تحقیقات اقتصادی / دورهٔ ۵۰، شمارهٔ ۱، بهار ۱۳۹۴ / ص ۱۴۶-۱۲۹

تأثیر متقابل قیمت نفت خام و عرضهٔ انرژی‌های جایگزین (آزمون تودا و یاماموتو)

کیومرث حیدری*

استادیار، مشاور رئیس پژوهشگاه نیرو و مدیر گروه اقتصاد برق و انرژی kheydari@nri.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۳۹۲/۲/۸ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۳/۷/۸

چکیده

با افزایش قیمت نفت، از یک طرف، انتظار می‌رود مصرف منابع انرژیِ جایگزین افزایش یابد و مصرف‌کنندگان نیز رفتار خود را با هدف کاهش شدت مصرف انرژی تغییر دهند. از طرف دیگر، گرایش به مصرفِ بیشتر انرژی‌های جایگزین می‌تواند به کاهش تقاضای کل نفت خام بینجامد. بدین ترتیب، رابطهٔ متقابل بین قیمت نفت خام و مصرف انرژی‌های جایگزین سؤال اصلی تحقیق محسوب می‌شود. برای پاسخ به این سؤال، مدل خودتوضیح برداری با استفاده از آزمون تودا و یاماموتو به‌کار گرفته شد. حوزهٔ مطالعه اقتصاد جهانی و دورهٔ مطالعه سال‌های ۱۹۶۹ ـ ۲۰۱۱ انتخاب شد. نتایج به‌دست‌آمده تأثیر متقابل قیمت نفت و عرضهٔ انرژی‌های جایگزین و عدم تأثیر انرژی‌های جایگزین بر شدت مصرف انرژی و برعکس را نشان می‌دهد. همچنین، تأثیر یک‌جانبهٔ قیمت نفت خام بر شدت مصرف انرژی نیز تأیید می‌شود.

طبقه‌بندی JEL: Q31,Q41,Q42

واژه‌های کلیدی: تودا- یاماموتو، تولید ناخالص جهانی، شدت انرژی، علیت گرنجر، منابع جایگزین، نفت خام.

پژوهشگاه علوم انسانی و مطالعات فرهنگی
پرتال جامع علوم انسانی

* تلفن: ۸۸۰۹۰۵۴۷-۰۲۱

۱. مقدمه

نفت خام، به منزلهٔ یک حامل انرژی، با سایر منابع انرژی قابل جانشین است. همانند هر کالای دیگر، افزایش قیمت نفت خام حامل‌های جانشین را در معرض توجه قرار داده است. با کاهش قیمت نفت، انتظار می‌رود استفاده از حامل‌های جانشین کمتر شود. بنابراین، با افزایش قیمت نفت خام، انتظار می‌رود عرضهٔ انرژی‌های جایگزین افزایش یابد. از سوی دیگر، واکنش به تغییرات قیمت نفت خام، به‌ویژه افزایش قیمت آن، صرفاً به جایگزینی یا استفاده از انرژی‌های جایگزین محدود نمی‌شود. مصرف‌کنندگان، با تغییر رفتار و الگوی مصرف و با بهینه‌سازی و کاهش مصرف انرژی، در مقابل افزایش قیمت انرژی واکنش نشان می‌دهند. از آنجا که نتایج بهینه‌سازی مصرف انرژی، در حقیقت، با افزایش قیمت نفت خام و فرآورده‌های آن، به دلیل افزایش ارزش سوخت، صرفه‌جویی می‌شود، تعداد بیشتری از طرح‌های بهینه‌سازی مصرف توجیه‌پذیر خواهد شد. آثار این رویدادها در شاخص شدت مصرف انرژی منعکس می‌شود. این شاخص میزان انرژی مصرفی به ازای یک واحد تولید ناخالص ملی را نشان می‌دهد. بنابراین، با ثبات سایر عوامل، انتظار می‌رود با افزایش قیمت نفت خام تقاضای آن با سایر منابع انرژی جایگزین شود و بخشی از نقدینگی اختصاص‌یافته برای تأمین نفت خام به سمت طرح‌های بهینه‌سازی مصرف سوق داده شود. بنابراین، سؤال اصلی این است که آیا داده‌های تاریخی معنی‌داربودن تأثیر قیمت نفت خام بر عرضهٔ انرژی‌های جایگزین یا بهینه‌سازی مصرف را تأیید می‌کند؟ در صورت مثبت‌بودن پاسخ، آیا این رابطه متقابل است یا یک‌طرفه؟ همچنین، شدت تأثیرگذاری هر یک از متغیرهای فوق بر دیگری نیز حائز اهمیت خواهد بود. بررسی و ارائهٔ پاسخ‌های مستدل به این سؤالات می‌تواند در تنظیم سیاست‌های کلان حوزهٔ انرژی حائز اهمیت و تأثیرگذار باشد. ساختار مقاله بدین ترتیب است: در بخش دوم به ادبیات موضوعی پرداخته شده است. روش تحقیق و چارچوب نظری با تأکید بر تحلیل مسیر تأثیرگذاری متقابل قیمت نفت خام و انرژی‌های جایگزین (شامل بهینه‌سازی مصرف انرژی) در بخش سوم و روند متغیرهای اصلی پژوهش در دوره‌های پنج‌ساله در بخش چهارم ارائه شده است. پایایی متغیرها در بخش پنجم، تعداد بهینهٔ وقفه‌ها در بخش ششم، و استخراج نتایج به همراه تحلیل علیت نیز در بخش هفتم صورت گرفته است. جمع‌بندی و نتایج تحقیق نیز در بخش هشتم ارائه شده است.

۲. ادبیات موضوع و مطالعات انجام‌شده

مطالعات مرتبط با پژوهش اخیر را می‌توان به دو گروه تقسیم کرد: گروه اول شامل مطالعاتی است که در آن صرفاً موضوع علیت بین متغیرها بررسی شده است. این مطالعات طیف وسیعی از حوزه‌های مختلف را شامل می‌شوند. گروه دوم مطالعاتی است که در آن‌ها به بررسی علیت متقابل متغیرهای مختلف در حوزهٔ اقتصاد انرژی پرداخته شده است. مطالعهٔ حاضر را می‌توان در این گروه دوم دسته‌بندی کرد. بررسی‌های انجام‌شده نشان می‌دهد، در طول بیش از سه دهه (۱۹۷۸ ـ ۲۰۱۲)، بیش از ۴۷ مطالعهٔ بین‌المللی در حوزهٔ تشخیص علیت انجام شده است. در مطالعات مذکور، در یک نگاه کلی، محققان به تشخیص رابطهٔ علیت بین مصرف انرژی، رشد اقتصادی، مصرف انرژی در یک بخش خاص (خانگی یا صنعتی)، مصرف حامل‌های خاص (نفت، برق، زغال سنگ)، و سطح عمومی قیمت‌ها یا قیمت انرژی توجه کرده‌اند. در حوزهٔ جهانی مطالعات زیادی صورت گرفته که با موضوع اصلی این تحقیق مرتبط است. نتایج کلی این مطالعات در پایان همین بخش ارائه شده است. از جمله مطالعات انجام‌شده در حوزهٔ جهانی والد و رافائل (۲۰۰۵) به بررسی تأثیر مصرف انرژی بر تولید ناخالص داخلیِ ۱۹ کشور افریقایی پرداخته‌اند. نتایج این مطالعه تأثیر متقابل تولید ناخالص و مصرف انرژی را تأیید می‌کند. یو (۲۰۰۶) به بررسی رابطهٔ مصرف برق و تولید ناخالص در کشور کرهٔ جنوبی پرداخته است. مطالعهٔ او نیز تأثیر متقابل مصرف برق و تولید ناخالص ملی را برای کشور مذکور تأیید می‌کند. در داخل کشور ایران نیز برخی مطالعات مرتبط با موضوع این تحقیق انجام شده است: ملکی (۱۳۷۸) رابطهٔ مصرف انرژی و تولید داخلی را بررسی و تأثیر یک‌جانبهٔ مصرف انرژی بر تولید را تأیید کرد. ابریشمی و مصطفایی (۱۳۸۰) نیز در مطالعه‌ای، با تمایز آثار کوتاه‌مدت از بلندمدت، تأثیر مصرف فرآورده‌های نفتی بر تولید ناخالص داخلی را صرفاً برای بلندمدت تأیید کردند. آرمن و زارع (۱۳۸۴) رابطهٔ مصرف انرژی (با تأکید بر برق و گاز) و رشد اقتصادی را بررسی کردند. این مطالعه، مشابه مطالعهٔ پیشین، تأثیر مصرف انرژی بر رشد اقتصادی را تأیید می‌کند و، در عین حال، علیت یک‌جانبه از رشد اقتصادی به مصرف گاز طبیعی را تأیید می‌نماید. فطرس و همکاران (۱۳۸۷) رابطهٔ تولید ناخالص داخلی و مصرف برق را بررسی کردند.

مطالعهٔ آنان نشان می‌دهد رشد اقتصادی مقدم بر مصرف انرژی الکتریکی است. در نهایت، محمدی و همکاران (۱۳۹۱) علیت متقابل رشد اقتصادی و مصرف گاز طبیعی را بررسی کردند. در مطالعهٔآنان وجود رابطهٔ علیت دوطرفهٔ مصرف گاز طبیعی و تولید ناخالص داخلی تأیید می‌شود.

نتایج بیش از ۵۰ مطالعه در جهان و ایران نشان می‌دهد که در اغلب مطالعات رابطهٔ علیت متقابل مصرف انرژی و رشد اقتصادی و رابطهٔ مثبت بین مصرف نفت خام و رشد اقتصادی تأیید شده است. علاوه بر این، نتایج حاکی است از تأیید رابطهٔ متقابل بین سطح عمومی قیمت‌ها، مصرف انرژی، و تولید ناخالص و همچنین تأثیر مصرف انرژی بخش صنعت بر رشد اقتصادی. در نهایت، تأثیر مثبت مصرف برخی حامل‌های انرژی بر تولید ناخالص ملی نیز تأیید شده است. پژوهش اخیر، چون به بررسی رابطهٔ قیمت نفت خام، عرضهٔ انرژی‌های جایگزین، و شدت مصرف انرژی می‌پردازد، با مطالعات گذشته متفاوت است. هیچ یک از مطالعات گذشته (در داخل یا خارج از کشور) به بررسی این مسئله نپرداخته‌اند. نتایج این مطالعه، علاوه بر تکمیل نتایج مطالعات گذشته و درک بهتر چگونگی تأثیرگذاری متغیرهای اصلی حوزهٔ اقتصاد انرژی، به‌ویژه برای ایران، به عنوان کشوری با ذخایر بالای نفت خام و گاز طبیعی، در تنظیم سیاست‌های کلان حوزهٔ انرژی مفید خواهد بود.

۳. چارچوب نظری

در این بخش، نخست، ضمن بررسی ابعاد نظری، چگونگی تأثیر قیمت نفت خام بر عرضهٔ انرژی‌های جایگزینی و بهینه‌سازی مصرف انرژی (کاهش شدت مصرف انرژی) بررسی شده است. سپس، مدل منتخب برای بررسی علیت متغیرهای اصلی پژوهش معرفی خواهد شد.

۱.۳. تحلیل چرخهٔ تأثیر متقابل قیمت نفت و انرژی‌های جایگزین

چگونگی تأثیر قیمت نفت خام بر توسعهٔ انرژی‌های جایگزین را، به طور مثال، می‌توان از مسیر سرمایه‌گذاری برای احداث یک نیروگاه مبتنی بر انرژی‌های نو (مانند نیروگاه خورشیدی یا بادی) تحلیل کرد. این تحلیل برای سایر انرژی‌های جایگزین نیز صادق است. در حقیقت، تولید برق مبتنی بر انرژی‌های نو مستلزم سرمایه‌گذاری معادل I

است. با فرض اینکه هزینه‌های متغیر یا بهره‌برداری از این نیروگاه در هر سال معادل Ct بوده و همچنین میزان تنزیل درآمدها و هزینه‌های آتی معادل r درصد باشد، ارزش حال هزینه‌های این نیروگاه از رابطهٔ ۱ به‌دست می‌آید.

$$CPV = I + \int_{\cdot}^{T} C_t e^{-ti}\, dt \qquad (۱)$$

توجیه اقتصادی سرمایه‌گذاری فوق متأثر از درآمدهای حاصل از فروش محصول (انرژی برق) تولیدی است. از آنجا که بازارهای انرژی (به‌ویژه انرژی برق) تا پیش از دو دههٔ اخیر غیررقابتی و عمدتاً به صورت انحصاری بوده، همواره، برای تشخیص ارزش صرفه‌جویی یا آثار خارجی مثبت طرح‌های حوزهٔ بهینه‌سازی مصرف و انرژی‌های جایگزین (به طور خاص انرژی‌های نو) مشکلاتی وجود داشته است. بنابراین، در چنین شرایطی ارزش‌گذاری منافع ناشی از سرمایه‌گذاری در طرح‌های تولید برق مبتنی بر انرژی‌های جایگزین[۱] عمدتاً از طریق برآورد هزینه‌های قابل اجتناب صورت پذیرفته است، مثلاً فرض کنید قرار است دربارهٔ احداث یک مولد برق مبتنی بر انرژی تجدیدپذیر تصمیم‌گیری شود. با فرض اینکه قیمت هر واحد سوخت معادل Pf، میزان تولید سالانهٔ نیروگاه Ei، ارزش حرارتی هر کیلووات ساعت برق تولیدی Ehv، ارزش حرارتی هر واحد سوخت Fhv، راندمان مولد با سوخت فسیلی Rg، و دورهٔ عمر طرح T باشد، ارزش ریالی هزینهٔ قابل اجتناب ناشی از این میزان تولید انرژی برق عبارت است از:

$$Avoidable\,Costs = \int_{\cdot}^{T} \left(\left(\frac{۱}{Rg} \right) \times \left(\frac{Ehv}{Fhv} \right) \times Pf \times Ei \right) e^{-rt}\, dt \qquad (۲)$$

در این روش اگر منافع حاصل از احداث مولد تجدیدشونده نسبت به هزینه‌های آن بیشتر باشد، سرمایه‌گذاری توجیه می‌شود. این در حالی است که در طول دو دههٔ اخیر با تجدید ساختار[۲] و گسترش رقابت در بخش انرژی، به‌ویژه صنعت برق، هر نیروگاه امکان

---

۱. دربارهٔ طرح‌های بهینه‌سازی مصرف انرژی نیز وضعیت مشابهی قابل تعریف است.

۲. برنامه‌های تجدید ساختار مجموعه‌ای از اقدامات از جمله تفکیک افقی و عمودی، خصوصی‌سازی، آزادسازی و گسترش رقابت را پوشش می‌دهد.

دسترسی آزاد به شبکهٔ انتقال برق را دارد. در فضای جدید، نیروگاه‌ها، به منزلهٔ بنگاه‌های اقتصادی تولید انرژی برق، امکان عرضهٔ محصول تولیدی، به صورت رقابتی، به بازار را خواهند داشت. مکانیزم کلی بازار برق بدین ترتیب است: مالکان نیروگاه‌ها، بسته به مقررات و معماری بازار، مدتی پیش از موعد تحویل انرژی، پیشنهاد فروش برق خود را برای هر ساعت از شبانه‌روز دورهٔ تحویل برای مدیر بازار ارسال می‌کنند. این پیشنهاد می‌تواند متناسب با حجم انرژی تحویلی به صورت پلکانی عرضه شود. مدیر بازار پس از دریافت پیشنهادهای مالکان نیروگاه‌ها و میزان تقاضای انرژی و همچنین قیود فنی (ظرفیت خطوط انتقال و سایر قیود مرتبط با پایداری شبکه) دریافت‌شده از «مرکز راهبری شبکه»، به خرید برق از کمترین قیمت پیشنهادی تا پوشش تقاضای انرژی اقدام می‌کنند. بدین ترتیب، قیمت تسویهٔ بازار[1] (قیمت نهایی خرید برای پوشش تقاضا) مشخص می‌شود. در این حالت، برای تشخیص توجیه‌پذیری سرمایه‌گذاری در تولید و عرضهٔ انرژی‌های جایگزین به محاسبهٔ هزینهٔ قابل اجتناب الزامی نیست، زیرا قیمت بازار منعکس‌کنندهٔ هزینه‌های اجتناب‌شده خواهد بود. حتی در مورد آثار خارجی مثبت (مانند کاهش آلاینده‌ها)ـ با وضع عوارض آلایندگی برای مولدهای مبتنی بر سوخت فسیلیـ آثار مالی آن در سیستم درون‌زا خواهد شد. بنابراین، هر تولیدکنندهٔ برق، مولد حرارتی یا تجدیدشونده، می‌تواند امید ریاضی درآمدهای ناشی از تولید برق و عرضهٔ آن به بازار را محاسبه کند. در مثال فوق، از آنجا که هزینهٔ سوخت به عنوان جزئی از قیمت برق ظاهر می‌شود، منافع حاصل از فروش انرژی برق منابع جایگزین متأثر از هزینه‌های سوخت‌های فسیلی خواهد بود. بنابراین، فارغ از اینکه هزینهٔ اجتناب‌شده یا قیمت‌های بازار رقابتی در محاسبات منظور شود، انتظار می‌رود عرضهٔ انرژی‌های جایگزین تابعی از قیمت سوخت‌های فسیلی (نفت خام) باشد؛ یعنی می‌توان انتظار داشت:

$$I = I\left(P_f\right) \; ; \; \frac{\partial I}{\partial P_f} > 0 \qquad (۳)$$

از سوی دیگر، امروزه، در مباحث اقتصاد کلان، انرژی نیز، به منزلهٔ یک نهاده، در

1. market clearing price

مدل‌های رشد ظاهر می‌شود. به عبارت دیگر، مصرف انرژی، همانند نیروی کار و سرمایه، می‌تواند به تولید بیشتر منجر شود. همچنین، با افزایش جمعیت و به دنبال آن تشکیل خانوارهای جدید، تقاضای انرژی افزایش می‌یابد. با ثبات سایر عوامل، بهبود فناوری، و مجموعه اقدامات مرتبط با مدیریت، طرف تقاضا می‌تواند مصرف انرژی برای حصول به میزان معینی از تولید را کاهش دهد. از آنجا که اجرای این کار منافع آن (صرفه‌جویی در مصرف انرژی) را در مقابل هزینه‌های آن (سرمایه‌گذاری در تحقیق و توسعه یا سرمایه‌گذاری برای جایگزینی ماشین‌آلات کم‌بازده با ماشین‌های پربازده) قرار می‌دهد، انتظار می‌رود با افزایش قیمت انرژی، صرفه‌جوییِ ناشی از این فعالیت‌ها افزایش یابد. افزایش قیمت، در چارچوب بحث عرضه و تقاضای کالاهای غیر پست، به تمایل به سرمایه‌گذاری و تولید انرژی بیشتر منجر می‌شود. بنابراین، انتظار می‌رود تأثیر قیمت انرژی بر عرضهٔ آن مثبت و معنی‌دار باشد. قیمت بالاتر هر کالای عادی به کاهش تمایل به مصرف (مصرفی یا سرمایه‌ای) آن منجر می‌شود. بنابراین، قیمت‌های بالاتر انرژی، با ثبات سایر عوامل، می‌تواند تأثیر منفی در تولید بگذارد. بخشی از این تأثیر منفی می‌تواند با جایگزینی نهاده‌های جانشین با نهاده‌ای که قیمت آن افزایش یافته خنثی شود. بنابراین، اگر در دنیای انرژی، نفت خام (به منزلهٔ یک منبع مهم انرژی) از منابع انرژی جایگزین تفکیک شود، انتظار می‌رود قیمت‌های بالاتر نفت موجب افزایش تمایل مصرف‌کنندگان برای بهره‌برداری بیشتر از حامل‌های جایگزین شود. بنابراین، اگر رابطهٔ قیمت نفت خام، عرضهٔ نفت، عرضهٔ انرژی‌های جایگزین، تولید ناخالص، و کارایی انرژی، بر اساس داده‌ها و رفتارهای تجربی، بررسی شود، انتظار می‌رود تأثیر متقابل این متغیرها معنی‌دار باشد.

به طور متقابل، برای بررسی نظری مسیر احتمالی تأثیرگذاری سرمایه‌گذاری در انرژی‌های جایگزین بر بازار نفت خام و بنابراین قیمت تعادلی آن، فرض می‌شود بازار نفت در شرایط تعادلی قرار داشته باشد. حال اگر سرمایه‌گذاری در انرژی‌های جایگزین افزایش یابد، این اتفاق، به منزلهٔ عاملی برون‌زا، می‌تواند موجب انتقال منحنی تقاضای نفت خام به سمت چپ شود. این موضوع به شکل‌گیری یک نقطهٔ تعادلی جدید منجر خواهد شد. در شرایط تعادلی جدید، مقدار کمتری از نفت خام تقاضا می‌شود و این

مقدار با قیمت پایین‌تر نفت خام، نسبت به شرایط قبل از سرمایه‌گذاری در توسعهٔ انرژی‌های جایگزین، همراه خواهد بود. این زنجیرهٔ تأثیرگذاری حاکی از آن است که، از بُعد نظری، انتظار می‌رود تأثیر قیمت نفت خام بر عرضهٔ (تولید) انرژی‌های جایگزین معنی‌دار و مثبت باشد. همچنین، توسعهٔ انرژی‌های جایگزین نیز با پوشش بخشی از تقاضای بازار برای انرژی می‌تواند موجب کاهش تقاضای نفت خام شود. به عبارت دیگر، می‌توان نوشت:

$$I = I\left(P_{CO}\right)\ ;\ \frac{\partial I}{\partial P_{CO}} > 0 \qquad (۴)$$

$$Q_{AE} = Q\left(P_{CO}\right)\ ;\ \frac{\partial Q}{\partial P_{CO}} > 0 \qquad (۵)$$

همان طور که در بخش‌های پیشین اشاره شد، صرفه‌جویی انرژی را نیز می‌توان به عنوان یکی از گزینه‌های مصرف‌کننده برای واکنش به افزایش قیمت نفت خام معرفی کرد. از سوی دیگر، با بازتعریف میزان صرفه‌جویی انرژی می‌توان آن را یک منبع مجازی تولید انرژی معرفی کرد. به عبارت دیگر، می‌توان فرض کرد مصرف انرژی مصرف‌کننده با احتساب صرفه‌جویی ثابت باقی مانده، اما، در مقابل معادل صرفه‌جویی از یک منبع مجازی تولید انرژی تأمین شده است. بنابراین، نوع نگاه به عرضهٔ انرژی جایگزین و صرفه‌جویی انرژی می‌تواند به شیوهٔ مشابهی مدل‌سازی و تحلیل شود. نکتهٔ دیگر آنکه گرچه، در مقایسه با سایر انواع حامل‌های انرژی، سهم انرژی‌های تجدیدشونده در سبد انرژی جهانی[۱] چندان بالا نیست، به عنوان بخشی از انرژی جایگزین و در تحلیل تغییرات نهایی، آثار تغییر قیمت نفت خام بر عرضهٔ این منابع می‌تواند معنی‌دار باشد.

۲.۳. مدل تحقیق (روش تودا و یاماموتو)

بررسی مطالعات قبلی نشان می‌دهد، تاکنون مدل‌های مختلفی از جمله مدل علیت

۱. بر اساس اطلاعات منتشرشده (IEA) سهم انرژی‌های تجدیدشونده (با احتساب انرژی برقابی) در تولید برق در جهان حدود ۱۷ درصد بوده است. البته، این سهم برای کشورهای OECD و اروپایی (نسبت به سایر کشورها و متوسط جهان) بالاتر است.

گرنجر (۱۹۶۹)، آزمون سیمز (۱۹۷۲)، و مدل تصحیح خطای برداری برای بررسی علیت متقابل متغیرها معرفی شده است. هر یک از این روش‌ها ویژگی‌های مثبت معینی دارند و البته با قیود و محدودیت‌هایی نیز مواجه‌اند. بررسی‌های انجام‌شده نشان می‌دهد روش ارائه‌شده توسط تودا و یاماموتو[1] (۱۹۹۵)، علاوه بر دارابودن نگرشی جدید به موضوع علیت، در عین سادگی، از کارایی بالایی برای تشخیص علیت متقابل متغیرها برخوردار است. بر اساس روش پیشنهادی این دو محقق، نخست باید درجهٔ پایایی متغیرهای مدل استخراج و حداکثر درجهٔ پایایی (d_{max}) شناسایی شود. سپس، با استفاده از معیارهای رایج، رتبهٔ بهینهٔ (k) مدل خودتوضیح برداری استخراج شود. در گام بعد، باید مدل خودتوضیح برداری با تعداد وقفه‌های معادل مجموع دو کمّیت فوق ($d_{max} + k$) برآورد شود. این دو اعتبار فرایند انتخاب و اجرای آزمون را مشروط به کوچک‌تر یا مساوی‌بودن حداکثر درجهٔ پایایی از رتبهٔ بهینهٔ مدل خودتوضیح برداری بیان کرده‌اند. در ساده‌ترین شکل ممکن، با فرض اینکه مجموع درجهٔ پایایی و رتبهٔ مدل معادل دو (۲) باشد، مدل خودتوضیح برداری برای دو متغیر x_t و y_t به صورت معادلهٔ ۶ خواهد بود.

$$\begin{bmatrix} x_t \\ x_t \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \alpha_1 \\ \alpha_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \beta^1_{11} & \beta^1_{12} \\ \beta^1_{21} & \beta^1_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{1,t-1} \\ x_{2,t-1} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \beta^2_{11} & \beta^2_{12} \\ \beta^2_{21} & \beta^2_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{1,t-2} \\ x_{2,t-2} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} u_{1t} \\ u_{2t} \end{bmatrix} \qquad (۶)$$

حال باید قید صفربودن هم‌زمان همهٔ ضرایب هر متغیر مستقل آزمون شود. در صورتی که نتوان این قید را رد کرد، متغیر مذکور را نمی‌توان علت متغیر وابسته معرفی کرد. آمارهٔ این آزمون آمارهٔ والد است و دارای توزیع کای دو (χ^2) است و درجهٔ آزادی آن نیز برابر با تعداد محدودیت‌های آزمون است. بررسی‌های زاپاتا و رامبالدی[2] (۱۹۹۷) نشان می‌دهد آگاهی از درجهٔ پایایی متغیرها و رتبهٔ بهینهٔ مدل خودتوضیح برداری برای اجرای این آزمون و اعتماد به نتایج به‌دست‌آمده از کفایت لازم برخوردار است. به عبارت دیگر، درجهٔ پایایی متغیرهای مدل و همچنین هم‌جمعی آن‌ها موجب بی‌اعتباری نتایج

1. Toda & Yamamoto
2. Zapata & Rambaldi

نخواهد شد. بنابراین، با توجه به مطالب ارائه‌شده در بخش‌های قبل و الزامات مدل منتخب، برای بررسی تأثیر متقابل قیمت نفت خام و توسعهٔ انرژی‌های جایگزین و همچنین شدت مصرف انرژی از یک مدل خودتوضیح برداری- شامل متغیرهای مؤثر در ارتباط با قیمت نفت خام و تولید انرژی‌های جایگزین و همچنین سایر متغیرهای مرتبط، مانند تولید ناخالص داخلی و شدت مصرف انرژی- استفاده خواهد شد.

چارچوب کلی این مدل به شرح زیر (معادلهٔ ۷) است:

$$Y_t = A(L)Y_t + C + u_t \qquad (۷)$$

در رابطهٔ فوق:

Y_t: برداری شامل متغیرهای درون‌زای مدل، از جمله:

pco_t: قیمت نفت خام؛

co_t: عرضهٔ نفت خام؛

gdp_t: تولید ناخالص جهانی؛

ae_t: عرضهٔ انرژی‌های جایگزین؛

ei_t: شدت مصرف انرژی؛

$A(L)$: ماتریسی شامل عملگرهای وقفه است.

C: ماتریسی شامل ضرایب ثابت یا عرض از مبدأ مدل‌هاست.

u_t: شامل جزء اختلال مدل (با میانگین صفر و واریانس ثابت) خواهد بود.

نتایج به‌دست‌آمده از مدل فوق، ضمن ارائهٔ تصویری از روابط و تأثیر متقابل قیمت نفت خام و میزان تولید (عرضه) انرژی‌های جایگزین، با اعمال برخی فروض، در تحلیل تأثیر متقابل قیمت نفت خام و ظرفیت‌سازی برای توسعهٔ انرژی‌های جایگزین استفاده خواهد شد.

۴. مروری بر متغیرهای اصلی

همان طور که در بخش پیش اشاره شد، عرضهٔ انرژی‌های جایگزین، عرضهٔ نفت خام، قیمت نفت خام در بازارهای جهانی، جمعیت، تولید ناخالص جهانی، و شدت مصرف انرژی متغیرهای اصلی مدل خودتوضیح برداری مورد بررسی هستند. خاطرنشان

می‌شود تأثیر شدت مصرف انرژی از طریق میزان انرژی کاهش‌یافته به واسطهٔ تغییر شدت مصرف انرژی ارزیابی خواهد شد. بدین منظور، با فرض ثبات شدت مصرف انرژی در سال پایه، میزان انرژی مورد نیاز برای تولید هر سال محاسبه و با کسر این مقدار از انرژی واقعی هر سال تأثیر شاخص شدت مصرف انرژی محاسبه شده است. این متغیر از این پس با نام «تولید مجازی» معرفی خواهد شد. جدول ۱ مقادیر متغیرهای مدل را در مقاطع زمانی پنج‌ساله نشان می‌دهد.

جدول ۱. خلاصه وضعیت متغیرهای اصلی مدل منتخب

سال	جمعیت	تولید جهانی	قیمت نفت	عرضهٔ نفت	انرژی جایگزین	تولید مجازی
	Pop	gdpr	pco	cop	Ae	Er_ei
	میلیون نفر	میلیارد دلار	دلار- بشکه	میلیون تن	میلیون تن معادل نفت خام	
۱۹۷۰	۳۶۶۴/۱	۱۹۲۰۰/۶	۱۰/۴	۲۳۵۸/۰	۲۵۸۶	۱۲/۰
۱۹۷۵	۴۰۳۵/۰	۲۲۹۵۴/۲	۴۸/۲	۲۷۳۸/۲	۳۰۲۸	۱۳۴/۲
۱۹۸۰	۴۳۹۰/۹	۲۷۵۹۱/۷	۱۰۰/۵	۳۰۹۱/۹	۳۵۳۹	۴۳۶/۲
۱۹۸۵	۴۷۸۷/۴	۳۱۵۱۷/۵	۵۷/۶	۲۷۹۶/۸	۴۳۶۵	۸۹۳/۷
۱۹۹۰	۵۲۱۲/۱	۳۷۴۸۸/۶	۴۰/۸	۳۱۷۵/۴	۴۹۲۹	۱۴۵۲/۶
۱۹۹۵	۵۶۱۷/۰	۴۱۵۷۲/۷	۲۵/۱	۳۲۸۶/۱	۵۲۷۸	۲۰۲۱/۰
۲۰۰۰	۶۰۰۰/۴	۴۹۲۱۱/۱	۳۷/۲	۳۶۱۸/۲	۵۷۳۷	۳۱۵۱/۳
۲۰۰۵	۶۳۷۷/۲	۵۶۵۶۱/۵	۶۲/۸	۳۹۱۶/۴	۶۸۳۸	۳۶۰۱/۸
۲۰۱۰	۶۷۶۱/۴	۶۳۱۵۵/۳	۸۲/۰	۳۹۴۵/۴	۸۰۳۲	۴۰۳۷/۶

منبع: آژانس بین‌المللی انرژی، بانک جهانی، دپارتمان انرژی ایالات متحده، و وزارت نیرو

۵. پایایی متغیرها

با توجه به ضرورت حصول اطمینان از پایایی هر یک از متغیرهای مدل[۱] و اهمیت کسب اطلاع از درجهٔ هم‌انباشتگی آن‌ها در تدوین و برآورد مدل نهایی، در این بخش آزمون‌های لازم، آزمون ریشهٔ واحد، به تفکیک مدل‌های بدون روند و عرض از مبدأ،

۱. درج حرف l در آغاز نام متغیر نشانهٔ شکل لگاریتمی و حرف c در پایان متغیر نشانهٔ سرانه‌بودن آن است.

دارای عرض از مبدأ و دارای عرض از مبدأ و روند برای سطوح اعتماد مختلف (یک، پنج، و ده درصد) صورت گرفته است. این آزمون‌ها بـه تفکیـک سـطح، تفاضـل مرتبـهٔ اول، و همچنین تفاضل مرتبهٔ دوم انجام شده است. نتایج جزئی در پیوست تحقیق و نتایج کلی و خلاصه‌شده در جدول ۲ ارائه شده است.

جدول ۲. نتایجِ آزمون پایایی (فیلیپس و پرون) متغیرها

نام متغیر	آزمون	فاقد عرض از مبدأ و روند	عرض از مبدأ	عرض از مبدأ و روند
Laec	سطح	۴/۲۵	۰/۱۳	-۱/۵۹
	تفاضل اول	-۴/۲۷	-۵/۷۱	-۵/۶۷
Lpco	سطح	۰/۸۷	-۱/۸۸	-۱/۸۹
	تفاضل اول	-۶/۲	-۶/۳۵	-۶/۲۸
Lgdprc	سطح	۷/۹	-۰/۸۶	-۲/۸
	تفاضل اول	-۳/۰۷	-۵/۳۳	-۵/۱۷
Lcopc	سطح	۰/۸۷	-۱/۸۸	-۱/۸۹
	تفاضل اول	-۶/۲	-۶/۳۵	-۶/۲۸
ler-ei	سطح	۰/۷۶	-۰/۸۷	-۲/۶۱
	تفاضل اول	-۷/۰۷	-۷/۸۸	-۱۵/۰۲
مقادیر بحرانی در سطح ۱٪		-۲/۶۲	-۳/۷	-۴/۳۴

منبع: محاسبات محقق

مقادیر بحرانیِ آزمون پایایی در پایان جدول فوق ارائه شده است. همان طور که ملاحظـه می‌شود، همهٔ متغیرها در سطح یک درصد ناپایدارند. با این حال، تفاضـل اول آن‌هـا پایاسـت. به عبارت دیگر، همهٔ متغیرهای مورد بررسی ناپایا از رتبهٔ یک (I(1)) هستند.

۶. تعداد بهینهٔ وقفه‌های مدل

پیش از برآورد مدل و تحلیل نتایج، بررسی و تشخیص تعداد بهینـهٔ وقفـه‌هـا از اهمیـت ویژه‌ای برخوردار است. جدول ۳ نتایج حاصل از بررسی تعداد وقفه‌هارا نشان می‌دهد.

جدول ۳. معیارهای مختلف برای تعیین تعداد بهینهٔ وقفه‌های مدل

Lag	LogL	LR	FPE	AIC	SC	HQ
۰	۱۳۹/۳	NA	-۱۰e۵/۸۵	-۷/۱	-۶/۸	-۶/۹
۱	۳۶۲/۱	۳۷۵/۲	-۱۴e۱/۷۹	-۱۷/۵	-۱۶/۲	-۱۷/۰
۲	۴۰۷/۰	۶۳/۹	-۱۵e۶/۷۳	-۱۸/۵	-۱۶/۱	-۱۷/۷
۳	۴۷۹/۱	*۸۳/۵	-۱۶e۶/۸۵	-۲۱	*-۱۷/۵	-۱۹/۸
۴	۵۰۲/۵	۲۰/۹	-۱۵e۱/۱۳	-۲۰/۹	-۱۶/۴	-۱۹/۳
۵	۵۵۶/۱	۳۳/۸	*-۱۶e۵/۷۹	*-۲۲/۴	-۱۶/۸	*-۲۰/۴

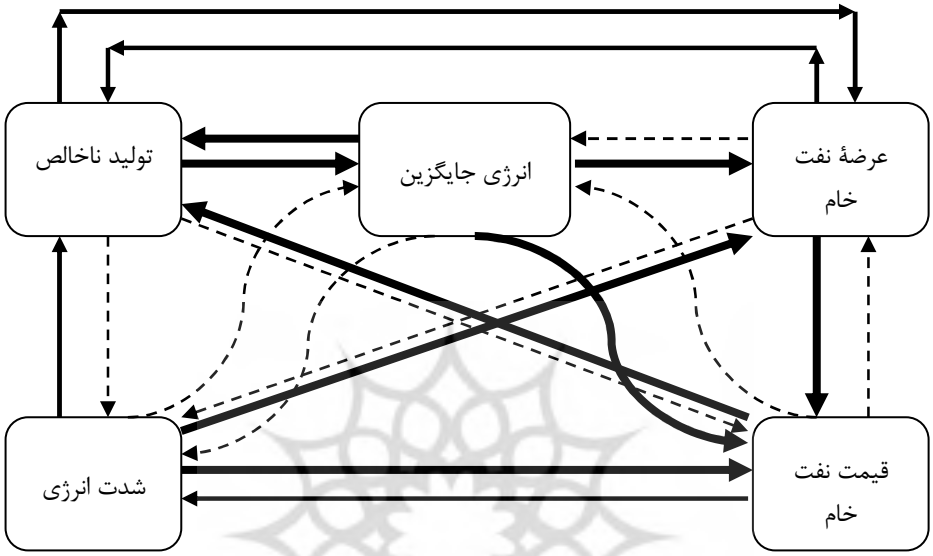
منبع: محاسبات محقق

همان طور که ملاحظه می‌شود، برخی از معیارهای معرفی‌شده در جدول ۳ سه وقفه را برای مدل پیشنهاد می‌کنند، در حالی که سایر معیارها پنج وقفه را، به عنوان وقفه‌های مناسب، پیشنهاد می‌کنند.

۷. تحلیل علیت بر مبنای رویکرد تودا و یاماموتو

با توجه به نتایج جدول ۳، معیارهای معرفی‌شده برای انتخاب وقفهٔ بهینه به دو دسته تقسیم می‌شوند: دو معیار از شش معیار ارائه‌شده، دو وقفه و سایر معیارها پنج وقفه را پیشنهاد می‌کنند. از آنجا که ملاکی قطعی برای انتخاب نتیجهٔ یکی از این دو گروه و رد گروه دیگر وجود ندارد، در این بخش نتایجِ هر دو گروه برای متغیرهای مرتبط با فرضه‌های این مطالعه بررسی می‌شود. همان طور که در بخش مدل منتخب اشاره شد، در روش تودا و یاماموتو، نخست وقفهٔ بهینهٔ مدل خودتوضیح برداری و حداکثر درجهٔ پایایی متغیرها مشخص می‌شود. پس از تشخیص موارد فوق، مدل خودتوضیح برداری با تعداد وقفه‌های معادل مجموع دو مقدار قبلی برآورد می‌شود و بر اساس آن، با استفاده از آمارهٔ والد، معنی‌داربودن علیت بین متغیرها بررسی خواهد شد. از آنجایی که معیارهای منتخب از نظر تعداد بهینهٔ وقفه‌ها به دو دسته تقسیم می‌شوند، آزمون مذکور بر اساس هر یک از این دو وقفه انجام شده و نتایج آن در ادامه ارائه شده است. نخست

نتایجِ مدل مبتنی بر چهار وقفه (سه وقفه برای تعداد بهینهٔ وقفه‌های مدل خودتوضیح برداری و یک وقفه نیز بر اساس حداکثر درجهٔ پایایی متغیرهای مدل) بررسی می‌شود.



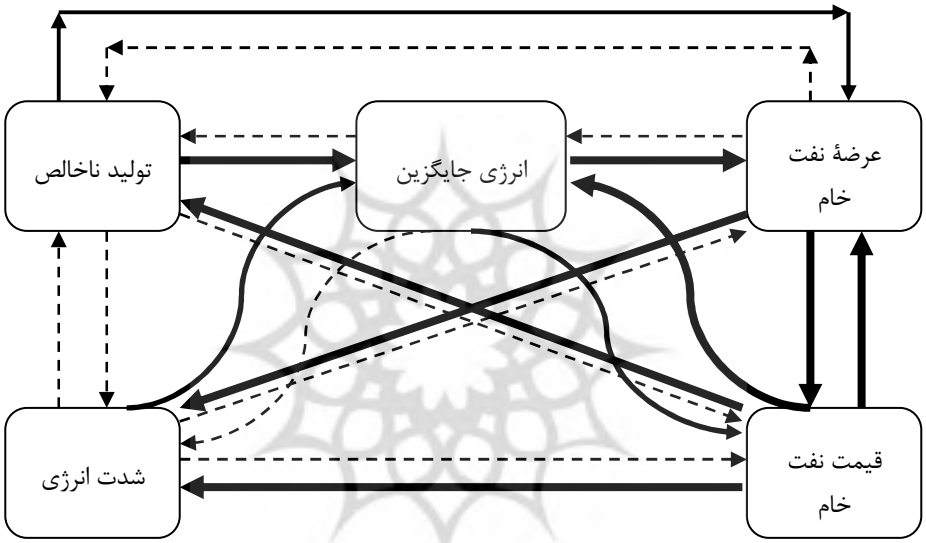
نمودار ۱. چرخهٔ علیت واقعی برای همهٔ متغیرهای مدل بر اساس چهار وقفه

منبع: تحلیل محقق

با اجرای آزمون‌های لازم، آثار واقعی و متقابل متغیرهای مدل به صورت نمودار 1 است. در این نمودار، خطوط پُررنگ‌تر معرّف روابط معنی‌دارترند. در عین حال، خطوط منقطع حاکی از وجود یک رابطهٔ ضعیف‌اند و برای سطوح احتمال کمتر از ۱۰ درصد نیز معنی‌دار نیستند. این نمودار به‌وضوح تأثیر معنی‌دار انرژی‌های جایگزین بر قیمت نفت خام را نشان می‌دهد، اما این تأثیر دوجانبه نیست. همچنین، رابطهٔ دوجانبه‌ای بین قیمت نفت خام و شدت مصرف انرژی وجود دارد. با این حال، تأثیر شدت مصرف انرژی بر قیمت نفت خام معنی‌دارتر است. در عین حال، رابطهٔ معنی‌داری بین شدت مصرف انرژی و انرژی‌های جایگزین مشاهده نمی‌شود. به عبارت دیگر، اگر انرژی جایگزین و مدیریت مصرف (برای کاهش شدت انرژی) دو ابزار در اختیار کشورهای عضو باشگاه

کمبود فرض شوند، این ابزارها تأثیر معنی‌داری بر قیمت نفت خام می‌گذارند و تأثیرگذاری متقابل قیمت نفت خام بر این دو ابزار ضعیف‌تر است.

از آنجا که برخی معیارهای انتخابِ وقفهٔ بهینه پنج وقفه را وقفه‌های مناسب معرفی کرده‌اند، در این بخش نتایج آزمون تودا و یاماموتو بر اساس شش وقفه (پنج وقفه برای مدل خودتوضیح برداری و یک وقفه برای حداکثر درجهٔ پایایی متغیرهای مدل) نیز بررسی شده است.



نمودار ۲. چرخهٔ علیت واقعی برای همهٔ متغیرهای مدل بر اساس شش وقفه

منبع: تحلیل محقق

بر اساس این نتایج، تأثیر عرضهٔ انرژی های جایگزین و تولید جهانی بر شدت مصرف انرژی معنی‌دار نیست. این نتایج با انتظارات محقق از تأثیرگذاری متغیرهای فوق بر شدت مصرف انرژی سازگار است. در نمودار ۲ نیز خطوط پُررنگ‌تر معرف روابط معنی‌دارتر است. نتایج به‌دست‌آمده حاکی از تأثیر معنی‌دار و متقابل قیمت نفت خام و انرژی های جایگزین است. همچنین، قیمت نفت خام بر شدت انرژی معنی‌دار است. با

این حال، تأثیر شدت مصرف انرژی بر قیمت نفت خام و همچنین تأثیر عرضهٔ انرژی جایگزین بر شدت مصرف انرژی معنی‌دار نیست.

۱.۷. مقایسهٔ نتایج دو گزینهٔ منتخب

با توجه به اینکه معیارهای معرفی وقفهٔ بهینه به دو گروه تقسیم شده و آزمون تودا و یاماموتو برای هر دو گروه انجام شده، سازگاری یا ناسازگاری نتایج این دو آزمون می‌تواند اهمیت زیادی داشته باشد. بدین منظور، چکیدهٔ نتایج در جدول ۴ ارائه شده است.

جدول ۴. مقایسهٔ نتایج حاصل از آزمون تودا و یاماموتو برای دو وقفهٔ بهینه

متغیر وابسته	متغیر مستقل	سه وقفه	پنج وقفه
LPCO	LAEC	✓	✓
LPCO	LER_EI	✓	
LAEC	LPCO		✓
LAEC	LER_EI		
LER_EI	LAEC		
LER_EI	LPCO	✓	✓

منبع: محاسبات محقق

جدول ۴ نشان‌دهندهٔ هماهنگی و سازگاری بالای نتایج دو آزمون مختلف تودا و یاماموتو برای چهار و شش وقفه است. هر دو آزمون تأثیر عرضهٔ انرژی‌های جایگزین بر قیمت نفت خام و همچنین تأثیر قیمت نفت خام بر شدت مصرف انرژی را تأیید می‌کنند. همچنین، هر دو آزمون تأثیر شدت مصرف انرژی بر عرضهٔ انرژی‌های جایگزین و برعکس را رد می‌کنند. نتایج دو آزمون برای تأثیرگذاری قیمت نفت خام بر عرضهٔ انرژی‌های جایگزین و همچنین شدت مصرف انرژی بر قیمت نفت خام متفاوت است. تأثیر قیمت نفت خام بر عرضهٔ انرژی‌های جایگزین تحت گزینهٔ چهار وقفه بی‌معنی، اما با افزایش وقفه‌ها به شش معنی‌دار شده است. علاوه بر این، تأثیر شدت مصرف انرژی بر قیمت نفت خام تحت چهار وقفه معنی‌دار است، اما با افزایش تعداد وقفه به شش این تأثیر بی‌معنی تشخیص داده شده است.

۸. نتیجه‌گیری

در این مقاله، تأثیر قیمت نفت خام بر توسعهٔ انرژی‌های جایگزین بررسی شد. بدین منظور، از داده‌های سال ۱۹۶۹ تا ۲۰۱۱ استفاده شد. نتایج به‌دست‌آمده برای دورهٔ مورد بررسی تأثیر متقابل قیمت نفت خام و عرضهٔ (تولید) انرژی‌های جایگزین و همچنین شدت مصرف انرژی را تأیید می‌کند. نکتهٔ حائز اهمیت اینکه تأثیر عرضهٔ انرژی‌های جایگزین بر قیمت نفت خام مستقل از تعداد وقفهٔ بهینه تأیید می‌شود، لیکن تأثیر قیمت نفت خام بر عرضهٔ انرژی‌های جایگزین متأثر از معیار منتخب برای تعداد بهینهٔ وقفه‌هاست. از سوی دیگر، با اعتماد به معیارهایی که تعداد وقفه‌های پایین را توصیه می‌کنند، تأثیر متقابل انرژی‌های جایگزین و شدت مصرف انرژی تأیید نمی‌شود. با این حال، در وقفه‌های بالا این تأثیر از شدت مصرف انرژی به انرژی‌های جایگزین معنی‌دار بوده است. در نهایت، تأثیر متقابل قیمت نفت خام و شدت مصرف انرژی نیز مستقل از تعداد بهینهٔ وقفه‌ها تأیید می‌شود. این در حالی است که در وقفه‌های پایین تأثیر شدت مصرف انرژی بر قیمت نفت خام معنی‌دارتر و برای وقفه‌های بالا نتایج معکوس بوده است. هرچند بر اساس نتایج فوق می‌توان سیاست‌های معینی را برای کشورهای صادرکنندهٔ نفت خام تجویز کرد، مطالعات تکمیلی برای بهره‌برداری دقیق از نتایج این مطالعه توصیه می‌شود.

منابع

۱. آرمن، سیدعزیز و زارع، روح‌الله (۱۳۸۴). «بررسی رابطهٔ علیت گرنجری بین مصرف انرژی و رشد اقتصادی در ایران طی سال‌های ۱۳۴۶ـ۱۳۹۱»، پژوهش‌های اقتصادی ایران، ۲۴، ۱۱۷ـ۱۴۳.

۲. ابریشمی، حمید و مصطفایی، آذر (۱۳۸۰). «بررسی رابطه بین رشد اقتصادی و مصرف فرآورده‌های عمدهٔ نفتی در ایران»، دانش و توسعه، ۱۴، ۱۱ـ ۴۵.

۳. فطرس، محمدحسن و همکاران (۱۳۸۷). «بررسی رابطهٔ علّی بین تولید داخلی و مصرف الکتریسیته با استفاده از روش تودا و یاماموتو در ایران (۱۹۶۷ ـ ۲۰۰۶)»، دانش و توسعه، ۲۵، ۱۶۹ ـ ۱۸۹.

۴. محمدی، تیمور، بردبار، آزاده و دقیقی اصل، علیرضا (۱۳۹۱). «بررسی علیت متقابل رشد اقتصادی و مصرف گاز طبیعی در ایران»، اقتصاد محیط زیست و انرژی، ۱(۳)، ۸۹ ـ ۱۰۶.

۵. ملکی، رضا (۱۳۷۸). «بررسی رابطه بین مصرف انرژی و رشد اقتصادی در ایران»، پایان‌نامهٔ کارشناسی ارشد، دانشگاه شهید بهشتی تهران.

6. Bentley, R.W. (2002). Global Oil & Gas Depletion: An Overview, Energy Policy, 30,189-205

7. Engle, R.F. & Granger, C.W.J. (1987). Co integrated and Error Correction, Representation Estimation and Testing, Econometrica, 55, 251-276.

8. Geweke, J. (1984). Inference and Causality in Economic Time Series Models, Handbook of Econometrics, 2.

9. Granger, C.W.J. (1986). Development in the Study of Co integrated Economic Variables, Oxford Bulletin of Economics and Statistics, 48, 213-228.

10. Granger, C.W.J. (1988). Some Recent Development in a Concept of Causality, Journal of Econometrics, 39, 199-211.

11. Prabhas, C. Sinha (2009). Handbook of Alternative Energy, SBS Publishers & Distributors Pvt, Ltd, New Delhi.

12. Toda, H.Y. & Yamamoto, T. (1995). Statistical Inference in Vector Auto regressions with possibly Integrated Processes, Journal of Econometrics, 66, 225-250.

13. Wolde Rufael, Y. (2005). Energy Demand and Economic Growth: The African Experience, Journal of Policy Modeling, 27, 891-903.

14. Yoo, S.H. (2005). Electricity Consumption and Economic Growth: Evidence from Korea, Energy Policy, 33, 1627-1632.

15. Zapata, H.O. & Rambaldi, A.N. (1997). Monte-Carlo Evidence on Co integration and Causation, Oxford Bulletin of Economics and Statistics, 59, 285-298.

16. US energy information administration (http://eia.doe.gov)

17. International Energy Agency (www.iea.org)

18. http://www.opec.org.