فصلنامه علمی مطالعات اقتصادیِ کاربردی ایران
سال هشتم، شماره‌ی ۲۹، بهار ۱۳۹۸
صفحات: ۹۷-۱۲۱
DOI: 10.22084/aes.2017.12714.2372

ارائه الگوی کارایی انرژی در اقتصاد ایران با استفاده از رویکرد بهینه‌یابی پویا

بهرام فتحی[1*]
مهدی خداپرست مشهدی[2]
مسعود همایونی‌فر[3]
حسین سجادی‌فر[4]

تاریخ دریافت:۱۳۹۶/۰۶/۲۰ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۰۸/۱۶

چکیده

این مقاله براساس روش بهینه‌سازی به‌منظور بررسی مسأله کارایی انرژی در کشور ایران در نظر گرفته شده است. هدف اصلی این تحقیق، طراحی الگویی مناسب برای تعیین مقدار بهینه مصرف انرژی و موجودی سرمایه با استفاده از تابع کارایی انرژی و مدل تعمیم‌یافته سولو است، که حداکثر کارایی انرژی را تضمین می‌نماید. در این راستا، ابتدا مصرف انرژی و موجودی سرمایه در مکانیسم تابع کارایی انرژی در نظر گرفته شده است. سپس الگوی موردنظر طی دوره زمانی ۱۳۹۳-۱۳۸۷ در یک مسأله کنترل بهینه طراحی گردیده است. در نهایت مقادیر بهینه مصرف انرژی و موجودی سرمایه تعیین گردیده است. نتایج قابل‌توجه نشان‌دهنده مقادیر بهینه پایدار مصرف انرژی و موجودی سرمایه در اقتصاد ایران است. براساس حل عددی ملاحظه می‌شود، شکاف بین مقادیر بهینه با مقادیر تحقق یافته وجود دارد، و این نشان‌دهنده این است که در کشور ایران سطح مصرف انرژی از مقادیر بهینه بیشتر است. همچنین با توجه به افزایش شدت انرژی در سال‌های اخیر در کشور برای رسیدن به یک سطح مطلوب و کارآمد کارایی انرژی می‌بایست مصرف انرژی کاهش یابد.

کلید واژه‌ها: کارایی انرژی، مصرف بهینه انرژی، موجودی سرمایه، اقتصاد ایران.

طبقه‌بندی JEL: O53, J24, C61, C14.

۱. دانشجوی دکتری اقتصاد دانشگاه فردوسی مشهد(*نویسنده مسئول) **Email:** bahram125fathi@gmail.com
۲. دانشیار گروه اقتصاد دانشگاه فردوسی مشهد **Email:** m_khodaparast@um.ac.ir
۳.دانشیار گروه اقتصاد دانشگاه فردوسی مشهد **Email:** homayounifar@um.ac.ir
۴. دکتری علوم اقتصادی، واحد شهریار، دانشگاه آزاد اسلامی، شهریار، ایران **Email:** h.sajadifar@gmail.com

۱. مقدمه

استفاده از انرژی در تمام مراحل تولید لازم و ضروری است و بدون مصرف انرژی امکان تولید وجود ندارد. الگوهای رشد اقتصادی که نقش انرژی را بر رشد اقتصادی نادیده گرفته‌اند، کامل نیستند. بسیاری از تحقیقات در مورد انرژی و رشد اقتصادی، چگونگی تأثیر رشد اقتصادی بر روی مصرف انرژی را بیان می‌کنند و تأثیر انرژی بر رشد محصول کمتر مورد بررسی قرار گرفته است (تومن، ۲۰۰۳: ۹۳ و اگیون، ۲۰۰۹: ۲)[1]. از آنجا که انجام هر فعالیت اقتصادی مستلزم مصرف انرژی است، لذا از یک طرف انرژی به منزله عامل محرک رشد اقتصادی و بهبود کیفیت زندگی انسان تلقی می‌شود و از سوی دیگر، موجب تولید آلاینده‌های زیست‌محیطی می‌گردد (مدیسون[2]، ۲۰۰۱: ۶۸). بنابراین انرژی به‌عنوان یکی از اصلی‌ترین عوامل برای شکل گیری و پیشرفت جوامع صنعتی شناخته شده است. به‌طوری‌که میزان دسترسی کشورها به منابع گوناگون انرژی نشانگر پیشرفت و قدرت سیاسی اقتصادی آنان می‌باشد. قیمت بالای انرژی و هزینه‌های بسیار زیاد بخش سرمایه‌ای آن از یک‌طرف و رشد بی پروای صنعتی شدن جوامع و نیاز روزافزون آنها به انرژی از طرف دیگر، کشورها را بر آن داشته است که برای جلوگیری از مصرف بی‌رویه و غیر بهینه انرژی و همچنین کاهش هزینه‌های تولید و افزایش رفاه عمومی، سیاست‌هایی را تحت عنوان بهینه‌سازی مصرف انرژی، به مرحله اجرا در آورند. بنابراین با توجه به اهمیت فراوان انرژی و کاهش منابع انرژی فسیلی و افزایش قیمت آن در زمینه‌های تولید و خدمات و هم چنین مسائل زیست‌محیطی، بهبود وضعیت مصرف و کارایی هر چه بیشتر در استفاده از آن توجه زیادی می‌شود. بهبود کارایی انرژی به‌طور گسترده به‌عنوان یکی از راه‌های مقرون به صرفه برای افزایش امنیت انرژی، بهبود رقابت صنعتی و کاهش تغییرات آب و هوایی در نظر گرفته شده است. همچنین با افزایش رشد جمعیت، وابستگی به انرژی و به طبع آن رشد مصرف انرژی فسیلی که موجب افزایش مشکلات زیست‌محیطی می‌شود، لزوم تعامل بیشتر سیاستمداران با کارشناسان و صاحب‌نظران در راستای تدوین و اجرای سیاست‌های افزایش کارایی و کاهش میزان مصرف انرژی نمود بیشتری پیدا می‌کند. در بسیاری از کشورهای در حال توسعه مصرف انرژی با رشد اقتصادی و بهبود استانداردهای زندگی روبه افزایش است، و از طرفی مصرف انرژی به‌دلیل کمبود منابع نمی‌تواند به‌طور نا محدود افزایش یابد. در عین حال نیز مسأله امنیت انرژی و مشکلات زیست‌محیطی نیز وجود دارد. از طرف دیگر بهره‌برداری انرژی معمولاً نیاز به سرمایه‌گذاری کلان دارد که آن هم در کشورهای در حال توسعه کمیاب است. مصرف انرژی برزگ ترین عامل ایجاد گازهای گلخانه‌ای و مشکلات زیست‌محیطی است (ساری و سویتاس[3]، ۲۰۰۹: ۱۶۶۹). با توجه به فشارهای وارده بر محیط زیست در روند رشد و توسعه اقتصادی، مطالعه در خصوص مصرف انرژی به شکل‌های کارایی انرژی، شدت انرژی و بهره‌وری انرژی

1. Toman and Aghion
2. Maddison
3. Sari and Soytas

در چند دهه اخیر افزایش یافته است (هو و وانگ[1]، ۲۰۰۶: ۳۲۰۸). کارایی انرژی یکی از اهداف مربوط به استانداردهای بین المللی است. از این‌رو بهبود کارایی انرژی یکی از مهمترین اهداف برای سیاست انرژی به ویژه برای کشورهایی که وابستگی زیادی به واردات انرژی دارند (فتحی، ۱۳۹۶: ۸۶). درنتیجه افزایش کارایی در انرژی یک راه حل مناسب برای استفاده بهینه از منابع انرژی کمیاب، کاهش شدت انرژی و رفع معضل کاهش گازهای گلخانه‌ای و زیست‌محیطی است. ساختار مقاله به‌صورت زیر می‌باشد: پس از مقدمه، به ادبیات نظری در زمینه کارایی، کارایی انرژی پرداخته می‌شود. در قسمت سوم مقاله مطالعات تجربی، در قسمت چهارم روش تحقیق مربوط به بهینه‌سازی کارایی، در قسمت پنجم نتایج تجربی و در نهایت نتیجه‌گیری مطرح می‌شود.

۲. ادبیات نظری

به‌طور معمول کارایی در ارتباط با نحوه تخصیص بهینه منابع کمیاب توسط بنگاه برای نیل به اهداف تولید است. کارایی تولیدی یک بنگاه با توجه به رابطه بین مقادیر بهینه و مقادیر مشاهده شده آن تعیین می گردد. زمانی‌که صحبت از کارایی یک بنگاه به میان می آید معمولاً به معنای موفقیت آن بنگاه در رسیدن به حداکثر ستانده با سطح معین نهاده است (فارل[2]، ۱۹۵۷: ۲۷۱). کارایی مفهومی نسبی است و برای سنجش کارایی، باید عملکرد بنگاه موردنظر با کارایی در شرایط بالقوه تولید مقایسه شود تا مشخص شود که کارایی بنگاه‌ها و واحدهای تولیدی از اندازه مورد انتظار و ایده‌آل تا چه حد فاصله دارد (مهرگان، ۱۳۸۷: ۱۳۶). تقاضای انرژی از تقاضا برای خدمات انرژی مشتق می‌شود، خانوارها و بنگاه‌ها انرژی، سرمایه و نیروی کار را ترکیب می‌کنند تا کالای مرکب خدمات انرژی را تولید کنند. بنابراین خدمات انرژی نیاز به فرآیند تولید دارد و می‌توان تابع تولید وابسته آن را تعریف کرد. معمولاً بهبود سطح کارایی انرژی، عبارت است از کاهش مصرف انرژی به پایین‌تر از سطحی که در آن بدون هرگونه بهبودی، مصرف انرژی صورت گیرد (سورل[3]، ۲۰۰۹). تعریف رایج فنی کارایی انرژی براساس علم ترمودینامیک است. در مقابل اقتصاددانان از یک تعریف ترکیبی استفاده می‌کنند. آنها نسبت یک متغیر پولی را بر یک ورودی انرژی (که با معیار ترمودینامیک محاسبه شده)، کارایی انرژی می‌نامند (هانتینگون[4]، ۱۹۹۶: ۱۱). براساس باتاچاریا[5] (۲۰۱۱) تعریف ساده کارایی انرژی به شرح زیر است:

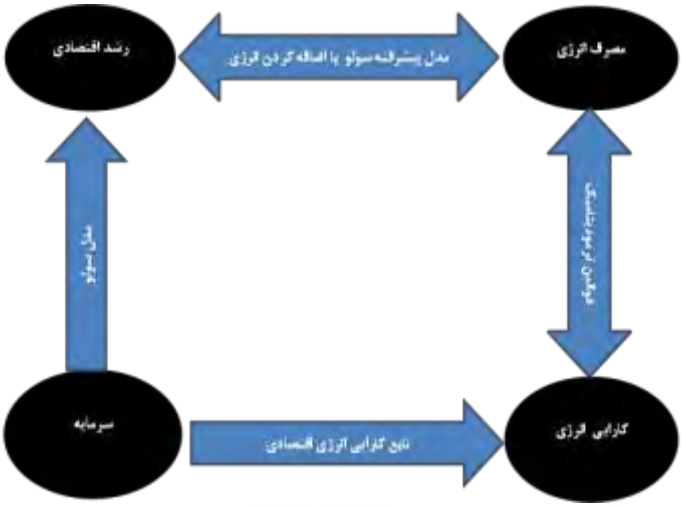
$$\text{کارایی انرژی} = \frac{\text{محصول مفید فرایند}}{\text{نهاده فرایند}}$$

1. Hu and Wang
2. Farrell
3. Sorrell
4. Huntingtun
5. Bhattacharyya

علاوه‌بر این پاترسون[1] (۱۹۹۶)، روش‌های دیگری که می‌تواند خروجی و ورودی این نسبت را اندازه‌گیری کرد با روش‌هایی نظیر (ترمودینامیکی، شاخص ترکیبی فیزیکی- ترمودینامیکی، شاخص اقتصادی و شاخص اقتصادی- ترمودینامیکی) بیان کرده است. غالباً از روش چهارم برای محاسبه کارایی انرژی استفاده می‌شود و این نسبت همان معکوس شاخص شدت انرژی است. کاهش در شدت انرژی به معنی کاهش در انرژی مورد نیاز برای تولید یک واحد از تولید ملی است. این اندازه گیری برای مقایسه‌های بین کشوری پیشنهاد می‌شود، چرا که تولید ناخالص ملی در یک واحد مشترک اندازه‌گیری می‌شود. علاوه بر این تولید ناخالص نشان‌دهنده بسیاری از فعالیت‌های متنوع است که تغییرات ساختاری می‌تواند موجب تغییرات تغییرات معناداری در نسبت تولید ناخالص داخلی به انرژی شود، این روش نمی‌تواند شاخص خوبی برای محاسبه کارایی انرژی در جایی‌که انرژی به‌عنوان خدمات نهایی استفاده می‌شود باشد. کارایی انرژی را می‌توان از سه بعد تعریف کرد. اولین تعریف از قوانین ترمودینامیک فیزیک نشأت می‌گیرد که به کارایی فنی اشاره دارد. تعریف دوم براساس مفاهیم اقتصادی و شدت انرژی است که نسبت ورودی انرژی به تولید کل محسوب می‌شود (گیاکان[2]، ۲۰۱۲: ۳۳۴). با این وجود این تعریف فقط انرژی را به‌عنوان یک ورودی منحصر به فرد بدون توجه به سایر عوامل مؤثر در تولید مانند سرمایه و نیروی کار در نظر می‌گیرد. استرن[3] (۲۰۱۲) کارایی انرژی اقتصادی را از طریق یک چارچوب با چند ورودی توسعه داده است. در این تعریف کارایی انرژی براساس اصل پارتو استوار است، و با سرمایه به‌عنوان یک ورودی دیگر مرتبط می‌باشد. در این تعریف هر اقتصادی دو ورودی برای تولید دارد، یکی انرژی و دیگری سرمایه می‌باشد. افراد باید از ترکیب ورودی‌ها برای رسیدن به خروجی مطلوب و رشد و سطح فن آوری استفاده کنند. بنابراین از نقطه‌نظر این بحث باید یک راه حل بهینه درباره ترکیب ورودی‌ها در توسعه وجود داشته باشد که می‌توان از آن به‌عنوان کارایی انرژی اقتصادی نام برد. همان‌گونه که در شکل (۱) نشان داده می‌شود کارایی انرژی با انرژی و سرمایه مرتبط است. بنابراین کارایی انرژی به‌عنوان تابعی از موجودی سرمایه و مصرف انرژی در نظر گرفته می‌شود.

پژوهشگاه علوم انسانی و مطالعات فرهنگی
پرتال جامع علوم انسانی

1. Patterson
2. Giacone
3. Stern



شکل ۱: مکانیسم کارایی انرژی و سایر متغیرهای اقتصادی

۳. مطالعات تجربی

بهینه‌یابی پویا در زمینه مسائل بهره برداری منابع از دهه ۱۹۷۰ میلادی توسط پیندایک انجام شده است، او در سال ۱۹۷۸ از یک مدل اساسی در زمینه جستجوی بهینه منابع تجدیدناپذیر استفاده کرد (پیندایک[1]، ۱۹۷۸: ۸۴۹) و در سال ۱۹۸۰ با اضافه کردن عامل عدم‌اطمینان به تحلیل بازار منابع فناپذیر آن را کامل کرد (پیندایک ،۱۹۸۰). هر دو مدل براساس تحلیل هزینه فایده استوار است. اساساً آنها مدل‌های عمومی محسوب می‌شوند و تنها روی بهینه‌سازی تولید تمرکز دارند، محدودیت آنها این است که کاهش انرژی در این مدل‌ها با رشد اقتصادی و سایر متغیرهای اقتصاد کلان مرتبط نشده است. برخی دیگر مثل (استیگلز[2]، ۱۹۷۴: ۱۲۵)، (گارگ و اسیونی[3]، ۱۹۷۸: ۴۴) و (داسگوپتا و هیل[4]، ۱۹۸۰: ۵۸) مسائل بررسی بهینه را در قالب یک چارچوب مدل رشد نئوکلاسیک آورده‌اند. آنها به‌خوبی درباره مسیر رشد توسعه پایدار بهینه آن هم در شرایطی که منابع همیشه کمیاب و روبه کاهش است بحث و بررسی کرده‌اند، و عناصر تکنولوژی در این مدل‌ها برون زا در نظر گرفته شده‌اند. این خود باعث بروز اختلاف نظرهای زیادی شده است. بعد از این‌که مدل درون‌زا توسط (رومر[5]، ۱۹۹۰: ۷۸) و (لوکاس[6]، ۱۹۸۸: ۱۶) عنوان شد تغییر تکنولوژی درون زا شد تا این‌که تحلیل‌های بلندمدت نیازمند امکان‌پذیر و منطقی‌شدن که این خود منتج به تحلیل‌های بیشتری می‌شد. اما با این وجود ادبیات مدل رشد درون‌زا

1. pindyck
2. Stiglits
3. Garg and Sweeney
4. Dasgupta and Heal
5. Romer
6. Lucas

به‌ندرت شامل مسائل مربوط به منابع طبیعی می‌باشد. آنها تا حدی منابع طبیعی را در زمینه عرضه فناناپذیر و همیشه در دسترس مدنظر قرار دادند. نویسندگان (پنگ[۱]، ۲۰۰۷: ۱۲۱) و (لی[۲]، ۲۰۱۲: ۵۵) درحالی‌که در تحقیق اخیرشان در زمینه مسائل مربوط به چین کار می‌کردند یک مدل رشد درون زا را با مد نظر قرار دادن منابع طبیعی به‌عنوان یک محدودیت توسعه دادند. در نهایت به یک مسیر بهینه جهت توسعه دست یافتند. اما آنها موارد مربوط به کارایی انرژی را مطرح نکردند. بخشی دیگر از ادبیات تحقیق مربوط به رابطه ارتباطات درونی بین انرژی و زیست‌محیطی است که از جنبه پویایِ آن قابل بررسی است. بارزترین نمونه، مدل فاستر است که در سال ۱۹۸۰ مطرح شد (فاستر[۳]، ۱۹۸۰: ۳۲۵). این مدل یک تابع مطلوبیت لحظه‌ای ایجاد کرد که از نقطه‌نظر اصل تئوری، مطلوبیت به سطح مصرف و آلودگی بستگی دارد. از آن‌جایی‌که آلودگی می‌تواند براساس مدل فاستر به کاربرد انرژی مربوط باشد، یک مسأله حداکثرسازی در ارتباط با انرژی را به‌عنوان کنترل می‌توان مطرح کرد. علاوه‌بر این (چنانگ[۴]، ۲۰۰: ۱۲۹) در زمینه کاربرد خط‌مشی خود آلودگی، از یک نمونه مدل بهینه مشابه استفاده کرده است. از این گذشته (کنرد[۵]، ۲۰۰۱: ۲۹) انرژی را با انتشار کربن مرتبط کرد و یک مسیر بهینه برای تخصیص منابع ایجاد کرد. این تحقیقات یک مسیری را در زمینه انرژی و محیط‌زیست ایجاد کرد و تا حدی برای محققین الهام بخش است. اما آنها هم در زمینه کارایی انرژی هیچ بحثی نکرده‌اند. آیرس و تورتن[۶] (۲۰۰۷) کارایی انرژی، پایداری و رشد اقتصادی را به‌صورت سیستماتیک با هم مرتبط کردند و تحلیل آنها به‌عنوان یک چارچوب نئوکلاسیک می‌باشد. اما با این وجود این مدل مسیرهایی را بدون در نظر گرفتن موارد پویا ارائه نمودند و این هم یک متغیر با جهت کنترلی محسوب نمی‌شود. مقالات مربوط به کارایی انرژی به جای ارائه یک چارچوب نظری و عمومی موارد تک‌به‌تک را مطرح می‌کنند. علاوه‌بر این بیشتر بحث‌ها در سطح تکنولوژی از تعاریف فنی و نه تعاریف اقتصادی کارایی استفاده می‌کنند. به‌عنوان مثال (جف و استیون[۷]،۱۹۹۴: ۸۰۷) یک مدل پنج بعدی از کاربرد انرژی بهینه برای تحلیل شکاف بین انرژی و کارایی بهره بردند. شکاف کارایی انرژی مربوط به بهبود بالقوه کارایی انرژی و یا تفاوت بین سطوح واقعی و بهینه مصرف انرژی است. برخی از اقتصاددانان کارایی انرژی را در کارخانجات تولیدی کوچک و متوسط بررسی کرده‌اند (بالاس[۸]، ۲۰۱۴: ۵۴۶). اخیراً در یک تحقیق این موضوع در سطح وسیعی مطرح شد. آنها عوامل و مسیر کارایی انرژی را در نه کشور مورد بررسی قرار دادند، اما در روش تحقیق شان از یک مدل رگرسیون کلاسیک به جای بهینه‌سازی پویا استفاده کرده‌اند

1. Peng
2. Li
3. Forster
4. Chiang
5. Conrad
6. Ayres and Turton
7. Jaffe and Stavins
8. Blass

(کیو[1]، ۲۰۱۴: ۱۰۲۸). یکی دیگر از تحقیقات کارایی انرژی در سطح کاربرد مدیریت و فناوری بدون ارجاع به بحث پویایی در حیطه تکنولوژی انجام شده است (برینان[2]، ۲۰۱۰: ۳۷۷). اگرچه استرن از مدل‌های بین المللی کارایی استفاده کرد اما او در کارش از مباحث توسعه بهینه پویا استفاده نکرد. بنابراین تحلیل تعمیم‌یافته مسیر توسعه بهینه انرژی از منظر اقتصاد الزامی است. همچنین در تحقیقات دیگری نیز کارایی انرژی مورد بررسی قرار گرفته است.

هالکوس و زرمیس[3] (۲۰۱۳) ارتباط بین مصرف انرژی تجدید پذیر وکارایی اقتصادی را با استفاده از برآورد گرهای شرطی تحلیل پوششی داده‌ها[4] همراه با رگرسیون‌های ناپارامتریک برای یک نمونه ۲۵ عددی از کشورهای اروپایی در سال ۲۰۱۰ مورد مطالعه قرار دادند. نتایج این مطالعه حاکی از اثر مثبت مصرف انرژی تجدیدپذیر بر کارایی اقتصادی کشورهای مورد بررسی در سطوح پایین مصرف انرژی است، درحالی‌که در سطوح بالاتر مصرف انرژی نتیجه مشخصی به‌دست نیامده است.

بوجنس و پاپلر[5] (۲۰۱۱) با بهره‌گیری از تجزیه‌وتحلیل همبستگی، تحلیل رگرسیون و تحلیل عاملی چند متغیره ۶ شاخص‌های ساختاری کارایی اقتصادی و شدت انرژی را به‌عنوان عوامل تعیین‌کننده توسعه پایدار اقتصادی برای ۳۳ کشور منتخب اروپایی درسال‌های ۲۰۰۳ و ۲۰۰۵ بررسی کردند. براساس نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که سیاست‌های مشوق تحقیق و توسعه، سرمایه‌گذاری در سرمایه انسانی و محصولات صادراتی تکنولوژی به سبب بهبود عملکرد کارایی اقتصادی و صرفه‌جویی انرژی و توسعه اقتصادی پایدار می‌شود. علاوه‌بر این، نتایج به‌دست آمده در این تحقیق به وضوح تأیید می‌کند که توسعه اقتصادی پایدار را می‌توان با ترکیبی از کارایی اقتصادی و در عین حال مصرف کارآمد انرژی به‌دست آورد.

فیلیپینی و هانت[6] (۲۰۱۲)، رابطه بین مصرف انرژی بخش خانگی ایالات متحده را با روش تابع مرزی تصادفی طی سال‌های ۲۰۰۷-۱۹۹۵ بررسی کردند. این پژوهش کارایی انرژی بخش خانگی را برای کل آمریکا و هم برای تک تک ایالت‌ها بررسی کرده است. همچنین رابطه عوامل تعیین‌کننده مصرف انرژی مانند درجه روزهای گرم و سرد، جمعیت، درآمد سرانه، قیمت واقعی حامل‌های انرژی، سهم خانه‌های ویلایی و همچنین بعد خانوار و ارتباط آنها با کارایی انرژی را بررسی کردند. این پژوهش نشان داد که شاخص شدت انرژی لزوماً نماگر مناسبی برای کارایی انرژی نیست.

استرن[7] (۲۰۱۲) به بررسی کارایی انرژی بین ۷۵ کشور طی یک دوره ۳۷ ساله پرداخت. وی در مقاله خود به‌وسیله تابع مرزی تصادفی و با استفاده از مدل داده‌های پانل تفاوت کارایی انرژی را بین

1. Cui
2. Brennan
3. Halkos and Tzeremes
4. Data Envelopment Analysis
5. Bojnec and Papler
6. Filippini & Hunt
7. Stern

کشورها بررسی کرد. با حداقل کردن مصرف انرژی به ازای هر واحد تولید، حد مرزی تولید را تعیین کرد و کارایی نسبی هر کشور که فاصله آن کشور از مرز داده شده، را به‌دست آورد. نتایج نشان داد که کارایی انرژی در کشورهایی که بهره‌وری عوامل بالاتر، پول کم ارزش‌تر و ذخایر سوخت کمتر دارند، بالاتر است. همچنین کارایی انرژی در طول زمان به سمت همگرایی بین کشورها حرکت می‌کند و در سطح جهانی عامل تکنولوژی مهم‌ترین عامل مقابله با افزایش مصرف انرژی است.

وانگ[1] و همکاران (۲۰۱۲) شاخص بهره‌وری کل عوامل تولید را برای مقایسه کارایی انرژی در صنایع ۳۰ استان چین در دوره ۲۰۰۹–۲۰۰۵ به کار گرفتند. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که امکان افزایش کارایی انرژی به خصوص در استان‌های غربی چین که مصرف انرژی بالایی دارند، وجود دارد. همچنین سرمایه‌گذاری ناکافی در فناوری و عدم‌دستیابی به بهترین مقیاس تولید، مهم‌ترین عوامل در عدم‌ارتقای کارایی انرژی این کشور شناخته شدند.

ژانگ[2] و همکاران (۲۰۱۰) کارایی انرژی را در ۲۳ کشور در حال توسعه طی دوره ۲۰۰۵–۱۹۸۰ به‌دست آوردند. نتایج نشان می‌دهد کشورهای مکزیک و پاناما بهترین عملکرد را در کارایی انرژی داشته‌اند. درحالی‌که کشورهای کنیا، سریلانکا، سوریه و فیلیپین کمترین عملکرد کارایی داشته‌اند. در بین کشورهای مذکور ۷ کشور تغییرات قابل‌توجهی نداشته‌اند و ۱۱ کشور کاهش مستمر کارایی کل عامل انرژی را تجربه کرده‌اند. کشور چین رشد سریع‌تری را داشته که با توجه به مطالعات صورت گرفته عامل اصلی آن سیاست‌های مؤثر به‌کار گرفته شده در سال‌های مورد مطالعه است.

هو و چانگ[3] (۲۰۰۹) با محاسبه کارایی انرژی در ایالت‌های چین به این نتیجه رسیدند که کارایی انرژی چین به‌طورکلی ۱/۴ درصد کاهش داشته، متوسط کارایی کل عامل انرژی سالانه ۰/۶ درصد افزایش و متوسط تغییرات تکنولوژیکی ۲ درصد کاهش داشته است. همچنین عوامل مؤثر در شاخص کارایی انرژی نیز شناسایی شدند. علاوه‌بر این منطقه شرق چین در مقایسه با منطقه غرب و مرکزی کارایی انرژی بالاتری داشته است.

هو و وانگ[4] (۲۰۰۶) کارایی انرژی را برای ۲۹ ناحیه در چین محاسبه کردند. آنها با استفاده از تحلیل پوششی داده‌ها نهاده انرژی را برای هر کدام از این نواحی در هریک از سال‌ها طی دوره ۲۰۰۲–۱۹۹۵ محاسبه کردند. سپس شاخص کارایی کل عامل انرژی را به‌صورت نسبت نهاده انرژی به میزان واقعی نهاده انرژی محاسبه نمودند. در این مطالعه با استفاده از مدل تحلیل پوششی داده‌ها نهاده‌ها شامل نیروی کار، ذخیره سرمایه، مصرف انرژی و تولید ناخالص داخلی به‌عنوان ستانده بوده است. رتبه‌بندی

1. Wang
2. Zhang
3. Hu and Chang
4. Hu and Wang

شاخص کارایی انرژی نشان می‌دهد که ناحیه مرکزی چین پایین‌ترین رتبه را داشته درحالی‌که بیش از نیمی‌از مصرف انرژی در این ناحیه صورت گرفته است.

جیمز[1] (۲۰۰۷) در مقاله‌ای به بررسی رابطه‌ی بین انتشار دی‌اکسیدکربن، مصرف انرژی و تولید ناخالص داخلی در فرانسه طی سال‌های ۲۰۰۰-۱۹۶۰ پرداخت. وی در این مقاله از روش‌های اقتصادسنجی تصحیح خطای برداری و الگوی خود رگرسیونی با وقفه‌های توزیعی استفاده کرد. وی نتیجه گرفت که در بلندمدت رابطه‌ی معنی‌داری بین متغیرها وجود دارد، ولی در کوتاه‌مدت این رابطه تنها بین مصرف انرژی و تولید بر قرار است.

فتحی و همکاران (۱۳۹۴) اندازه‌گیری کارایی زیست محیطی انرژی کشورهای منتخب را با استفاده از مدل‌های ناپارامتریک ایستا و پویا را بررسی کردند. در این تحقیق کارایی زیست محیطی انرژی از روش تحلیل پوششی داده‌ها استفاده شده است. انتشار دی‌اکسیدکربن به عنوان یک ستانده نامطلوب ضعیف در نظر گرفته می‌شود. نتایج حاکی از آن است که مصرف انرژی کشورهای در حال توسعه منتخب به میزان ۱۸/۱ درصد در سال از طریق بهبود کارایی انرژی کاهش می‌یابد. همچنین تجزیه و تحلیل کارایی پویا نشان می‌دهد که میانگین کارایی انرژی۲/۶ درصد در سال ۲۰۱۲ نسبت به سال پایه در کشورهای منتخب بهبود یافته است.

راسخی و سلمانی (۱۳۹۲) رابطه میان شدت انرژی و کارایی اقتصادی و مشخصاً وجود رابطه U برعکس میان این دو را برای مجموعه کشورهای منتخب طی بازه زمانی (۲۰۱۱-۱۹۹۱) مورد بررسی قرار دادند. نتایج مطالعه آن‌ها با استفاده از روش تحلیل پنجره‌ای پوششی داده‌ها نشان داد که با افزایش شدت انرژی تا حد آستانه کارایی اقتصادی افزایش می‌یابد، اما پس از آن نقطه افزایش شدت انرژی کاهش کارایی اقتصادی را به‌دنبال دارد، بنابراین برای کشورهای منتخب طی دوره موردنظر رابطه U برعکس بین شدت انرژی و کارایی اقتصادی تأیید می‌گردد.

شرزه‌ای و ابراهیم‌زادگان (۱۳۹۰) به برآورد «اثر بازگشت» افزایش کارایی انرژی بر مصرف خانوارهای ایرانی و انتشار دی اکسیدکربن پرداختند. نتایج مطالعه آن‌ها نشان داد که در همه سناریوها افزایش کارایی انرژی سبب افزایش مصرف برخی از کالاها و کاهش مصرف بقیه کالاها شده است. اثر بازگشت برآورد شده تقریباً ۹۸ درصد بوده که افزایش کارایی انرژی، به مقدار بسیار جزئی مصرف انرژی و انتشار دی‌اکسیدکربن را کاهش می‌دهد.

٤. روش‌شناسی

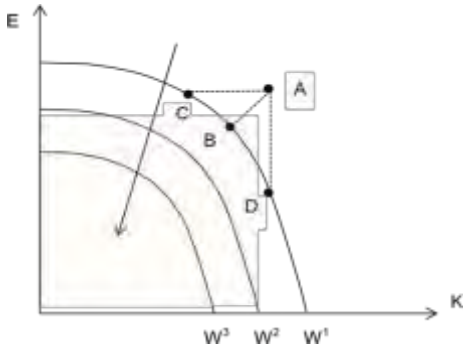
با توجه به مشکلات بهینه‌سازی کارایی انرژی به‌صورت کامل در این قسمت مدل کارایی انرژی با ارائه یک تعریف کمی‌آن هم بوسیله روش ریاضی و هندسی شروع می‌شود، سپس مدل سولو با در در نظر

1. James

گرفتن مصرف انرژی توسعه خواهد یافت. بعد انجام این اقدامات مسأله بهینه‌سازی به همراه برخی محدودیت‌ها مدل‌سازی می‌شود. همان‌طور که در شکل (۱) نشان داده شده است، کارایی انرژی با انرژی و سرمایه مرتبط است. بنابراین کارایی انرژی را می‌توان به‌عنوان تابعی از موجودی سرمایه و مصرف انرژی در نظر گرفت، که شکل ریاضی آن به‌صورت زیر است.

W=W (E, K)

در این رابطه کارایی انرژی با W، مصرف انرژی با E، و موجودی سرمایه با K نشان داده شده است. به‌طور بدیهی کارایی انرژی به مصرف انرژی بستگی دارد. برای هر سطحی از ورودی و برای هر سطحی از تکنولوژی هرچه بیشتر از انرژی استفاده شود، کارایی انرژی کمتر خواهد بود. دلایل گنجاندن سرمایه در این مدل را می‌توان از نقطه‌نظر انباره و روانه مطرح کرد. از آن‌جایی‌که موجودی سرمایه، سطح توسعه و تکنولوژی را تعیین می‌کند، این خود اساس و پایه توسعه کارایی انرژی است، از طرف دیگر سطح موجودی سرمایه با سرمایه‌گذاری ارتباط تنگاتنگی دارد، که محرک اصلی رشد اقتصادی و پیشرفت تکنولوژی در کشورهای در حال توسعه است. بنابراین سرمایه به‌صورت کامل با کارایی انرژی ارتباط دارد. در این مدل تکنولوژی به‌عنوان یک متغیر برون زا در نظر گرفته می‌شود و آن هم به‌وسیله سرمایه‌گذاری و سطح موجودی سرمایه نشان داده می‌شود. لذا با در نظر گرفتن انرژی و سرمایه به‌عنوان دو ورودی، کارایی انرژی تا حدی شبیه تابع تولید می‌باشد. از سوی دیگر سطوح معین کارایی انرژی را می‌توان مورد ارزیابی و با یکدیگر مقایسه کرد، که این مانند سایر روشهای استفاده شده در تئوری مطلوبیت رتبه‌ای است، که این تعریف نیز به‌صورت شکل هندسی (۲) نشان داده شده است. در این شکل سه منحنی، نشان‌دهنده سه سطح کارایی انرژی با ترکیب ورودی متفاوت سرمایه و انرژی در یک سطح خروجی یکسان می‌باشند. همه نقاط روی منحنی‌ها نشان‌دهنده وضعیت کارا می‌باشد. مسیر فلش به معنی افزایش کارایی انرژی است، به این معنا که هر چقدر سطح ورودی‌ها پایین‌تر باشد وضعیت کارایی بهتر است. با توجه به سطح تولید تحت تکنولوژی معین استفاده کمتر از ورودی‌ها به معنای یک سیستم اقتصادی با انرژی کارا است. لذا با در نظر داشتن توضیحات فوق رتبه بندی کارایی انرژی به این صورت $w^3 > w^2 > w^1$ خواهیم داشت، و در شکل شماره (۲) نیز نشان داده شده است، ملاحظه می‌شود این منحنی‌ها مقعر هستند، که آن هم بیشتر به‌دلیل کاهش نرخ نهایی جانشینی است و این همانند منحنی امکانات تولید است.



شکل ۲: کارایی اقتصادی انرژی

سه منحنی w_3,w_2,w_1 نشان‌دهنده سه سناریو می‌باشند که اقتصاد می‌تواند با آنها به بهترین سطح کارایی انرژی در مراحل مختلف توسعه برسد. فرض می‌کنیم بیشترین سطح مطلوب کارایی انرژی مستقیماً به سطح توسعه مرتبط است و اقتصاد همیشه در حال پیشرفت می‌باشد، به این معنا ظرفیتی که اقتصاد می‌تواند به بالاترین میزان کارایی انرژی در هر مرحله از توسعه برسد همیشه روبه افزایش است. یعنی این‌که در زمان t_1 بیشترین سطح مطلوب انرژی مربوط به منحنی w_1 است و به مرور زمان اقتصاد به یک سطح بالاتری از توسعه در زمان t_2 می‌رسد. همچنین می‌توان گفت که منحنی w_2 می‌تواند به سطح بالاتری از کارایی انرژی برسد. علت استفاده از این فرضیه‌ها این است که در بلندمدت بهترین کارایی انرژی به وسیله سطح موجودی سرمایه اقتصاد مشخص می‌شود، درحالی‌که موجودی سرمایه، کاربردهای تکنولوژی انرژی و انواع آن را مشخص می‌کند و براساس مدل رشد نئوکلاسیک سطح سرمایه همراه با رشد اقتصادی و پیشرفت در طول زمان افزایش می‌یابد. بنابراین کارایی انرژی با پیشرفت و سری زمانی مرتبط است. علت استفاده از این فرضیه‌ها این است که در بلندمدت بهترین کارایی انرژی به‌وسیله سطح موجودی سرمایه اقتصاد مشخص می‌شود، درحالی‌که موجودی سرمایه، کاربردهای تکنولوژی انرژی و انواع آن را مشخص می‌کند و براساس مدل رشد نئوکلاسیک سطح سرمایه همراه با رشد اقتصادی و پیشرفت در طول زمان افزایش می‌یابد. معادله تعیین کمیت سطح کارایی انرژی W به شکل زیر است:

$$W(K,E) = -E^2 - \alpha K \qquad (۱)$$

در این‌جا W سطح کارایی انرژی، K موجودی سرمایه و E مصرف انرژی است، آنها ورودی‌های معادله می‌باشند. در رابطه α یک پارامتر است. در رابطه فوق شکل درجه دو به این معنی است که سرمایه و انرژی به‌صورت شبه خطی انتخاب شده‌اند، یعنی بخشی از انرژی با سرمایه قابل جایگزینی است. از آن‌جایی‌که انرژی و سرمایه ورودی‌های یک اقتصاد می‌باشند، لذا اندازه‌گیری کارایی کلی به

صورت یک روش رتبه‌ای است. بنابراین با بهره‌گیری از رابطه مذکور در صورت استفاده کمتر از انرژی و سرمایه، کارایی افزایش خواهد یافت.

٤-١. گسترش مدل سولو

قانون دوم ترمودینامیک (قانون راندمان یا کارایی) بیان می‌دارد که حداقل مقداری انرژی برای انتقال ماده یا به‌طور عمومی‌تر، کار فیزیکی در فرآیند تولید لازم است. انجام انتقالات در زمان کمتر و محدودتر نیازمند انرژی بیشتر از این مقدار حداقل است، برای انجام تولید باید حتماً کار فیزیکی انجام شود. برای انجام کار فیزیکی نیز انرژی لازم است، بنابراین تمامی پروسه‌های اقتصادی نیازمند انرژی هستند. رابطه (۲) تابع تولید در این الگو را نشان می‌دهد.

$$Y = F(L, K, E) \qquad (۲)$$

که در این رابطه، L نیروی کار ، K انباشت سرمایه و E انرژی است. در این مطالعه، تابع تولید یک تابع تولید کاب داگلاس در نظر گرفته شده است که نهاده‌های تولید در این تابع به‌ترتیب نیروی کار (L)، موجودی سرمایه (K) و انرژی (E) است. دلیل استفاده از تابع کاب داگلاس برای اجتناب از پیچیدگی و حل معادلات و همچنین وجود پارامترهای تابع تولید کاب داگلاس در ایران است. همان‌طور که در قسمت‌های قبل اشاره شد افزایش کارایی انرژی با فرایند توسعه مرتبط است که این بخشی از مدل سولو می‌باشد. بنابراین برای مرتبط کردن انرژی با رشد و سرمایه، مدل رشد نئوکلاسیک باید توسعه یابد و قبل از هر بحث دیگری به خوبی باز تعریف شود. استرن[1] (۲۰۱۱) با در نظر گرفتن تکنولوژی به‌عنوان متغیر برون زا مدل سولو را توسعه داد و نقش انرژی در رشد اقتصادی را تعیین کرد. اما با این وجود مدل او آن‌قدر پیچیده است که نمی‌توان آن را از طریق ریاضی حل کرد. ما در این تحقیق شکلی ساده از این مدل توسعه‌یافته را ارائه می‌دهیم:

$$Y = (1-\gamma)K^{\beta}L^{1-\beta} + \gamma E, \qquad 0 < \gamma < 1, \qquad 0 < \beta < 1 \qquad (۳)$$

معادله (۳) نمونه‌ای از مدل سولو است براساس یک تابع کاب داگلاس با اضافه کردن انرژی (E)، در نظر گرفته شده است، کمیت $K^{\beta}L^{1-\beta}$ جزء مرسوم مدل سولو با سرمایه (K) و کار (L) است. پارامترها شامل β و γ می‌باشند، و پارامتر γ نشان‌دهنده اهمیت نسبی انرژی می‌باشد. علاوه‌بر این، می‌توان وضعیت سرمایه را با یک معادله سرمایه‌گذاری نشان داد.

$$\dot{K} = s(Y - E) - \delta K, \ 0 < s < 1, \ 0 < \delta < 1 \qquad (۴)$$

در این‌جا، $\dot{K}$ نرخ رشد موجودی سرمایه را نشان می‌دهد که به سرمایه‌گذاری اشاره دارد. پارامتر s نرخ پس‌انداز، و استهلاک سرمایه با نرخ ثابت δ نشان داده می‌شود. اصطلاح (Y-E) با مدل سولو

1. Stern

تفاوت دارد به این معنا که در شرایط محدودیت انرژی، انباشت سرمایه واقعی باید با مصرف انرژی تطبیق داده شود، در نتیجه رشد سریع سرمایه، متناسب تولید ناخالص با کاهش استهلاک موجودی سرمایه از سرمایه انباشت خالص است.

٤-۲. بهینه‌سازی کارایی انرژی

در یک اقتصاد در حال توسعه، درطول زمان می‌توان تمام سطوح کارایی انرژی را حداکثر کرد، با این فرض که سطوح مختلف کارایی انرژی در طول زمان افزایش می‌یابد. مدل حداکثرسازی کارایی انرژی با قیدهای رشد و انرژی به شرح زیر بیان شده است:

$$Max \int_0^T W(K,E)dt \qquad (۵)$$
$$s.t.\ \ Y = (1-\gamma)K^{\beta}L^{1-\beta} + \gamma E$$
$$\dot{K} = s(Y-E) - \delta K$$
$$K(0) = K_0 \quad K(T)Free$$

معادلات (۳) و (۴) دو قید، و معادله (۴) معادله وضعیت است. بر این اساس، سرمایه (K) متغیر حالت و انرژی (E) متغیر کنترل است. همان‌طور که در بالا ذکر شد، معنای اصلی تابع (۱) برای نشان درجه کارایی انرژی و برای مقایسه سطوح مختلف کارایی استفاده می‌شود. با استفاده از روابط بهینه‌سازی، مقادیر بهینه موجودی سرمایه و مصرف انرژی را می‌توان استخراج نمود. معادله (۵) نرخ تنزیل در مسأله کارایی انرژی را شامل نمی‌شود. همان‌طور که در بالا ذکر شد معنای اصلی تابع (۱) برای نشان دادن مرتبه کارایی انرژی و مقایسه سطوح مختلف کارایی است. بنابراین مفهوم کمی تنزیل را دارد. در رابطه با شرایط مرزی، مقدار اولیه متغیر حالت در سطح E_0 داده شده است. زمان T پایان دوره است و تا بی نهایت انعطاف دارد. با جایگذاری معادله (۳) در معادله (۴) و با جمع آنها به‌عنوان یک قید رابطه همیلتونی نشان داده می‌شود. با توجه به مباحث مطرح شده برای بهینه‌سازی کارایی انرژی در دوره T با توجه به محدودیت مشخص نشان داده شده است. برای حل مسائل کنترل بهینه با استفاده از حساب تغییرات برای به‌دست آوردن شرایط مرتبه اول ، به یک مسأله مقدار مرزی می‌رسیم که خود، شکل مشتقات همیلتونین را دارد. برای شرط لازم مسأله کنترل بهینه متغیر کنترل و حالت باید به‌گونه‌ای انتخاب شوند که همیلتونین را کمینه کند. بنابراین طبق شرایط انتقال پذیری همیلتونین خواهیم داشت.

$$\mu(0) = 0, \quad \mu(T) = 0 \qquad (۶)$$

همچنین سیستم همیلتونین و شرایط اولیه بهینه‌سازی مقید زیر را خواهیم داشت:

$$H = E^2 - \alpha K + \mu\left[s(1-\gamma)K^{\beta}L^{1-\beta} + \gamma E - E) - \delta K\right] \qquad (۷)$$
$$\frac{\partial H}{\partial E} = 0 \qquad (۸)$$

$$\mu^{\cdot} = -\frac{\partial H}{\partial E} \quad (۹)$$

$$K^{\cdot} = s(Y - E) - \delta K \quad (۱۰)$$

پس از روابط فوق در این بخش، از نمودار مرحله‌ای برای تحلیل حالت پایدار مسأله استفاده می‌شود. هدف بررسی این است که آیا امکان مسیر افزایش کارایی انرژی اقتصادی وجود دارد، لذا با فرض ثابت بودن نیروی کار برای حل نقطه حالت پایدار، می‌توان شرایط اولیه را را به‌صورت زیر بازنویسی کرد.

$$\frac{\partial H}{\partial E} = -2 + \mu\gamma - \mu = 0 \quad (۱۱)$$

$$\dot{\mu} = -\frac{\partial H}{\partial E} = \alpha - \mu\beta s(1-\gamma)\bar{L}^{\,1-\beta}K^{\beta-1} + \mu\delta \quad (۱۲)$$

$$\dot{K} = s\left[\left((1-\gamma)K^{\beta}L^{1-\beta} + \gamma E - E\right)\right] - \delta K = 0 \quad (۱۳)$$

از معادله ۱۱ خواهیم داشت:

$$E = \frac{\mu}{2}(\gamma - 1) \quad (۱۴)$$

و مشتق E نیز به‌صورت رابطه زیر به‌دست می‌آید.

$$\dot{E} = \frac{(\gamma-1)}{2}\dot{\mu} = \frac{(\gamma-1)}{2}\left[\alpha - \mu\beta s(1-\gamma)\bar{L}^{\,1-\beta}K^{\beta-1} + \mu\delta\right] = 0 \quad (۱۵)$$

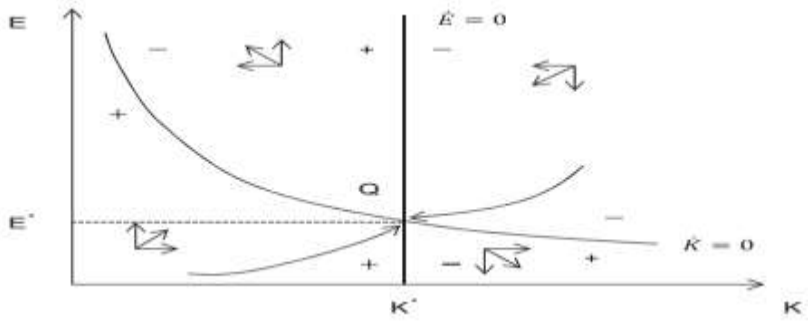
از معادله فوق K را به‌صورت رابطه زیر خواهیم داشت:

$$K = \left[\frac{\mu\beta s(1-\gamma)\bar{L}^{\,1-\beta}}{\alpha + \mu\delta}\right]^{\frac{1}{1-\beta}} \qquad \left(\dot{E} = 0\right) \quad (۱۶)$$

معادله (۱۶) برای منحنی $\left(\dot{E} = 0\right)$ است، که آن هم به پارامترها واندازه جمعیت بستگی دارد. البته این در فضای $(E - K)$ ثابت است همان‌طور که در شکل ۳ مشاهده می‌شود. با حل معادله ۱۳ می‌توان رابطه زیر را در نظر داشت:

$$E = \frac{\delta K}{(1-\gamma)} - \bar{L}^{\,1-\beta}K^{\beta} \qquad \left(K \doteq 0\right) \quad (۱۷)$$

معادله (۱۷) برای منحنی $\left(K \doteq 0\right)$ که در شکل ۳ نیز نشان داده شده است. نتیجه سیستم دیفرانسیل مصرف انرژی و موجودی سرمایه در فضای $(E - K)$ است.



$$\dot{E} = \frac{(\gamma-1)}{2}(\alpha+\mu\delta) - \frac{(\gamma-1)}{2}\mu\beta s(1-\gamma)\bar{L}^{\,1-\beta}K^{\beta-1} \qquad (۱۸)$$

$$\dot{K} = s(\gamma-1)E + s(\gamma-1)\bar{L}^{\,1-\beta}K^{\beta} - s\delta K \qquad (۱۹)$$

جهت حرکت به علامت مشتقات مصرف انرژی و موجودی سرمایه در نقاط ویژه بستگی دارد. بنابراین معادلات دیفرانسیل از رابطه ۱۸ و ۱۹ به شرح زیر است:

$$\frac{\partial \dot{E}}{\partial K} = (\beta-1)\frac{(\gamma-1)^2}{2}\mu\beta s\bar{L}^{\,1-\beta}K^{\beta-2} < 0 \qquad (۲۰)$$

$$\frac{\partial \dot{K}}{\partial E} = s(\gamma-1) < 0 \qquad (۲۱)$$

علامت منفی معادله (۲۰) نشان می‌دهد که با افزایش موجودی سرمایه $\dot{E}$ کاهش می‌یابد، همچنین علامت منفی معادله (۲۱) نشان می‌دهد که با افزایش مصرف انرژی $\dot{K}$ بایستی کاهش یابد. جهت رسم مسیرهای ممکن در شکل ۳ نشان داده شده است. تجزیه‌وتحلیل نمودار نشان می‌دهد که نقطه تعادل Q یک نقطه زینی است. راه حل ریاضی از معادلات (۱۶) و (۱۷) مشتق شده است، و تعادل پایدار نیز به شرح زیر است.

$$\dot{E} = \left[\frac{\mu\beta s(1-\gamma)\bar{L}^{\,1-\beta}}{\alpha+\mu\delta}\right]^{\frac{1}{1-\beta}} \qquad (۲۲)$$

$$\dot{K} = \left[\frac{\mu\beta s(1-\gamma)\bar{L}^{\,1-\beta}}{\alpha+\mu\delta}\right]^{\frac{1}{1-\beta}} - \bar{L}^{\,1-\beta}\left[\frac{\mu\beta s(1-\gamma)\bar{L}^{\,1-\beta}}{\alpha+\mu\delta}\right]^{\frac{1}{1-\beta}} \qquad (۲۳)$$

متغیر μ از معادله (۱۲) و محاسبه انتگرال μ برای زمان t حل می‌شود. حال با بازنویسی معادله (۱۲) براساس معادله دیفرانسیل مرتبه اول را خواهیم داشت.

$$\dot{\mu} - \left[\delta - \beta s(1-\gamma)\bar{L}^{\,1-\beta}K^{\beta-1}\right]\mu = \alpha \qquad (۲۴)$$

با ترکیب شرایط انتقال پذیری در معادله (۶) می‌توان حل ویژه را به‌صورت رابطه زیر در نظر داشت:

$$\mu(t) = \frac{\alpha}{\left[\delta - \beta s(1-\gamma)\bar{L}^{\,1-\beta}K^{\beta-1}\right]} e^{\left[\delta-\beta s(1-\gamma)\dot{L}^{\,1-\beta}K^{\beta-1}\right]t} \times \left[1 - \left\{\left[\delta - \beta s(1-\gamma)\dot{L}^{\,1-\beta}K^{\beta-1}\right]t + 1\right\}\right] \qquad (۲۵)$$

برای سادگی و در نظر گرفتن

$$\left[\delta - \beta s(1-\gamma)\bar{L}^{\,1-\beta}K^{\beta-1}\right] = A$$

و ساده سازی رابطه فوق خواهیم داشت:

$$\mu(t) = \frac{\alpha}{A} e^{At}\left[1 - e^{-(At+1)}\right] \qquad (۲۶)$$

حال با جایگذاری رابطه (۲۵) در رابطه (۱۶)و (۱۳) می‌توان مقدار بهینه موجودی سرمایه و مصرف انرژی را به‌صورت روابط زیر به‌دست آورد.

$$K = \left[\frac{\beta s e^{At}\left(1 - e^{-(At+1)}\right)(1-\gamma)\bar{L}^{\,1-\beta}}{A + \delta e^{At}\left(1 - e^{-(At+1)}\right)}\right]^{\frac{1}{1-\beta}} \qquad (۲۷)$$

$$E = \frac{\alpha(\gamma-1)}{2} e^{At}\left[1 - e^{-(At+1)}\right] \qquad (۲۸)$$

۵. نتایج تجربی

۵-۱. داده‌های مدل و کالیبره پارامترها

در این پژوهش متغیرهای مورد استفاده برای محاسبه بهینه‌سازی کارایی انرژی کشور ایران معرفی خواهد گردید. موجودی سرمایه (دلار آمریکا به قیمت ثابت سال ۲۰۰۵) نیروی کار (نفر)، مصرف انرژی(کیلو تن معادل نفت) در مدل استفاده می گردد. داده‌ها ی مربوط به متغیرهای موجودی سرمایه (K)، نیروی کار (L) و مصرف انرژی (E) در نظر گرفته شده است. داده‌های مربوط به متغیرها به جز موجودی سرمایه از مجموعه WDI[1] و سایت بانک مرکزی استخراج گردیده‌اند. همچنین به‌دلیل نبود داده‌های مربوط به موجودی سرمایه ناخالص از روش نمایی موجودی سرمایه را محاسبه گردید. یکی از مراحل اولیه تجربی مدل کنترل بهینه مقداردهی به پارامترهای مدل است. کالیبراسیون[2] یکی از مهم‌ترین روش‌های متداول در زمینه مقدار دهی به پارامترهای مدل کنترل بهینه است. در واقع

1. World Development Indicators
2. Calibration

کالیبراسیون روشی است برای انتخاب پارامترهای مدل به‌نحوی‌که رفتار مدل بیشترین شباهت و تطابق را با اقتصاد مورد مطالعه داشته باشد (دیجونگ و داو[1]، ۲۰۰۷). در روش کالیبراسیون پارامترها متناسب با رفتار واقعی متغیرهای اقتصاد مورد بررسی انتخاب می‌گردند. در این مطالعه با بهره‌گیری از کالیبراسیون، مقدار مقدار پارامترهای مدل را مشخص می‌کنیم. در این راستا، مجموعه پارامترهای کالیبره شده و اخذ شده از سایر مطالعات در جدول (۱) ارائه شده است.

جدول ۱: پارامترهای الگوی مربوط به اقتصادایران

پارامترها	مقدار	منبع
کشش تولید نسبت به انباشت سرمایه فیزیکی (β)	۰/۳۹	بانک مرکزی جمهوری اسلامی‌ایران
نرخ استهلاک سرمایه فیزیکی (δ)	۰/۰۵	بانک مرکزی جمهوری اسلامی‌ایران
نرخ پس‌انداز (s)	۰/۲۷	بانک مرکزی جمهوری اسلامی‌ایران
نسبت اهمیت نسبی انرژی (γ)	۰/۳۸	اپرگیس[2] (۲۰۱۲)
اثر نهایی سرمایه (α)	۶/۲۲	فتحی[3] (۱۳۹۵)

منبع: نتایج تحقیق

۵-۲. نتایج مدل

مسائل کنترل بهینه اغلب غیرخطی هستند، لذا عموماً جواب تحلیلی ندارند. در نتیجه به‌کارگیری روش‌های عددی برای حل مسائل کنترل بهینه به نظر ضروری می‌رسد، لذا پس از مقداردهی به پارامترهای مدل، مقادیر بهینه مصرف انرژی و موجودی سرمایه مدل تعیین می‌گردد. این مقادیر براساس معادلات مستخرج از مدل کنترل بهینه و باتوجه به مقادیر پارامترهای مدل محاسبه می‌گردد. در این مطالعه با استفاده از برنامه نویسی در محیط نرم افزار متلب[4] مقادیر بهینه مصرف انرژی و موجودی سرمایه محاسبه شده است. پس از حل مدل مقادیر بهینه بین سال‌های ۱۳۹۳-۱۳۸۷ برای مصرف انرژی و موجودی سرمایه با مقدار تحقق یافته مقایسه شده است. در این قسمت الگوی موردنظر در این مطالعه روابط (۲۸و۲۷) حل و نتایج مورد بررسی قرار خواهد گرفت. با جایگذاری پارامترهای جدول (۱) در معادلات شماره (۲۸و۲۷) مقادیر بهینه انرژی و موجودی سرمایه به‌دست آمده است. مدل سازی نتایج برخی از مفاهیم خط‌مشی و سیاست‌ها را نشان می‌دهد. در مرحله اول، تحت رشد مکانیسم نئوکلاسیک و محدودیت سرمایه‌گذاری می‌تواند حداکثر کارایی انرژی را به‌طور مداوم به‌دست آورد. اگر چه کارایی انرژی اقتصادی شامل دو مفهوم یکی کاهش فاصله انرژی و ترقی منحنی مؤثر است. مدل بهینه‌سازی عمدتاً منعکس‌کننده نیمی‌از آن است و بیشتر بر دوره بلندمدت متمرکز است. در این مقاله

1. DeJong and Dave
2. Apergis
۳. در این مطالعه با بهره‌گیری از کالیبراسیون، مقدار اثر نهایی سرمایه در محاسبات پایان نامه با عنوان " بررسی کارایی‌های انرژی و زیست محیطی کشورهای در حال توسعه منتخب با تأکید بر تعیین سهم بهینه انرژی‌های فسیلی و تجدیدپذیر در اقتصاد ایران" به‌دست آمده است.
4. MATLAB

پیشرفت تکنولوژی برون‌زا فرض می‌شود و آن هم به این دلیل است که سرمایه به‌طور مستقیم برای بهبود کارایی انرژی در بلندمدت ارتباط دارد. برای رسیدن به حداکثر کارایی انرژی اقتصاد باید با توجه به وضعیت سرمایه‌گذاری بهینه شده توسط مصرف انرژی در حال کنترل اجرا شود. در واقع مقدار مصرف انرژی برای کنترل بسیاری از کشورهای در حال توسعه نسبتاً آسان است. با این حال سرمایه‌گذاری یک متغیر نوسان در بسیاری از شرایط است. مفهوم دوم در مورد حالت تعادل است، در اقتصاد هدف رسیدن به این نقطه می‌باشد. همچنان که ملاحظه می‌شود، مدل پیشنهادی توانایی مقادیر بهینه متغیرهای مصرف انرژی و موجودی سرمایه را دارد. مقایسه نتایج حاصل از مقادیر بهینه با مقادیر واقعی صورت گرفته در سال‌های ۱۳۸۷ تا ۱۳۹۳ نشان از شکاف بین رشد مقادیر بهینه مصرف انرژی با مقادیر تحقق یافته در تمامی سال‌ها از یک نوسان یکسانی را دارد. در مورد موجودی سرمایه، نوسان بین مقادیر بهینه با مقادیر واقعی بیشتر است به‌طوری‌که بیشترین شکاف بین سال‌های ۱۳۸۹ تا۱۳۹۰ است و در سال‌های دیگر این نوسان کمتر می‌باشد. همان‌گونه که در نتایج جدول (۲) ملاحظه می‌گردد الگو به‌خوبی مقادیر بهینه را برای متغیرهای مصرف انرژی و موجودی سرمایه استخراج نموده است، به‌طوری‌که مقادیر بهینه‌سازی با مقادیر واقعی شباهت بالایی دارند، و انحراف مقادیر بهینه نیز بیانگر نزدیکی قابل‌قبولی این ارقام با انحراف آمارهای واقعی دارد که این امر حکایت از توانایی بالای مدل برای محاسبه متغیرها می‌باشد.

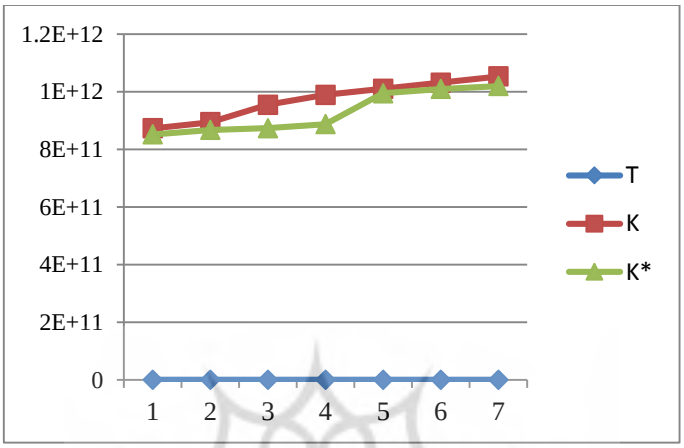
جدول ۲: مقادیر تحقق یافته و بهینه سرمایه و مصرف انرژی در سال‌های ۱۳۸۷ تا ۱۳۹۳ در ایران

سال	مقادیر واقعی سرمایه	مقادیر بهینه سرمایه	مقادیر واقعی مصرف انرژی	مقادیر بهینه مصرف انرژی
۱۳۸۷	۸/۷۴E+۱۱	۸/۵۲E+۱۱	۲۸۲۱/۱۶	۲۴۳۵/۱۲۸
۱۳۸۸	۸/۹۵E+۱۱	۸/۶۸E+۱۱	۲۸۲۸/۰۱	۲۴۳۲/۰۱۷
۱۳۸۹	۹/۵۵E+۱۱	۸/۷۴E+۱۱	۲۷۹۴/۴۹	۲۳۷۸/۱۴۹
۱۳۹۰	۹/۹۰E+۱۱	۸/۸۸E+11	۲۸۲۵/۰۵	۲۴۱۴/۰۸۹
۱۳۹۱	۱/۰۱E+۱۲	۹/۹۵E+۱۱	۲۷۸۳/۳۷	۲۴۸۲/۵۶۴
۱۳۹۲	۱/۰۳E+۱۲	۱/۰۱E+۱۲	۲۹۶۰/۳۸	۲۴۹۴/۸۵۲
۱۳۹۳	۱/۰۵E+۱۲	۱/۰۲E+۱۲	۲۹۸۹/۴۸	۲۶۳۸/۵۶۴

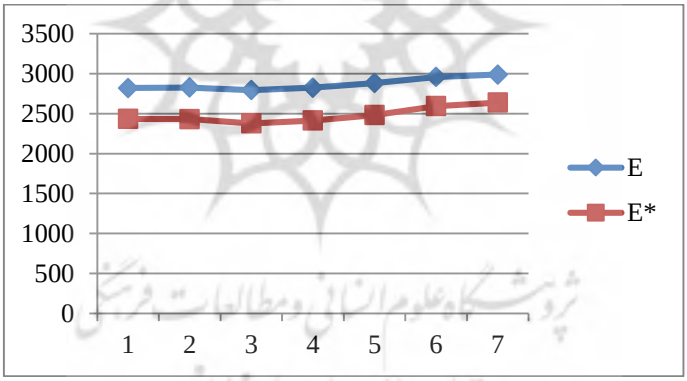
منبع: نتایج تحقیق

با مقایسه مقادیر تحقق‌یافته و بهینه ملاحظه می‌شود که روند موجودی سرمایه و مصرف انرژی در دوحالت یک رابطه مستقیم بین متغیرها وجود دارد و از یک هم‌گرایی مثبت برخوردار می‌باشند. شکاف بین ساهای ۱۳۸۹ تا ۱۳۹۱ برای متغیر موجودی سرمایه قابل توجه بوده است. اما در سال‌های دیگر این شکاف به حداقل می‌رسد. در مورد متغیر مصرف انرژی در همه سال‌ها شکاف بین مقدار تحقق

یافته و بهینه وجود داشته و سطح تحقق یافته در بالای بهینه است. این به معنای این است که در کشور ایران سطح مصرف انرژی از مقادیر بهینه بیشتر است و با این سطح افزایش یافته شدت انرژی نیز بالاتر از حد ممکن بوده است، و این دلیل قانع‌کننده‌ای برای کاهش کارایی انرژی اقتصادی است.



نمودار ۱: مقایسه موجودی سرمایه تحقق یافته با بهینه در سال‌های ۱۳۸۷ تا ۱۳۹۳



نمودار ۲: مقایسه مصرف انرژی تحقق یافته و بهینه در سال‌های ۱۳۸۷ تا ۱۳۹۳

نتیجه‌گیری

استفاده از انرژی در تمام مراحل تولید لازم و ضروری است، و بدون مصرف انرژی امکان تولید وجود ندارد. الگوهای رشد اقتصادی که نقش انرژی را بر رشد اقتصادی نادیده گرفته‌اند، کامل نیستند. از یک طرف انجام هر فعالیت اقتصادی مستلزم مصرف انرژی است، و آن به‌عنوان یکی از اصلی‌ترین عوامل برای شکل‌گیری و پیشرفت جوامع صنعتی شناخته شده است. به‌طوری‌که میزان دسترسی کشورها به منابع گوناگون انرژی نشانگر پیشرفت و قدرت سیاسی اقتصادی آنان می‌باشد. از طرف دیگر با توجه به

محدودیت منابع انرژی به‌ویژه منابع فسیلی که صرفه جویی آنها برای توجه به مسأله توسعه پایدار و همچنین مسائل زیست‌محیطی، مصرف بهینه از این منابع استراتژیک در برنامه‌ریزی همه کشورها در سال اخیر مورد توجه بوده است. برای این منظور حداکثر سازی کارایی انرژی یکی از اولویت‌های کشورها محسوب می‌گردد. در این مطالعه ارائه الگویی برای بهینه‌سازی کارایی انرژی در کشور ایران بررسی گردید. داده‌های سالانه طی دوره ۱۳۹۳-۱۳۸۷ در نظر گرفته شده است. نتایج نشان می‌دهد، شکاف بین مقادیر بهینه با مقادیر تحقق‌یافته وجود دارد، و این به معنای این است که در کشور ایران سطح مصرف انرژی از مقادیر بهینه بیشتر است، و این نشان‌دهنده این است که با این سطح افزایش یافته انرژی شدت انرژی نیز بالاتر از حد ممکن بوده است. بنابراین برای رسیدن به یک سطح مطلوب کارایی انرژی می‌بایست مصرف انرژی کاهش یابد. براساس نتایج بدست آمده در این پژوهش، پیشنهادهای زیر مطرح است:

۱- تنوع بخشی سبد انرژی که خود متضمن افزایش امنیت ملی است، لذا در کنار سایر منابع انرژی مثل انرژی هسته‌ای، انرژی‌های تجدیدپذیر نیز توجه بیشتری شوند. استفاده از انرژی‌های غیر فسیلی نه تنها باعث تنوع‌بخشی در سبد انرژی کشور می‌شود بلکه با استفاده از این انرژی‌ها و با حداقل‌سازی مصرف داخلی، زمینه صادرات سوخت‌های فسیلی فراهم می‌شود.

۲- ایران کشوری درحال توسعه است و رشد اقتصادی از اهداف اصلی سیاست گذاران کشور است. با توجه به افزایش درآمد سرانه که از نتایج شکوفایی اقتصادی است، می‌تواند موجب افزایش بیشتر مصرف انرژی گردد. بنابراین ضرورت اتخاذ سیاست‌های غیرقیمتی مانند فرهنگ سازی مصرف انرژی، ارتقای سطح آموزش‌های لازم، ارتقای سطح اطلاعات مردم و تعیین راهکارهای بهینه‌سازی مصرف انرژی وجود دارد.

پژوهشگاه علوم انسانی و مطالعات فرهنگی
پرتال جامع علوم انسانی

منابع

راسخی، سعید و سلمانی، پروین (۱۳۹۲). "رابطه شدت انرژی و کارایی اقتصادی در کشورهای منتخب با استفاده از الگوی گشتاور تعمیم‌یافته: کاربردی از تحلیل پنجره‌ای پوششی داده‌ها"، *پژوهش‌ها و سیاست‌های اقتصادی*، ۲۱(۶۷)، ۲۴-۵.

شرزه‌ای، غلامعلی و ابراهیم‌زادگان، هه‌ژار (۱۳۹۰). "برآورد اثر بازگشت افزایش کارایی انرژی در ارتباط با مصرف خانوارها و انتشار دی اکسیدکربن در ایران"، *مطالعات اقتصاد انرژی*، ۸(۳۰)، ۶۱-۳۳.

فتحی، بهرام، خداپرست مشهدی، مهدی، همایونی‌فر، مسعود، سجادی‌فر، سیدحسین(۱۳۹۶). «مطالعه مقایسه‌ای کارایی‌انرژی، زیست محیطی در کشورهای درحال توسعه با رویکرد ستانده مطلوب و نامطلوب در محیط رقابتی»، *فصلنامه پژوهش‌ها و سیاست‌های اقتصادی*، سال بیست و پنجم، شماره ۸۱، ۸۵-۱۲۱.

فتحی، بهرام، مهدوی عادلی، محمدحسین، فطرس، محمدحسن (۱۳۹۴). «اندازه‌گیری کارایی زیست محیطی انرژی در کشورهای درحال توسعه منتخب با استفاده از مدل‌های ناپارامتریک ایستا و پویا»، *فصلنامه مطالعات اقتصاد انرژی*، سال یازدهم، شماره ۴۶، ۶۱-۸۷.

مهرگان، نادر و مبارک، اصغر (۱۳۷۸). «بررسی تأثیر مؤلفه‌های اقتصاد نوین بر کارایی صنایع در ایران»، *فصلنامه اقتصاد مقداری*، ۵(۲)، ۱۵۲-۱۳۱.

Aghion, P. and P. Howitt (2009). *The economics of Growth, MIT press*, Cambridge, MA.

Apergis, N., James, E. P. (2012). "Renewable and Non-Renewable Energy Consumption-Growth Nexus: Evidence from a Panel Error Correction Model", *Energy Economics*, Vol. 34, 733-738.

Ayres, RU, Turton, H., Casten, T. (2007). "Energy efficiency, sustainability and economic growth", *Energy*, 32(5), 634-648.

Bhattacharyya, S. C. (2011). *Energy Economic: Concepts, Issues, Markets and Governance*: Springer.

Blass, V., Corbett, CJ., Delmas, MA., Muthulingam, S. (2014). "Top management and the adoption of energy efficiency practices: evidence from small and mediumsized manufacturing firms in the US". *Energy*, 65, 560-571.

Bojnec, S.D. Papler (2011). "Economic Efficiency, Energy Consumption and Sustainable Development", *Journal of Economics and Management*, 12: 353-374.

Brennan, TJ. (2010). "Optimal energy efficiency policies and regulatory demand-side management tests: how well do they match?", *Energy Policy*, 38(8), 374-385.

Chiang, A. (2000). *Elements of dynamic optimization*. Illinois: Waveland Press Inc.

Conrad, K. (2001). *The optimal path of energy and CO2 taxes for intertemporal resource allocation*. CESifo Working Paper. University of Mannheim.

Cui, Q., Kuang, H-B, Wu, C-Y, Li Y. (2014). "The changing trend and influencing factors of energy efficiency: the case of nine countries". *Energy*, 64:1026-1034.

Dasgupta, PS., Heal, GM. (1980). *Economic theory and exhaustible resources*. Cambridge University Press.

DeJong, D.N., With, C. D. (2007). *Structural Macroeconometrics*. Princeton University Press.

Farrell, M. J. (1957). "The Measurement of Productive Efficiency", *Journal of Royal Statistical Society*, 120(3), 253-290.

Filippini, M., Hunt, L. C. (2012). "US residential Energy Demand and Energy Efficiency: A Stochastic Demand Frontier Approach". Energy Economics, 34(5), 1484-1491.

Forster, BA. (1980). "Optimal energy uses in a polluted environment". *Journal of Environmental Economics and Management*; 7(4), 321-333.

Giacone, E., Mancò, S. (2012). "Energy efficiency measurement in industrial processes". *Energy*, 38(1), 331-345.

Garg, PC., Sweeney, JL. (1978). "Optimal growth with depletable resources". *Resour Energy*, 1(1), 43-56.

Halkos, G. E., Tzeremes, N. G. (2013). "Renewable Energy Consumption and Economic Efficiency: Evidence from European Countries", *Journal of Renewable and Sustainable*, 5, 182-189.

Huntington, S. P. (1996). *The clash of civilizations and the remaking of world order*. New York: Simon & Schuster.

Hu, J.L., Chang, T.P. (2009). *Total-factor Energy Productivity Growth of Regions in China*. National Chiao Tung University, Taipei, Working paper.

Hu, J.L., Wang, SC. (2006). "Total-factor energy efficiency of regions in China". *Energy Policy*, 34, 3206-3217.

James, K.G. (2007). "Global inequality and global macroeconomics". *Journal of policy Modeling*, 29(4), 587-607.

Jaffe, AB., Stavins, RN. (1994). "The energy-efficiency gap what does it mean?", *Energy Policy*, 22(10), 804-810.

Meddison, A. (2001). *The world economy, a Millennial perspective, Development Centre Studies*, OECD, Paris.

Patterson, M. G. (1996). "What is Energy efficiency? Concepts, Indicators and Methodological Issues". *Energy policy*, 24(5), 377-390.

Peng, S. (2007). "Natural resource depletion and sustainable economic growth based on a four-sector endogenous growth model". *Journal of Industrial Engineering and Management*, 21(4), 119-124.

Pindyck, RS. (1978). "The optimal exploration and production of nonrenewable resources". *Journal of Political Economy*, 841-861.

Pindyck, RS. (1980). "Uncertainty and exhaustible resource markets". *Journal of Political Economy;* 1203-1225.

Li, H., Long, R., Lan, X. (2012). "Economic growth in resource-based cities: based on ecological constrains". *China Soft Science Management*, 26(6), 53-59.

Lucas, Jr RE. (1988). "On the mechanics of economic development". *Journal of Monetary Economics*, 22(1), 3-42.

Romer, PM. (1990). "Endogenous technological change". *Journal of Political Economy, 71-102*.

Sorrell, S. (2009). "Jevons paradox revisited, "The Evidence for Backfire from Improved Energy Efficiency". *Energy policy*, 37(4), 1456-1469.

Sari, R, Soytas, U. (2009). "Are global warming and economic growth compatible? Evidence from five OPEC countries?", *Applied Energy*, 86, 1887-1893.

Stiglitz, J. (1974). "Growth with exhaustible natural resources: efficient and optimal growth paths". *Review of Economic Studies*, 41, 123-137.

Stern, DI. (2012). "Modeling international trends in energy efficiency". *Energy Economics*, 34(6), 2200-2208.

Stern, DI. (2011). "The role of energy in economic growth". *ANNALS OF THE NEW YORK ACADEMY OF SCIENCES*, 1219(1), 26-51.

Toman, MA., Jemelkova, B. (2003). "Energy and economic development an assessment of the stste of knowledge", *energy journal*, 24(4), 93-112.

World Bank, (2014). World Development Indicators (WDI), CD-ROM. Washington

Zhang, X.P., Cheng, X.M., Yuan, J.H., Gao, X.J. (2010). "Total-factor energy efficiency in developing countries". *Energy Policy*, 38, 6172-6179.

Wang, Z.H., Zeng, H.L., Wei, Y.M., Zhang, Y.X. (2012). "Regional total factor energy efficiency: An empirical analysis of industrial sector in China". *Applied Energy*, 97, 115-123.

پژوهشگاه علوم انسانی و مطالعات فرهنگی
پرتال جامع علوم انسانی

پژوهشگاه علوم انسانی و مطالعات فرهنگی
پرتال جامع علوم انسانی

Applied Economics Studies, Iran (AESI) 121

Volume 7, Number 29, Spring 2019

Presentation of Energy Efficiency Model in Iranian Economy Using Dynamic Optimization Approach

Fathi, B.[1*], Khodaparast Mashhadi, M.[2], Homayounifar, M.[3], Sajadifar, S. H.[4]

Abstract

This paper is based on dynamic optimization methodology to investigate the economic energy efficiency issues in Iranian Economy. The paper introduces some definitions about energy efficiency both in economics and physics, and establishes a quantitative way for measuring the economic energy efficiency.

The linkage between economic energy efficiency, energy consumption and capital stock is demonstrated primarily. Using the methodology of dynamic optimization, a maximum problem of economic energy efficiency over time, which is subjected to the extended Solow growth model and instantaneous investment rate, is modelled. In this model, the energy consumption is set as a control variable and the capital is regarded as a state variable. The analytic solutions can be derived and the diagrammatic analysis provides saddle-point equilibrium.

Keywords: Economic energy efficiency, optimum consumption of energy, Iran's economy.

Jel Classification: C14, C61, J24, O53.

پژوهشگاه علوم انسانی و مطالعات فرهنگی
پرتال جامع علوم انسانی

1. Ph.D. Student of Economic, Ferdowsi University of Mashhad, Iran **Email:** bahram125fathi@gmail.com
2. Department of Economics, Ferdowsi University of Mashhad, Iran **Email:** m_khodaparast@um.ac.ir
3. Department of Economics, Ferdowsi University of Mashhad, Iran **Email:** homayounifar@um.ac.ir
4. Department of Economics, IAU **Email:** h.sajadifar@gmail.com