حوزه تبدیل کرده است (ارو و همکاران^۴، ۱۹۹۶). بنابر آنچه شرح داده شد، برای نمایش مطلوبیت حاصل از مصرف، تابع مطلوبیت مورد نظر با ضریب مثبت و برای نمایش عدم مطلوبیت ناشی از انتشار، این تابع مطلوبیت با ضریب منفی وارد مدل می‌شود. برای در نظر گرفتن اثر انتشار بر تابع مطلوبیت، ضریب α از تابع عدم مطلوبیت انتشار با تابع مطلوبیت مصرف جمع می‌شود:

$$U[C(t), E(t)] = \frac{[C(t)]^{1-\theta}-1}{1-\theta} - \alpha \frac{[E(t)]^{1+\varepsilon}-1}{1+\varepsilon} \quad \theta, \varepsilon, \alpha > 0 \quad (20)$$

^۱ Hyperbolic Absolute Risk Aversion

^۲ Barro and Sala-i-Martin (2004)

^۳ Relative Risk Aversion

^۴ Arrow (1996)

در این تابع، پارامتر α نشان‌دهنده اثر انتشار بر مطلوبیت و پارامتر θ بیانگر معکوس کشش بین دوره‌ای مصرف است. θ ، ترجیحات مصرف‌کننده را در مصرف بین زمانی نشان می‌دهد و پارامتر ε ، وزن انتشار در تابع مطلوبیت را نمایش می‌دهد و معرف میزان آگاهی محیط زیستی مصرف‌کنندگان است. فرم همیلتونی مسئله، شرایط مرتبه اول و شرط تراگردی با توجه به رابطه (۲۰)، برقرار می‌شود:

$$H = e^{-rt} \left[\frac{[C(t)]^{1-\theta}-1}{1-\theta} - \alpha \frac{[E(t)]^{1+\varepsilon}-1}{1+\varepsilon} \right] + \lambda(aC - bE) \quad (21)$$

$$\frac{\partial H}{\partial C} = 0 \Rightarrow [C(t)]^{-\theta} = -m \quad (22)$$

$$\frac{\partial H}{\partial E} = -\lambda' \Rightarrow \alpha[E(t)]^\varepsilon + m(b+r) = m' \quad (23)$$

$$\frac{\partial H}{\partial \lambda} = E' \Rightarrow E' = aC - bE \quad (24)$$

شرط تراگردی این تابع مطلوبیت به همان شکل که در مدل کلی بیان شد، برقرار خواهد بود. در این تابع با افزایش مصرف، مطلوبیت افزایش و با افزایش انتشار مطلوبیت کاهش می‌یابد و تابع مطلوبیت نسبت به مصرف و انتشار اکیداً مقعر است. با این توضیحات، شرایط (۲۵) برای تابع مطلوبیت برقرار است:

$$U = U[C, E] \quad (U_C > 0, U_E < 0; U_{CC} < 0, U_{EE} < 0) \quad (25)$$

از آنجا که قید اول مسئله خطی است، طبق قضیه منگازارین^۱، شرایط همیلتونی برای بهینگی جواب، لازم و کافی است (لامبرت، ۱۹۸۵).

۳-۴-۱- وضعیت پایدار با تابع مطلوبیت ریسک‌گریز

پس از ادغام و خطی‌سازی سیستم معادله‌های منتج شده از شرایط همیلتونی، روابط متغیرهای کلیدی مدل به دست آمده و سپس به منظور یافتن نقطه بهینه در وضعیت پایدار، تغییرات متغیرهای وضعیت و هم‌وضعیت در طول زمان برابر صفر قرار داده می‌شود.

^۱ اگر تابع مطلوبیت در C, E مقعر و تابع محدودیت در C, E خطی باشد، آنگاه شرایط همیلتونی (۲۲) تا (۲۴) برای بهینه‌سازی مدل لازم و کافی است.

با گرفتن لگاریتم طبیعی از شرط اول همیلتونی و جایگذاری شرط سوم همیلتونی در رابطه حاصل و اعمال شرط پایداری ($E' = 0$) بر آن، ضابطه یک منحنی در نمودار دو بعدی ($E-m$) بدست می‌آید که بیانگر یک تابع اکیداً صعودی است:

$$\begin{aligned} [C(t)]^{-\theta} &= -ma \xrightarrow{\ln} \\ -\theta \ln C &= \ln(-ma) \xrightarrow{\text{جایگذاری}} \ln m = -\ln(-a) - \theta \ln\left(\frac{E' + bE}{a}\right) \xrightarrow{E'=0} \\ m &= \left(\frac{-1}{a}\right) \left(\frac{bE}{a}\right)^{-\theta} \end{aligned} \quad (26)$$

پس از اعمال شرط پایداری روی متغیر هم‌وضعیت ($m' = 0$) با استفاده از شرط دوم همیلتونی، یک ضابطه منحنی اکیداً نزولی حاصل می‌شود:

$$\alpha[E(t)]^\varepsilon + m(b+r) = m' \xrightarrow{m'=0} m = -\frac{\alpha[E(t)]^\varepsilon}{b+r} \quad (27)$$

۳-۴-۲- تعیین جهت متغیرها در هر ناحیه از نمودار فازی

در این بخش، با توجه به رشد مثبت یا منفی متغیرها در هر یک از چهار ناحیه نمودار فازی^۱ (۱)، جهت حرکت متغیرها در طی زمان با استفاده از ضابطه منحنی‌های (۲۶) و (۲۷) و همچنین فرم کلی منحنی بدون اعمال شرط پایداری تعیین می‌شود. در ادامه روند حرکتی متغیر وضعیت در طول زمان در قسمت بالا و پایین منحنی $E' = 0$ مشخص می‌شود:

$$E' = 0 \Rightarrow m = \left(\frac{-1}{a}\right) \left(\frac{bE}{a}\right)^{-\theta} \xrightarrow{\text{در بالای } E'=0} m > \left(\frac{-1}{a}\right) \left(\frac{bE}{a}\right)^{-\theta} \Rightarrow -ma < \left(\frac{bE}{a}\right)^{-\theta}$$

طبق فرم کلی منحنی $\left(\frac{E'+bE}{a}\right)^{-\theta} = -ma$ برآمده از شرط اول و سوم همیلتونی و خاصیت اکیداً نزولی بودن تابع $\left(\frac{bE}{a}\right)^{-\theta}$ ؛ در قسمت بالای منحنی رشد پایدار ($E' = 0$)، انتشار با زمان افزایش می‌یابد.

^۱. Phase Diagram

$$\Rightarrow \left(\frac{E'+bE}{a}\right)^{-\theta} < \left(\frac{bE}{a}\right)^{-\theta} \Rightarrow \frac{E'+bE}{a} > \frac{bE}{a} \Rightarrow E' > 0 \quad (28)$$

با استدلالی مشابه در قسمت پایین منحنی رشد پایدار ($E' = 0$)، انتشار با افزایش زمان رو به کاهش می‌رود.

روابط (۲۹) و (۳۰)، روند حرکتی متغیر m (هزینه انتشار آلودگی با علامت منفی) را با زمان، در قسمت بالا و پایین منحنی رشد پایدار ارزش جاری متغیر هم‌وضعیت ($m' = 0$) نشان می‌دهند:

$$m' = 0 \Rightarrow m = \frac{-\alpha[E(t)]^\varepsilon}{b+r} \xrightarrow{\text{در بالای } m'=0} m > \frac{-\alpha[E(t)]^\varepsilon}{b+r} \quad (29)$$

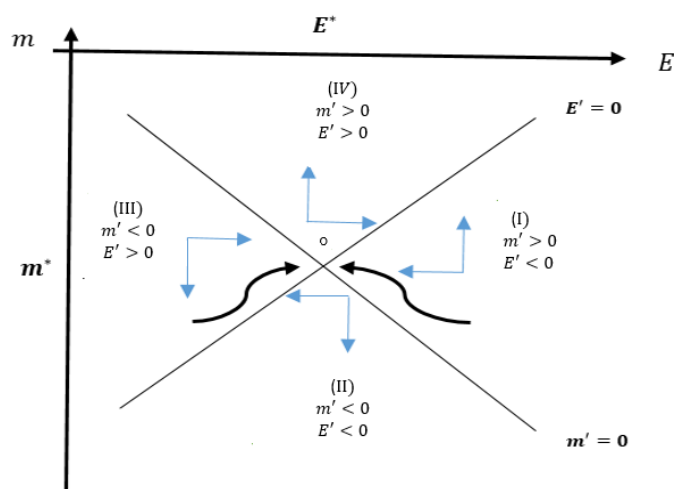
با توجه به معادله $\frac{m'-\alpha[E(t)]^\varepsilon}{b+r} = m$ از شرط سوم همیلتونی و رابطه (۲۹)، در بالای منحنی $m' = 0$ ، هزینه آلودگی روند کاهشی خواهد داشت.

$$\frac{m'-\alpha[E(t)]^\varepsilon}{b+r} > \frac{-\alpha[E(t)]^\varepsilon}{b+r} \Rightarrow m' > 0$$

به طور مشابه در پایین منحنی $m' < 0 \leq m' = 0$.

۳-۴-۳- نمودار فازی

شمای کلی نمودار فازی مسئله و منحنی‌های به دست آمده در شرایط پایدار، نقطه بهینه متغیرها یا مکان پایدار، جهت حرکت متغیرها طی زمان در هر ناحیه و مسیرهای بهینه امکان‌پذیر به سمت نقطه پایا در نمودار (۱) نمایش داده شده است. بر منحنی‌های $E' = 0$ و $m' = 0$ به ترتیب انتشار و هزینه انتشار آلودگی با گذر زمان ثابت خواهد بود.



نمودار ۱: نمودار فازی

منبع: محاسبات تحقیق

لازم به ذکر است که وضعیت پایدار مورد نظر (نقطه O در نمودار ۱) در کلیه زمان‌ها ایده‌آل نیست و با توجه به فرضیات اولیه مدل، واقعیت‌های بازار پویا و داده‌های به روز شده، همواره نیازمند تعدیل است.

۳-۴-۱- تجزیه و تحلیل نمودار فازی

نمودار فازی از چهار ناحیه تشکیل شده است که در هر کدام از این نواحی، متغیرها در وضعیت باثبات (پایدار) قرار ندارند و در طی زمان رشد مثبت یا منفی خواهند داشت. در هر یک از چهار ناحیه مذکور کشورها با درجه توسعه‌یافتگی مختلف قرار می‌گیرند و نحوه عملکرد آن‌ها تعیین‌کننده حرکت در جهت یا خلاف جهت نقطه پایدار است. سیاست‌های محیط زیستی داخلی، رشد اقتصادی و ملاحظات محیط زیستی در تولید و مصرف، تعیین‌کننده جهت و سرعت حرکت به سمت تعادل پایدار و بهینه است.

با توجه به نمودار فازی مشخص می‌شود که تنها در صورت قرار گرفتن در نواحی یک و سه امکان حرکت به سمت نقطه تعادلی پایدار وجود دارد، در دو ناحیه دوم و چهارم حرکت در خلاف جهت پایداری و نقطه بهینه است.

در ناحیه اول، انتشار آلودگی در طی زمان رو به کاهش است و هزینه آلودگی نیز روند کاهشی را نشان می‌دهد. این ناحیه از نمودار تعیین‌کننده موقعیت کشورهایی است که در شاخه نزولی منحنی محیط زیستی کوزنتس قرار دارند. در این ناحیه کشورهای پیشرفته جای دارند که دارای رشد اقتصادی بالا (GDP) هستند و همراه با افزایش تولید ناخالص داخلی، اقدامات عملی در جهت کاهش انتشار آلودگی را انجام می‌دهند. روشن است که این کشورها با سطوح بالای توسعه اقتصادی، دارای منابع بیشتری برای اختصاص به کنترل آلودگی و مدیریت محیط زیست هستند؛ بنابراین با اقداماتی همچون استفاده از فناوری پاک‌تر و به کارگیری قوانین مالیاتی صحیح، سعی در کاهش انتشار و حرکت به سمت نقطه پایدار دارند که به این ترتیب هزینه‌های کنترل آلودگی نیز کاهش می‌یابد. در این ناحیه اگر اولویت اول کشورها کنترل و مدیریت آلودگی باشد و بیش از حد بهینه در صدد کاهش انتشار باشند، از مسیر بهینه^۱ دور شده و هزینه‌های کنترل آلودگی افزایش می‌یابد، به گونه‌ای که در حالت حدی موقعیت کشور به ناحیه دوم نمودار میل می‌کند. ناحیه سوم موقعیت کشورهای در حال توسعه را نشان می‌دهد که اولویت اول آن‌ها توسعه اقتصادی و افزایش GDP است، طبیعی است که این فرآیند منجر به افزایش انتشار گازهای گلخانه‌ای می‌شود، این کشورها به منظور حرکت به سمت مسیر پایدار و نقطه بهینه، باید هزینه‌های کنترل آلودگی را بپذیرند. تأکید بیش از حد بهینه بر رشد GDP و استخراج بی‌رویه منابع به منظور تولید و عدم استفاده از فناوری‌های سازگار با استانداردهای محیط زیستی و به دنبال آن افزایش مصرف و رشد تولید، باعث کاهش کیفیت محیط زیست شده و در حالت حدی موقعیت آن کشور به ناحیه چهارم نمودار انتقال می‌یابد. در این ناحیه انتشار گازهای گلخانه‌ای همواره افزایش می‌یابد و با توجه به عدم تخصیص منابع برای کنترل آلودگی و حفاظت از محیط زیست، حرکت در جهت خلاف مسیر پایداری است.

۳-۴-۴- حل الگوی بهینه‌یابی پویا

به منظور حل مدل در ابتدا باید پارامترهای الگوی طراحی شده رابطه (۳۰) کالیبره شوند. همان‌طور که بیان شد هدف حداکثر کردن ارزش فعلی مطلوبیت اجتماعی در افق زمانی $[0, T]$ است. فرض می‌شود که عمر مصرف‌کننده نامحدود است، بنابراین مقدار بی‌نهایت برای T در نظر گرفته می‌شود. در ادامه به کالیبره کردن شش پارامتر $b, a, \alpha, \varepsilon, \theta, \gamma$ پرداخته می‌شود:

^۱. Time Path

$$\text{Max} \int_0^{\infty} e^{-rt} \left[\frac{[C(t)]^{1-\theta}-1}{1-\theta} - \alpha \frac{[E(t)]^{1+\varepsilon}-1}{1+\varepsilon} \right] dt \quad (30)$$

$$\text{st: } \begin{aligned} E' &= aC - bE \\ E(0) &\geq 0, E(t) \leq E_{\infty}, 0 \leq t < \infty \end{aligned}$$

نرخ تنزیل (r): شدت تخریب محیط زیست نیز به عنوان یک منبع اقتصادی در صورت وجود رجحان زمانی بیشتر خواهد بود. اگر نرخ تنزیل در صفر تثبیت شود، برنامه‌ریز اجتماعی برای همه مقاطع زمانی و نسل‌ها ارزشی کاملاً برابر قائل است، در این حالت توجه به مسئله توسعه پایدار و صرفه‌جویی در مصرف منابع محیط زیستی حداکثر شده و تخریب محیط زیست و انتشار به حداقل مقدار خود کاهش می‌یابد. مقاله‌های متعددی به برآورد نرخ ترجیح زمانی پرداختند، در این مطالعه بر اساس پژوهش دین‌محمدی (۱۳۸۷) مقدار ۰/۰۱ برای نرخ تنزیل در نظر گرفته شده است.

معکوس کشش بین دوره‌ای مصرف (θ): در تابع مطلوبیت CRRA پارامتری برای مصرف در نظر گرفته می‌شود که به آن معکوس کشش جانشینی بین دوره‌ای مصرف گفته می‌شود و نشان‌دهنده ترجیحات مصرف‌کننده در مصرف بین زمانی است. طبق برآوردهای انجام شده توسط کریم‌زاده و همکاران (۱۳۹۱)، این مقدار برابر ۰/۳۱ در نظر گرفته شده است.

ضریب آلایندگی مصرف (a): پارامتر a ضریب آلایندگی مصرف نامیده می‌شود و مبین این مطلب است که با هر افزایش در مصرف، انتشار افزایش پیدا می‌کند. برای مشخص کردن این پارامتر میانگین انتشار سرانه دی‌اکسید کربن در دوره ۱۳۹۰-۱۳۵۳ که برابر ۴/۸۸ تن متریک است، بر میانگین مصرف سرانه در این دوره به مقدار ۱۱/۷۴ میلیون ریال تقسیم شده و مقدار این نسبت (که برابر ۰/۴۱ تن متریک بر میلیون ریال است)، طبق مقاله اورچیا و تسیوره^۱ (۲۰۱۱) به عنوان مقدار a در نظر گرفته می‌شود.

وزن انتشار در تابع مطلوبیت (ε): این پارامتر بیانگر وزن انتشار در تابع مطلوبیت و معرف میزان آگاهی محیط زیستی مصرف‌کنندگان است و هر چه مقدار آن بیشتر باشد، مصرف‌کنندگان

¹. Orecchia and Tessitore

اهمیت بیشتری برای محیط زیست قائل‌اند. طبق برآوردهای انجام شده توسط سامپائولسی^۱ (۲۰۰۳)، این مقدار برابر ۰/۲ در نظر گرفته شده است.

پارامتر اثر انتشار بر مطلوبیت (α): این ضریب بیانگر نسبتی است که دو قسمت تفکیک‌پذیر تابع مطلوبیت را به یکدیگر مرتبط می‌سازد و نشان‌دهنده اهمیت هر کدام از این دو قسمت در تابع مطلوبیت است. به طور معمول این ضریب در متون اقتصادی برابر ۱ در نظر گرفته می‌شود. به این معنی که وزن اهمیت هر دو قسمت تابع مطلوبیت به یک اندازه است.

نرخ پاک‌سازی طبیعی محیط زیست (b): به منظور مقدار دهی پارامتر b، با استفاده از مقادیر بقیه پارامترهای کالیبره شده، برای این پارامتر سناریوسازی انجام داده و پس از بررسی اثر تغییرات آن روی رفاه، مقداری از b بارفاه مثبت به عنوان مقدار پایه در نظر گرفته می‌شود. سناریوها و روند تغییرات رفاه به منظور یافتن مقدار مطلوب b، در بخش سناریوهای مختلف برای نرخ پاک‌سازی محیط زیست (b) نمایش داده شده است. بر اساس محاسبات انجام شده، مقدار ۰/۴۲ به عنوان مقدار پایه b در نظر گرفته می‌شود و بر اساس این مقدار، خروجی بهینه تعیین می‌شود. مقادیر پارامترها و توصیف هر کدام در جدول ۱ نمایش داده شده است:

جدول ۱: جدول کالیبراسیون (مقادیر و توصیف پارامترها)

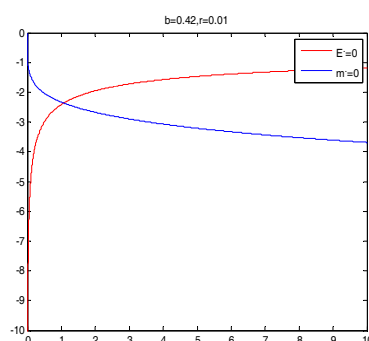
پارامتر	توصیف	مقدار	منبع
	معکوس کشش بین دوره‌ای مصرف	۰/۳۱	کریم‌زاده و همکاران (۱۳۹۱)
	نرخ تنزیل	۰/۰۱	دین محمدی (۱۳۸۷)
	پارامتر اثر انتشار بر مطلوبیت	۱	هافکس ^۲ (۱۹۹۵)
	نرخ پاک‌سازی طبیعی محیط زیست	۰/۴۲	سناریوسازی ($0 \leq b < 1$)
	وزن انتشار در تابع مطلوبیت	۰/۲	سامپائولسی (۲۰۰۳)
	ضریب آلاینده‌گی مصرف	۰/۴۱ (تن متریک میلیون ریال)	محاسبات تحقیق

^۱. Sampaollesi

^۲. Hafkes

۳-۴-۵- خروجی بهینه

پس از کالیبراسیون مدل، مجموعه‌ای از معادله‌های دیفرانسیلی به دست آمده از شرایط همیلتونی به منظور بهینه‌یابی الگو در یک دستگاه با استفاده از نرم‌افزار متلب حل شده و نقطه بهینه متغیرهای کلیدی مدل یعنی مصرف (میلیون ریال در سال)، انتشار (تن متریک در سال)، هزینه انتشار آلودگی (میلیون ریال در سال) و ارزش فعلی حداکثر رفاه به دست می‌آید:



$$m = -۲/۳۶۲۴$$

$$E = ۱/۰.۸۱۹$$

$$C = ۱/۱۰.۸۳$$

$$\text{Max} = ۲/۳۹۹۳$$

نمودار ۲: نمودار فازی در سناریوی پایه

۳-۴-۶- وضعیت موجود ایران و مقایسه آن با نقطه پایدار

در این بخش وضعیت موجود اقتصاد ایران با نقطه بهینه (پایا) حاصل از مدل کالیبره شده در این پژوهش، مورد مقایسه قرار گرفته است. برای این منظور از داده‌های سال ۱۳۹۰ استفاده شده است. مقدار مصرف سرانه کل به قیمت ثابت سال ۱۳۸۳ در سال ۱۳۹۰ برابر ۱۵/۵۰ میلیون ریال و مقدار انتشار سرانه گاز دی اکسید کربن برابر ۷/۸۰ تن متریک است. با مقایسه مقادیر مصرف و انتشار وضع موجود با مقدار بهینه مشاهده می‌شود که هر دو مقدار مصرف و انتشار از مقدار بهینه بالاتر است، بنابراین ایران باید در یکی از سه ناحیه یک، دو یا چهار نمودار فازی قرار گرفته باشد. ناحیه اول نمودار جایگاه کشورهای پیشرفته و صنعتی شده است و روند سیاستی آن‌ها به گونه‌ای است که پس از رسیدن به مقدار مشخصی از تولید (رشد اقتصادی)، درصد کنترل آلودگی ناشی از انتشار و پاک‌سازی آن برآمده، به نحوی که پس از این مقدار مشخص با افزایش تولید، انتشار و هزینه کنترل ناشی از آن کاهش می‌یابد (قسمت نزولی منحنی U وارون کوزنتس). در ناحیه دوم نمودار، اولویت کشورها کنترل آلودگی است و بنابراین بیش از حد نیاز، به این مقوله می‌پردازند.

با توجه به شواهد و وضعیت فعلی ایران، ایران نمی‌تواند در هیچ یک از این دو ناحیه قرار گیرد. بدین ترتیب، ایران در ناحیه چهارم نمودار فازی جای گرفته است و با توجه به شرح روند حرکتی کشورها در این ناحیه، انتشار گاز گلخانه‌ای همواره فراتر از هزینه‌ای که برای کنترل آن صرف می‌شود، رشد می‌کند که دلیل عمده آن را می‌توان در مصرف‌گرایی و تولید و مصرف ناپایدار جستجو کرد. بنابراین ایران در حال دور شدن از نقطه تعادلی پایدار است.

۳-۴-۷- تحلیل حساسیت

در روش کالیبراسیون به منظور بررسی اثر تغییر پارامترها بر نتایج نهایی، با دادن مقادیر متفاوت به پارامترهای مدل، سناریوهای مختلفی در مورد مقادیر بهینه متغیرها مورد بررسی قرار می‌گیرد. تغییر پارامترها باعث انتقال مکان هندسی منحنی‌ها در فضای فازی می‌شود. به عنوان مثال در مشخص‌ترین تجزیه و تحلیل اقتصادی، از انتقال منحنی عرضه و تقاضا، تغییر در قیمت‌ها و کمیت‌های تعادلی نتیجه می‌شود. در این قسمت سناریوهای مختلفی برای پارامترهای ضریب آلاینده‌ی مصرف، نرخ پاک‌سازی طبیعی محیط زیست، وزن انتشار در تابع مطلوبیت و اثر انتشار بر مطلوبیت طراحی و اجرا می‌شود. تحلیل تغییرات ایجاد شده در نتایج پژوهش می‌تواند در تدوین توصیه‌های سیاستی از جمله چگونگی افزایش رفاه اجتماعی مفید باشد.

✓ سناریوهای مختلف برای نرخ پاک‌سازی محیط زیست (b):

در جدول ۲، تغییرات پارامتر b بررسی می‌شود:

جدول ۲: نتایج حاصل از سناریوهای مختلف برای نرخ پاک‌سازی طبیعی محیط زیست

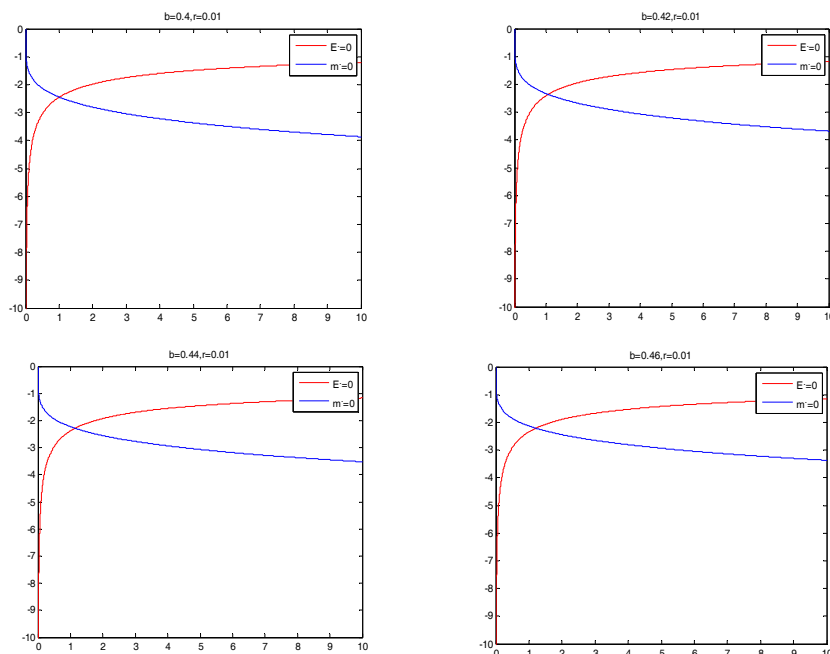
سناریوی چهارم	سناریوی سوم	سناریوی دوم (پایه)	سناریوی اول	متغیر یا پارامتر
۰/۴۶	۰/۴۴	۰/۴۲	۰/۴	b
۱/۳۶۷۴	۱/۲۳۳۹	۱/۱۰۸۳	۰/۹۹۰۳	
۱/۲۱۸۷	۱/۱۴۹۸	۱/۰۸۱۹	۱/۰۱۵۱۲	
-۲/۲۱۳۵	-۲/۲۸۵۱	-۲/۳۶۲۴	-۲/۴۴۶۳	
۱۲/۵۹۵۸	۷/۴۲۵۴	۲/۳۹۹۳	-۲/۴۷۹۶	حداکثر رفاه (Max)

منبع: محاسبات تحقیق

با توجه به نتایج جدول ۲، در مقدار ۰/۴۲ از پارامتر b، حداکثر رفاه، مثبت می‌شود. بنابراین این مقدار در سناریوی پایه برای تعیین نقطه بهینه پایدار استفاده شده و ملاحظه می‌شود که افزایش b،

باعث کاهش هزینه کنترل آلودگی در حالت بهینه می‌شود و به دنبال آن میزان مصرف، انتشار و حداکثر رفاه اجتماعی در سال پایه افزایش می‌یابد.

نمودار ۳، انتقال مکان هندسی منحنی‌ها و تغییر نقطه بهینه را در هر سناریو برای پارامتر b نشان می‌دهد:



نمودار ۳: نمودارهای فازی حاصل از سناریوسازی b

✓ سناریوهای مختلف برای اثر انتشار بر مطلوبیت (α):

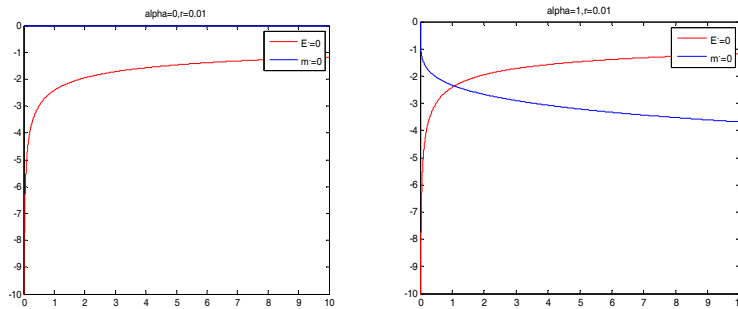
در این الگو در سناریوی پایه به منظور بررسی اثر انتشار آلودگی بر مطلوبیت، ضریب α برابر ۱ در نظر گرفته می‌شود تا ملاحظات محیط زیستی در مدل لحاظ شود. در حالت عدم توجه به ملاحظات محیط زیستی، تحت سناریویی مقدار پارامتر α ، صفر در نظر گرفته شده و تغییرات در جدول ۳ نمایش داده شده است:

جدول ۳: نتایج حاصل از سناریوهای مختلف برای پارامتر اثر انتشار بر مطلوبیت

پارامتر	سناریوی اول (بدون ملاحظات محیط زیستی)	سناریوی دوم (با ملاحظات محیط زیستی)
	۰	۱
	بی‌نهایت	۱/۱۰۸۳
	بی‌نهایت	۱/۰۸۱۹
	۰	-۲/۳۶۲۴
حداکثر رفاه (Max)	***	۲/۳۹۹۳

منبع: محاسبات تحقیق

بدون لحاظ کردن اثر انتشار در تابع مطلوبیت، همان‌طور که در جدول ۳ نمایش داده شده، میزان مصرف و انتشار نامحدود و مقدار هزینه کنترل آلودگی صفر است، زیرا با این سناریو فرض شده است که مصرف، انتشاری به دنبال ندارد. نمودار ۴ انتقال مکان هندسی منحنی‌ها و تغییر نقطه بهینه را در هر سناریو برای پارامتر α نشان می‌دهد:



نمودار ۴: نمودارهای فازی حاصل از سناریوسازی α

✓ سناریوهای مختلف برای ضریب آلاینده‌ی مصرف (a):

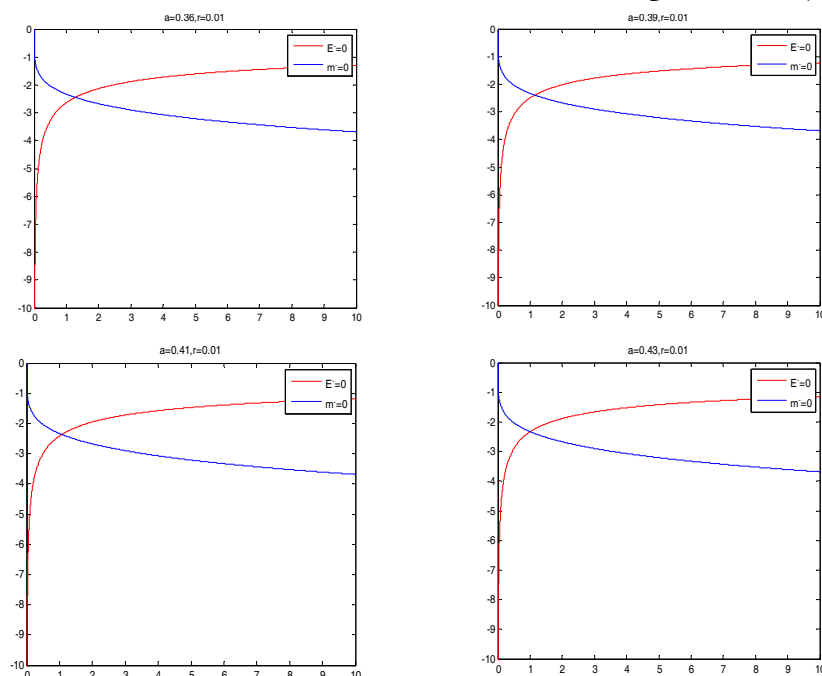
نتایج حاصل از سناریوسازی ضریب آلاینده‌ی مصرف در جدول (۴) نمایش داده شده است:

جدول ۴: نتایج حاصل از سناریوهای مختلف ضریب آلاینده‌ی مصرف

متغیر یا پارامتر	سناریوی اول	سناریوی دوم	سناریوی سوم	سناریوی چهارم
a	۰/۳۶	۰/۳۹	۰/۴۱	۰/۴۳
	۱/۵۰۵۰	۱/۲۴۶۷	۱/۱۰۸۳	۰/۹۹۰۸
	۱/۲۹	۱/۱۵۷۶	۱/۰۸۱۹	۱/۰۱۴۴
	-۲/۴۴۷۱	-۲/۳۹۴۶	-۲/۳۶۲۴	-۲/۳۳۲۲
ماکزیم رفاه (Max)	۱۷/۴۴۳۷	۷/۸۱۲۰	۲/۳۹۹۳	-۲/۳۶۲۴

منبع: محاسبات تحقیق

با افزایش ضریب آلایندگی مصرف، مقدار مصرف و به دنبال آن انتشار و هزینه کنترل آلودگی در حالت بهینه و در سال پایه کاهش یافته است و حداکثر رفاه اجتماعی در نقطه بهینه روند کاهشی را نشان می‌دهد. نمودار ۵ انتقال مکان هندسی منحنی‌ها و تغییر نقطه بهینه را در هر سناریو برای پارامتر α نشان می‌دهد:



نمودار ۵: نمودارهای فازی حاصل از سناریوسازی α

✓ سناریوهای مختلف برای وزن انتشار در تابع مطلوبیت (E):

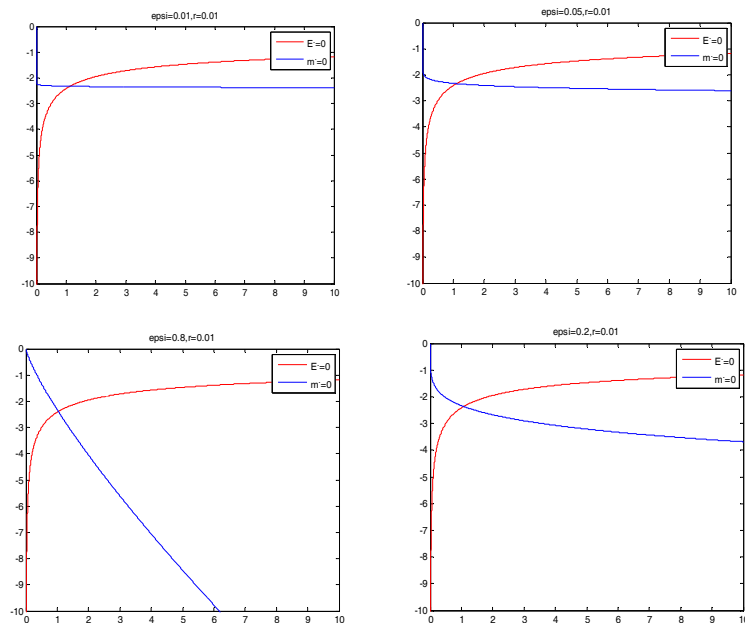
نتایج حاصل از سناریوسازی برای وزن انتشار در تابع مطلوبیت در جدول ۵ ارائه شده است:

جدول ۵: نتایج حاصل از سناریوهای مختلف وزن انتشار در تابع مطلوبیت

متغیر یا پارامتر	سناریوی اول	سناریوی دوم	سناریوی سوم	سناریوی چهارم
	۰/۰۱	۰/۰۵	۰/۲	۰/۸
	۱/۱۶۱۳	۱/۱۴۵۲	۱/۱۰۸۳	۱/۰۶۲۱
	۱/۱۳۳۷	۱/۱۱۸۰	۱/۰۸۱۹	۱/۰۳۶۸
	-۲/۳۲۸۵	-۲/۳۳۸۵	-۲/۳۶۲۴	-۲/۳۹۳۸
ماکزیمم رفاه (Max)	۲/۳۷۹۰	۲/۳۸۵۲	۲/۳۹۹۳	۲/۴۱۶۴

منبع: محاسبات تحقیق

با توجه به نتایج جدول، مشخص است که افزایش ε یا آگاهی عمومی در مورد مسائل محیط زیستی، هزینه کنترل آلودگی یا پاک‌سازی محیط زیست را افزایش داده، مصرف و به دنبال آن انتشار در حالت بهینه کاهش یافته و در نهایت حداکثر رفاه اجتماعی افزایش یافته است. نمودار ۶ انتقال مکان هندسی منحنی‌ها و تغییر نقطه بهینه را در هر سناریو برای پارامتر ε نشان می‌دهد:



نمودار ۶: نمودارهای فازی حاصل از سناریوسازی ε

۴- نتیجه‌گیری و بحث

این پژوهش با موضوع بررسی اثر مصرف بر توسعه پایدار، به کالیبراسیون یک مدل بهینه‌یابی پویا پرداخته و جایگاه فعلی ایران را در مسیر توسعه پایدار، از طریق قیاس وضعیت موجود با وضعیت تعادلی پایا تعیین می‌کند. پس از بهینه‌سازی مدل به روش اصل حداکثر پونتری‌اگین، مقادیر بهینه مصرف، انتشار و هزینه آلودگی برای کنترل این انتشار در سال پایه به ترتیب برابر $1/1083$ میلیون ریال، $1/0819$ تن متریک و $2/3624$ میلیون ریال حاصل شده است. با مقایسه وضعیت موجود ایران با این مقادیر بهینه، ایران در ناحیه چهارم نمودار فازی قرار می‌گیرد؛ در این ناحیه انتشار ناشی از تولید و مصرف ناپایدار همواره در حال رشد است و هزینه اختصاص‌یافته برای کنترل این آلودگی ناشی از انتشار، کمتر از مقدار بهینه است. علت این امر آن است که در ایران

سرمایه‌گذاری لازم و تلاش ضروری برای کنترل انتشار در مواجهه با مصرف بالا انجام نشده و رفتار دوستانه با محیط زیست فرهنگ‌سازی نشده است.

قرار گرفتن ایران در مسیر پایدار نیازمند آن است که میزان انتشار با به‌کارگیری سیاست‌های کنترلی مناسب کاهش یابد تا هزینه‌های کنترلی آن نیز کاهش یابد. کاهش مصرف تا نقطه بهینه و تولید و مصرف مطابق با الگوهای پایدار و به‌کارگیری فن‌آوری سازگار با محیط زیست در رأس این سیاست‌ها قرار دارند. کاهش نرخ تنزیل، تمایل به مصرف در زمان حال را کاهش می‌دهد و این امر منجر به کاهش استفاده بی‌رویه از منابع، انتشار و تخریب سریع محیط زیست می‌شود و ارزش فعلی رفاه اجتماعی را افزایش می‌دهد. ترجیح زمانی بالا از بی‌صبری بالا حکایت دارد و بی‌صبری، اسراف در مصرف حال را افزایش می‌دهد. عقلانیت می‌تواند به عنوان یک عامل تأثیرگذار بر ارجحیت زمانی شناخته شود؛ افزایش ضریب عقلانیت در افراد، افزایش دید بلندمدت آن‌ها، اهمیت بیشتر به پایداری، ضرورت استفاده بهینه از منابع و کاهش نرخ ترجیح زمانی را نتیجه می‌دهد. نتایج سناریوها در پژوهش حاکی از آن است که افزایش ضریب آلاینده‌گی مصرف، ارزش فعلی رفاه اجتماعی را کاهش می‌دهد. بنابراین برای افزایش مطلوبیت حاصل از مصرف، باید این ضریب را از طریق افزایش مصرف پاک‌تر و سازگارتر با محیط زیست (پایدار) نسبت به مصرف آلاینده‌تر (ناپایدار) کاهش داد. به منظور تغییر الگوهای نادرست مصرف به عنوان امری غیر قابل اجتناب، کنترل‌های سخت‌گیرانه نهادهای قانون‌گذار و مقررات محیط زیستی برای بهبود وضعیت پیشنهاد می‌شود. افزایش پارامتر ε یا آگاهی‌های محیط زیستی مصرف‌کنندگان باعث کاهش انتشار و افزایش حداکثر رفاه می‌شود، افزایش این پارامتر باعث می‌شود که دولت‌ها سعی در انجام اقداماتی در جهت هدایت فن‌آوری جامعه به سمت فن‌آوری‌های سبز می‌کنند که این علاوه بر افزایش آگاهی محیط زیستی نیازمند افزایش درآمد و درجه توسعه‌یافتگی کشورها است.

منابع و مأخذ

الف) منابع و مأخذ فارسی

۱. ارباب، حمیدرضا. و عباسی‌فر، زهره (۱۳۹۱). "بررسی رابطه آلودگی آب و رشد اقتصادی در کشورهای در حال توسعه و توسعه‌یافته". فصلنامه اقتصاد محیط زیست و انرژی ۱(۳): ۱-۱۷.
۲. اسلام‌لوئیان، کریم. هراتی، جواد. و استادزاد، علی حسین (۱۳۹۲). "بررسی ارتباط پویای محصول و آلودگی در چارچوب یک الگوی رشد: آزمون فرضیه زیست محیطی کوزنتس برای اقتصاد ایران". فصلنامه اقتصاد انرژی ایران ۲(۷): ۱۹۷-۱۷۱.
۳. پژوهشگران، جمشید. و لشکری‌زاده، مریم (۱۳۸۹). "بررسی عوامل اثرگذار بر رابطه میان رشد اقتصادی و کیفیت محیط زیست". فصلنامه پژوهش‌های اقتصادی ایران ۴(۴۲): ۱۸۸-۱۶۹.
۴. دین محمدی، مصطفی (۱۳۸۷). ارائه الگویی برای تخصیص بهینه منابع گاز طبیعی، رساله دکتری، دانشکده علوم اداری و اقتصاد دانشگاه اصفهان.
۵. فتحی سارانی، سعید (۱۳۹۳). تحلیل اقتصادی ایران با استفاده از نظریه ادوار اقتصادی واقعی، پایان‌نامه کارشناسی ارشد رشته علوم اقتصادی، دانشکده مدیریت، اقتصاد و حسابداری، دانشگاه یزد.
۶. کریم‌زاده، مصطفی. نصراللهی، خدیجه. صمدی، سعید. و دلالی اصفهانی، رحیم (۱۳۹۱). "مسیر بهینه سرمایه‌گذاری مصرف و تولید ناخالص ملی، کاربرد الگوی رمزی تعمیم‌یافته در اقتصاد ایران". فصلنامه پژوهش‌های اقتصادی (رشد و توسعه پایدار) ۱۲(۴): ۲۵-۱.
۷. نصراللهی، زهرا. و غفاری، مرضیه (۱۳۸۸). "توسعه اقتصادی و آلودگی محیط زیست در کشورهای عضو پیمان کیوتو و کشورهای آسیای جنوب غربی (با تأکید بر منحنی زیست محیطی کوزنتس)". پژوهشنامه علوم اقتصادی ۹(۲): ۱۲۶-۱۰۵.

ب) منابع و مأخذ لاتین

1. Adrangi, B., Dhanda, K. K., & Hill, R. P. (2004). "A Model of Consumption and Environmental Degradation: Making the Case for Sustainable Consumer Behavior". Journal of Human Development 5(3): 417-432.
2. Arrow, K., Bolin, B., Costanza, R., Dasgupta, P., Folke, C., Holling, C. S. & Pimentel, D. (1996). "Economic Growth, Carrying Capacity, and the Environment". Environment and Development Economics 1(01): 104-110.

3. Barro, R. and Sala-i-Martin, X. (2004). *Economic Growth*, MIT Press.
4. Costantini, V. and Monni, S. (2008). "Environment, Human Development and Economic Growth". *Ecological Economics* **64**: 867-880.
5. Forster, B. A. (1973). "Optimal Consumption Planning in a Polluted Environment". *Economic Record* **49**(4): 534-545.
6. Hofkes, M. W. (1994). "Sustainable Development in an Economy-Ecology Integrated Model". Vrije Universiteit/ Tinbergen Institute, November. *Series Research Memoranda* :1-25.
7. Lambert, P. (1985). *Advanced Mathematics for Economists Static and Dynamic Optimization*, Blackwell.
8. Nazzal, D., Batarseh, O., Patzner, J., and Martin, D. R. (2013). "Product Servicing for Lifespan Extension and Sustainable Consumption: An Optimization Approach". *International Journal of Production Economics* **142**(1): 105-114.
9. Orecchia, C., & Tessitore, M. E. (2011). "Economic Growth and the Environment with Clean and Dirty Consumption". *Fondazione Eni Enrico Mattei NOTA DI LAVORO*: 1-23
10. Ropke, I. (2005). "Consumption in Ecological Economics". *Online Encyclopaedia of Ecological Economics*.
11. Sampaolesi, A. (2003). "Environmental Policies and Trade under Non-Competitive Markets". *Privredna Izgradnja* **46**(1-2): 3-11.
12. Shone, R. (2002). *Economic Dynamics: Phase Diagrams and their Economic Application*, Cambridge University Press.
13. Sudarkodi, K. (2009). "Achieving Sustainable Consumption for Sustainable Development: Issues and Solutions". *Munich Personal RePEc Archive* No.15455: 1-10.
14. Soyatas, U., Sari, R. and Ewing, B. T. (2007). "Energy Consumption, Income, and Carbon Emissions in the United States". *Ecological Economics* **62**(3): 482-489.
15. Stokey, N. L. (1998). "Are there Limits to Growth? ". *International Economic Review* **39**(1): 1-31.
16. Wilk, R. (2002). "Consumption, Human Needs, and Global Environmental Change". *Global Environmental Change* **12**(1): 5-13.