پژوهشنامه اقتصاد انرژی ایران
سال هشتم، شماره ۳۱، تابستان ۱۳۹۸ صفحات ۳۰-۱
نوع مقاله: پژوهشی

تحلیل پویای جایگزینی بین سوختی در نیروگاه‌های فسیلی منتخب ایران

حمید آماده[۱]
حسین توکلیان[۲]
مهدی هدایتی‌نیا[۳]

تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۰۲/۱۶ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۰۳/۲۷

چکیده

تقاضای روزافزون سوخت‌های فسیلی در کنار آلودگی‌های محیطی تولیدشده از مصرف آنها، استفاده بهینه از این سوخت‌ها را ضروری می‌کند. در فصول سرد، مصرف گاز طبیعی افزایش می‌یابد و نیروگاه‌های کشور جهت تأمین برق به جانشینی سوخت مصرفی خود اقدام می‌کنند. این تحقیق جانشینی بین سوخت‌های مصرفی را جهت تولید برق در شش شرکت برق منطقه‌ای منتخب، طی سال‌های ۱۳۹۵-۱۳۸۶ مورد ارزیابی قرار داده است. معادلات سهم هزینه‌ای سوخت‌های متعارف در تولید برق با استفاده از برآوردگر معادلات رگرسیونی به‌ظاهر نامرتبط (SURE) برآورد شده‌اند. با استفاده از نتایج حاصل از برآورد، معادلات کشش‌های جانشینی متقاطع وخودی قیمتی انواع سوخت‌های مصرفی محاسبه شده‌اند. طبق نتیجه محاسبات، همه کشش‌های خودی قیمتی، منفی و همه کشش‌های متقاطع قیمتی، مثبت می‌باشند. کشش جانشینی بین گاز طبیعی و گازوئیل ۱/۵۶ و کشش جانشینی بین گاز طبیعی و مازوت ۱/۳ بدست آمده است. همچنین با استفاده از کشش‌های محاسبه شده، جایگزینی بین سوخت‌ها با هدف کاهش انتشار CO_2 وکاربردی‌سازی نتایج انجام شده و نشان داده است که جایگزینی مازوت با گاز طبیعی منجر به کاهش انتشار CO_2 می‌شود اما جایگزینی گازوئیل با گاز طبیعی انتشار CO_2 را افزایش می‌دهد.

طبقه‌بندی JEL: C31, D51, Q11

کلیدواژه‌ها: شرکت برق منطقه‌ای، رگرسیون‌های به‌ظاهر نامرتبط (SURE)، کشش جانشینی، جایگزینی بین سوختی

۱. دانشیار دانشکده ، دانشگاه علامه طباطبائی (نویسنده مسئول) amadeh@gmail.com
۲. استادیار دانشکده اقتصاد دانشگاه علامه طباطبائی tavakolianh@gmail.com
۳. دانش‌آموخته اقتصاد انرژی دانشگاه علامه طباطبائی hedayatimehdi.mh@gmail.com

۱. مقدمه

نقش انرژی به‌عنوان یکی از ارکان زندگی بشر در رشد و پیشرفت اقتصادی کشورها چشمگیر است، طوری که امروزه از آن به عنوان پیش‌نیاز رشد و توسعه اقتصادی یاد می‌شود و میزان تولید و مصرف آن شاخص رشد و توسعه اقتصادی جوامع تلقی می‌شود. با گسترش فعالیت‌های اقتصادی و رشد تولید، تقاضا برای حامل‌های انرژی روزبه‌روز بیشتر می‌شود. بر این اساس با توجه به نقش انرژی در ساختار اقتصادی و اجتماعی و محدودیت منابع انرژی فسیلی و تجدیدناپذیری آن‌ها و همچنین افزایش رشد جمعیت و افزایش در مصرف حامل‌های انرژی و انتشار آلاینده‌های ناشی از مصرف آنها، استفاده بهینه از حامل‌های انرژی جایگاه ویژه‌ای می‌یابد. به‌منظور جلوگیری از گسترش مشکلات ناشی از مصرف نادرست و ناکارآمد حامل‌های انرژی، لازم است سیاست‌های مناسبی برای بهینه‌سازی مصرف انرژی اتخاذ شود. همچنین تدابیر خاصی در جهت صرفه‌جویی و کاهش مصرف حامل‌های انرژی به منظور کاهش آلایندگی ناشی از آن و گسترش مصرف حامل‌های انرژی که آلایندگی کمتری دارند، ،اندیشیده شود.

علاوه بر این هر ساله با کاهش دما در فصل سرما و افزایش مصرف گاز طبیعی در بخش‌های تجاری و خانگی، تأمین گاز طبیعی نیروگاه‌ها با مشکلات فراوان روبه‌رو می‌شود. به همین دلیل یکی از مشکلات تأمین سوخت تولید برق شرایط گازرسانی به شرکت‌های برق منطقه‌ای است که در فصل سرما با مشکلات زیادی همراه است. در این شرایط اغلب سوخت‌های مایع و بخصوص مازوت جایگزین گاز طبیعی می‌شود. این در حالی است که در برخی سال‌ها سیاست دولت افزایش صادرات مازوت و گازوئیل بوده است و حتی برنامه کاهش تحویل و عرضه سوخت مایع به نیروگاه‌ها نیز دنبال شده است. این کاهش عرضه سوخت مایع به بخش نیروگاهی کشور با هدف جایگزین کردن گاز طبیعی به جای سوخت‌های مایع، انجام شده است. اما در مناطق سردسیر و در فصل سرما این جایگزینی با مشکلاتی همراه است. برای مثال شرکت‌های برق منطقه‌ای آذربایجان، گیلان و مازندران که دمای هوا در فصل سرما در این مناطق پایین است، در تأمین گاز طبیعی با مشکل روبه‌رو می‌شوند و این جایگزینی سوخت به‌درستی صورت نمی‌گیرد. نکته

مهم این است که سوخت‌های مایع بخصوص مازوت آلاینده‌های هوای بیشتری تولید می کنند، طوری که بخشی از آلودگی شدید هوا در شهرهای بزرگ از جمله تهران به جایگزینی سوخت‌های مایع به جای گازطبیعی در نیروگاه‌های اطراف نسبت داده می‌شود.

در این راستا شناخت و بررسی الگوی تقاضا و مصرف حامل‌های انرژی و ساختار جایگزین‌سازی آنها اهمیت بسیاری دارد. به همین دلیل بررسی و برآورد تجربی تقاضای حامل های انرژی در بخش های مختلف اقتصادی همواره در رأس برنامه های مطالعاتی محققان اقتصاد انرژی بوده است. برآورد و پیش‌بینی تقاضای انرژی در بخش های مختلف اقتصادی و بررسی واکنش مصرف کنندگان نسبت به متغیرهایی مانند قیمت حامل‌های انرژی، ارزش‌افزوده بخش‌های اقتصادی و سایر عوامل می‌تواند به سیاست گذاران در تصمیم گیری‌های اقتصادی مرتبط با حامل‌های انرژی کمک کند. به لحاظ تفاوتی که بخش‌های مختلف اقتصادی از نظرساختار مصرف و تقاضای حامل‌های انرژی دارند، در اکثر مطالعات صورت گرفته در زمینهٔ تقاضای انرژی، بخش‌های اقتصادی از یکدیگر تفکیک گردیده‌اند. با توجه به جایگاه و نقش نیروگاه‌ها در مصرف حامل‌های مختلف انرژی و سهم بالای آنها در انتشار آلاینده‌های هوا، در این مطالعه الگوسازی مصرف انواع سوخت‌ها در بخش نیروگاهی کشور و تحلیل جایگزینی بین سوخت‌های مصرفی در تولید برق مدنظر قرار گرفته است. نتایج این الگوسازی می‌تواند به چگونگی انتخاب ترکیب سوخت‌های مختلف در تولید برق کمک کند. این نتیجه بخصوص وقتی اهمیت بیشتری می‌یابد که به انتشار آلاینده‌های هوا ناشی از مصرف سوخت‌ها توجه شود. محتوای کربن و آلایندگی در سوخت های مختلف، متفاوت است و به همین دلیل با تغییر در ترکیب سوخت‌ها می‌توان ضمن حفظ سطح تولید برق، انتشار آلاینده‌های هوا را کاهش داد. کاربردی‌سازی نتایج برآورد اقتصادسنجی ، محاسبات کشش‌ها در سیاست گذاری و پویا در نظر گرفتن معادلات از ویژگی‌های این پژوهش است که در پژوهش‌های قبلی مورد توجه قرار نگرفته است. با این هدف این تحقیق در شش بخش تدوین شده است. در بخش دوم مبانی نظری پژوهش و مطالعات داخلی و خارجی مرتبط با موضوع مورد بررسی قرار گرفته است. در بخش سوم روش و الگوی مورد استفاده در الگوسازی ارائه شده است.

نتایج برآورد و محاسبات کشش‌های جانشینی و تحلیل نتایج در بخش چهارم آورده شده و در بخش آخر نتیجه‌گیری و پیشنهادات کاربردی ارائه گردیده است.

۲. مبانی نظری

طبق نظریه رفتار تولیدکننده، تولیدکننده عوامل تولید را طوری با یکدیگر ترکیب می‌کند که تولید با حداقل هزینه همراه باشد. به همین دلیل هزینه‌های تولید که تحت تأثیر مقدار مصرف عوامل تولید و قیمت آنهاست، برای تولیدکننده و نیز کل جامعه از اهمیت بسیاری برخوردار است.[۱] یک نکته مهم که در نظریه تولید و بهینه‌سازی‌های معمول به آن توجه نمی‌شود، این است که فرایند تولید همواره با انتشار آلاینده‌های محیط زیست همراه است. این موضوع بخصوص زمانی اهمیت بیشتری می‌یابد که تولید، نیازمند مصرف مقادیر زیادی از سوخت‌های فسیلی باشد و سبب افزایش انتشار آلاینده‌های هوا شود. در این شرایط در برنامه‌ریزی مصرف سوخت‌های فسیلی بایستی به این مهم توجه داشت. با توجه به اینکه آلاینده‌های محیط زیست در نظریه تولید اثرات خارجی تلقی می‌شوند و درنتیجه در فرایند بهینه‌سازی تولید مورد توجه قرار نمی‌گیرند، لازم است این موضوع در تحلیل‌های ثانویه و تنظیم سیاست‌ها مد نظر قرار گیرد.

مطابق ادبیات نظریه تولید، تابع تولید تابعی است که حداکثر محصول را برای ترکیب‌های مختلف عوامل تولید نشان می‌دهد. چنانچه عوامل تولید سرمایه، نیروی کار و انرژی در نظر گرفته شوند، بیان عمومی تابع تولید به شکل زیر خواهد بود:

$$Q = f(K, L, E)$$

که در آن K نهاده سرمایه، L نهاده نیروی کار و E نهاده کل انرژی می‌باشد. نهاده انرژی می‌تواند شامل انواعی از سوخت‌ها باشد. فرض می‌شود تابع تولید برای عوامل تولید تفکیک‌پذیر است. فرض تفکیک‌پذیری دلالت بر این دارد که نرخ نهایی جانشینی فنی بین سوخت‌ها مستقل از نیروی کار یا سرمایه است. علاوه بر این فرض می‌شود تابع تولید هموتتیک است. بر اساس آن می‌توان نشان داد که واکنش تابع هزینه به قیمت‌های عوامل

---

۱. محتشم دولتشاهی، (۱۳۹۰)

تولید از جمله سوخت‌ها و تولید جدا از یکدیگر هستند. اگر تابع تولید ویژگی‌های نظری مطلوب را دارا باشد و تولیدکننده به‌صورت کارا از عوامل تولید استفاده کند، این عوامل را به‌گونه‌ای ترکیب خواهد کرد که هزینه تولید ذیل را حداقل کند.

$$C=\sum_{i=1}^{n} p_i x_i$$

در معادله بالا x_i نماینده عامل تولید iام و p_i قیمت عامل تولید iام است. مطابق ادبیات اقتصاد تولید، با تغییر نسبت قیمت عوامل تولید، شیب هزینه همسان و در نتیجه ترکیب عوامل تولید نیز تغییر می‌کند. این نکته را در این پژوهش می‌توان این طور بیان کرد که با تغییر در قیمت نسبی سوخت‌ها، نسبت استفاده از انواع سوخت نیز تغییر خواهد کرد. با حداقل کردن هزینه تولید مشروط به مقدار تولید معین، توابع تقاضای عوامل تولید به صورت کلی زیر به دست خواهند آمد:

$$x_i= f_i(p_1 , \ldots, p_n , \bar{y})$$

با قرار دادن توابع تقاضای عوامل تولید در معادله هزینه، تابع هزینه به صورت تابعی از قیمت‌های عوامل تولید و سطح محصول به دست می‌آید[1]:

$$C= f(p_1 , \ldots, p_n , \bar{y})$$

بر این اساس با در دست داشتن تابع هزینه و با استفاده از لم شفارد می‌توان با مشتق‌گیری از تابع هزینه نسبت به قیمت هر عامل تولید، تقاضای آن را به دست آورد. فرض تفکیک‌پذیری ضعیف و هموتتیک بودن اجازه می‌دهد تابع هزینه جداگانه‌ای برای واکنش به بردار خاصی از عوامل درنظر گرفت:

$$Ce = g(p)$$

تابع هزینه Ce نسبت به p غیرکاهنده، محدب و پیوسته و همگن از درجه یک است. این بردار خاص عوامل تولید، می‌تواند انواع سوخت یا حامل‌های انرژی مصرف در تولید باشد. لم شفارد تقاضای بردار عوامل تولید را به دست می‌دهد:

$$x_i(p)=\frac{\partial g(p)}{\partial w_i}$$

---

۱. اعمی بنده‌قرائی و دیگران، (۱۳۸۸)

جانشینی بین عوامل تولید که در اثر تغییر در قیمت‌های نسبی آنها ایجاد می‌شود، منجر به تغییر در میزان استفاده از عوامل تولید ضمن حفظ سطح تولید معین می‌شود. در این زمینه کشش‌های جانشینی مفهوم می‌یابند. طبق تعریف کشش جانشینی بین دو عامل تولید، تغییر در تقاضای یک عامل تولید را در نتیجه تغییر قیمت دیگری نشان می‌دهد. مطالعات تجربی نیز نشان داده‌اند با افزایش قیمت حامل‌های انرژی، سطح مصرف حامل‌های انرژی مختلف تغییر می‌کند.[1] جایگزینی بین سوخت‌های مصرفی در تولید برق در نیروگاه‌ها را می‌توان برهمین اساس تحلیل کرد. برای مثال در صورتی‌که دو حامل انرژی نفت کوره و گازطبیعی به عنوان عوامل تولید جانشین مدنظر باشند، کشش جانشین بین آنها مثبت است که نشان می‌دهد در صورت افزایش قیمت یکی، مصرف دیگری افزایش می‌یابد. مطابق تعریف اگر دو عامل تولید مکمل یکدیگر باشند، کشش جانشینی آنها منفی است که نشان می‌دهد در صورت افزایش قیمت یکی از آنها، تقاضا و مصرف عامل تولید دیگر کاهش می‌یابد. در این چهارچوب، علت تغییر در تقاضای هر عامل تولید، تغییر در قیمت نسبی عوامل تولید است. بر این اساس با تغییر در قیمت سوخت آلاینده نسبت به سوخت پاکتر، می‌تواند بین این دو جانشینی صورت گیرد. نکته مهم و کاربردی این است که این تغییر بهتر است در جهتی باشد که منجر به کاهش انتشار آلاینده‌های محیط زیست باشد. در زمینه تغییر در مصرف عوامل تولید و ازجمله سوخت، فناوری و ساختار تولید نیز مؤثر است اما با توجه به این که تغییر در فناوری تولید معمولاً در بلندمدت رخ می‌دهد و زمان‌بر است، در این تحقیق برای تحلیل جایگزینی بین سوخت‌ها، فناوری ثابت در نظر گرفته می‌شود.

چنانچه قیمت‌های نسبی سوخت‌ها با تغییرات زیاد مواجه شود، نظریه اقتصادی و تجربه کشورها نشان داده است که احتمال جانشینی انواع سوخت پررنگ می‌شود. با توجه به اینکه سوخت‌های فسیلی عامل اصلی انتشار آلاینده‌های هوا هستند و نیز با توجه به این نکته که ظرفیت گرمایی و شاخص انتشار آلاینده انواع سوخت‌های فسیلی متفاوت است، انتظار می‌رود با تغییر در ترکیب سوخت‌های مصرفی تولید برق در نتیجه تغییر قیمت‌های

۱. شاهمرادی و دیگران، (۱۳۸۸)

سوخت‌های مصرفی، انتشار آلاینده‌ها نیز با تغییر مواجه شود. در این صورت امکان افزایش یا کاهش انتشار برخی آلاینده‌های هوا وجود خواهد داشت. این تغییر چنانچه در جهت کاهش باشد، جایگزینی بین سوختی را می‌توان مثبت و مطلوب از نظر محیط زیستی تلقی نمود.

پدیده تغییر الگوی تقاضای حامل‌های انرژی که جانشینی بین سوخت‌ها[1] نیز نامیده می‌شود، ناشی از تغییر فرایند مصرف به سمت استفاده از سوخت‌هایی است که با افزایش کمتری در قیمت مواجه هستند. چگونگی تغییر در قیمت نسبی انواع سوخت، نقش تعیین‌کننده‌ای در وقوع این پدیده دارد. این پدیده در اغلب کشورهای دنیا به‌نوعی تجربه شده است. برای نمونه می‌توان به جایگزینی گازوئیل به جای بنزین در مالزی[2]، جانشینی برق به‌جای گازوئیل در ترکیه و اندونزی[3] اشاره کرد. نکتهٔ مهم قابل توجه آن است که ضرایب انتشار آلاینده‌ها در مورد سوخت‌های مختلف متفاوت است. ازاین‌رو جانشینی بین سوخت‌ها و تغییر ترکیب مصرف سوخت ممکن است ترکیب کلی انتشار آلاینده‌ها را تحت تأثیر قرار دهد.[4]

بهبهانی فرد (۱۳۸۳) در پژوهش «بررسی عوامل مؤثر بر تقاضای انواع انرژی در بخش صنعت استان اصفهان و تخمین کشش‌های جایگزینی بین آن‌ها» برای برآورد معادلات سهم سوخت در صنایع اصفهان از مدل لاجیت دومرحله‌ای استفاده کرد. در مرحلهٔ اول، وی تابع تقاضای انرژی بخش صنعت را با استفاده از روش حداقل مربعات برآورد کرده و نتیجه می‌گیرد که ارزش‌افزوده بخش صنعت، رابطهٔ مستقیم با تقاضای انرژی در این بخش دارد. در مرحلهٔ دوم، با بهره‌گیری از مدل لاجیت و برآوردگر معادلات به‌ظاهر نامرتبط[5] (SURE) و استفاده از سیستم پویای مصارف و سهم حامل‌های انرژی برای تخمین معادلات سهم سوخت، نتیجه می‌گیرد گاز طبیعی جایگزین مناسبی برای زغال‌سنگ و برق می‌باشد که البته این تناسب جایگزینی دربارهٔ زغال‌سنگ بیشتر است.

1. Inter-Fuel Substitution
2. Ben, W. A. (1986)
3. Hope, E.(1995)
4. Singh, A. (2010)
5. Seemingly Unrelated Regression Estimator

مرزبان و همکاران (۱۳۸۴) در مطالعه «بررسی تقاضا برای انواع سوخت و جانشینی بین آن‌ها در نیروگاه‌های حرارتی تولید برق کشور (۱۳۸۰-۱۳۵۳)» که با هدف بررسی جایگزین کردن انواع سوخت‌های گازوئیل، نفت کوره و گاز طبیعی با یکدیگر در نیروگاه‌های حرارتی تولید برق ایران صورت گرفت، از تابع هزینه کوتاه‌مدت غیر همگن ترانسلاگ استفاده کرد. نتایج مطالعه وی نشان داد که ضریب بار، یک متغیر اثرگذار بر تقاضای سوخت است و مقادیر سهم سوخت‌ها نسبت به تغییر ضریب بار با کشش هستند. همچنین وی نتیجه گرفت که رابطهٔ جایگزینی ضعیفی بین سوخت‌ها وجود دارد و تقاضای انواع سوخت نسبت به قیمت آن‌ها بی‌کشش است.

صمدی (۱۳۸۷) توابع تقاضای ایستا و پویای برق در ایران طی سال‌های ۱۳۷۲-۱۳۴۶ در بخش‌های خانگی، تجاری و عمومی، صنعتی و کشاورزی را به روش حداقل مربعات برآورد کرد و کشش‌های قیمتی و کشش‌های درآمدی تقاضا در کوتاه‌مدت و بلندمدت را بدست آورد. مقادیر محاسبه‌شده نشان‌دهنده کم‌کشش بودن تقاضای مشترکین نسبت به تغییرات قیمت برق در کوتاه‌مدت و بلندمدت بود که وی علت آن را پایین بودن قیمت واقعی برق عنوان کرده است.

اشراق‌نیای جهرمی و ایقانی یزدلی (۱۳۸۷) به بررسی جانشینی گاز طبیعی به جای فرآورده‌های نفتی در ایران پرداختند. براساس نتایج، کشش‌های قیمتی متقاطع به‌دست آمده حکایت از جانشینی گاز طبیعی به جای فرآورده‌های نفتی در گذشته و حال داشتند، اما به دلیل کوچک بودن مقدار عددی کشش‌ها، روند این جانشینی کند است. آنها نتیجه گرفتند که در ایران، مانع اصلی حرکت سریع به سوی جانشینی گاز طبیعی به جای فرآورده‌های نفتی، پایین بودن سطح قیمت فرآورده‌های نفتی و هدفمند نبودن یارانه‌ها و عدم ایجاد بسترهای لازم برای حرکت به سوی استفاده از گاز طبیعی است.

آرسنال، برنارد و لاپلان[1] (۱۹۹۵)، تابع تقاضای انرژی بخش خانگی ایالت کبک کانادا را طی سال‌های ۱۹۶۲ تا ۱۹۹۰ با روش OLS برآورد کردند. در این تحقیق تقاضای کل انرژی در دو سطح مدل سازی شد. در اولین سطح، سهم نسبی بازار هر حامل انرژی برای هر

1. Arsenault, Bernard and Laplante.

بخش، تابعی از قیمت‌های نسبی حامل‌های مختلف انرژی در نظر گرفته شد. در سطح دوم، تقاضای کل انرژی برای هر بخش اقتصادی به‌عنوان تابعی از قیمت واقعی انرژی، درآمد واقعی و تعداد روزهای گرم سال که معیاری از میزان حرارت است در نظر گرفته شد. نتایج نشان داد تقاضای انرژی در بخش خانگی در کوتاه‌مدت و بلندمدت نسبت به قیمت بی‌کشش و ضریب کشش قیمتی در کوتاه‌مدت کمتر از مقدار متناظر آن در بلندمدت است.

هاس و شیپر[1] (۱۹۹۸) تقاضای انرژی در بخش خانگی را برای کشورهای عضو شورای همکاری اقتصادی و توسعه برآورد کردند و آن را تابعی از قیمت انرژی، درآمد قابل تصرف واقعی، درجهٔ حرارت روزانه و مصرف انرژی با یک وقفه زمانی در نظر گرفتند. نتایج نشان داد کشش‌های قیمتی و درآمدی در بلندمدت از مقدار متناظر خود در کوتاه‌مدت بزرگ‌ترند. کشش‌های درآمدی و قیمتی در کوتاه‌مدت و بلندمدت کوچک‌تر از واحد می‌باشند، به استثنای کشش درآمدی بلندمدت برای ژاپن و استرالیا.

کابودان و لیو[2] (۲۰۰۴) با روش برنامه‌ریزی ژنتیک (GP) سیستم معادلات چند رگرسیونی تقاضای کوتاه‌مدت کشور امریکا برای گاز طبیعی را پیش‌بینی کردند و مصرف گاز هر چهار بخش خانگی، تجاری، صنعتی و حمل‌ونقل را برآورد کردند. در مدل آن‌ها تقاضای هر بخش تابعی از قیمت گاز، قیمت سوخت جایگزین، شرایط اقتصادی و متغیر دما است. در بخش خانگی کشش قیمتی ۰/۲۷-، کشش قیمتی جانشینی ۱/۳۵، کشش درآمدی ۱/۶۵، و حساسیت مصرف‌کننده به تغییرات آب و هوایی زمستان ضعیف و در حدود ۰/۴۹ به دست آمد.

فیوریتو[3] (۲۰۱۱)، در مطالعه‌ای با استفاده از داده‌های بانک اطلاعاتی نهاده‌های تولید اروپا، به رابطه مکملی یا جانشینی بسیار ضعیف رسید، که البته رابطه مکملی در کشورهای آلمان، اسپانیا و انگلیس بسیار قوی است. فیوریتو بر مبنای محاسبات انجام شده نتیجه می‌گیرد که انرژی ارزان اما با عرضه کم منجر به کاهش استفاده از سرمایه و به‌تبع آن کاهش تولید می‌گردد.

1. Huas and Schipper.
2. Kaboudan, M.A., Liu, Q.W.
3. Fiorito

۳. روش‌شناسی

روش معمول در الگوسازی تجربی تقاضای عوامل تولید این است که تابع هزینه تعیین می‌شود و معادلات تقاضای موردنظر با استفاده از لم شفارد بدست می‌آید. شکل تابعی که اغلب به کار برده می‌شود ترانسلاگ است. نتیجه این روش برآورد توأمان توابع تقاضا است.

با توجه به معمول بودن مصرف سه سوخت گازوئیل، گاز طبیعی و مازوت در تولید برق در نیروگاه‌ها، معادلات سهم هزینه‌ای حامل‌های انرژی به شکل عمومی زیر قابل بیان هستند.

$$S_t^{go} = f(S_{t-1}^{go}.p_t^{go}.p_t^{m}.p_t^{ng})$$

$$S_t^{m} = f(S_{t-1}^{m}.p_t^{m}.p_t^{go}.p_t^{ng})$$

$$S_t^{ng} = f(S_{t-1}^{ng}.p_t^{ng}.p_t^{go}.p_t^{m})$$

که در آن S نمایان گر سهم هزینه‌ای هر سوخت، p نماینده شاخص قیمت حامل‌های انرژی و اندیس‌های ng، m و go به ترتیب نماد سوخت‌های گاز طبیعی، نفت کوره یا مازوت و گازوئیل هستند. در معادلات بالا که به معادلات سهم موسوم هستند، وارد کردن متغیرهای قیمت سوخت از لم شفارد نتیجه می‌شوند. وارد کردن متغیر سهم هزینه‌ای سوخت با وقفه در سمت راست نیز با هدف پویا نمودن معادله انجام شده است. حضور متغیر وابسته با وقفه در سمت راست معادلات سهم به این دلیل بوده است که امکان تعدیل سریع در نوع انرژی مصرفی در بخش نیروگاهی و به‌طور کل در کلیه بخش‌های اقتصادی وجود ندارد و تغییر نوع انرژی مصرفی با نوعی چسبندگی به گذشته همراه است.

از آنجا که به‌طور معمول قرینگی ضرایب متناظر قیمت سوخت‌ها (قید تقارن) در معادلات سهم مصرفی سوخت‌ها برای هر بخش پذیرفته می‌شود، حاصل جمع ضرایب قیمت سوخت‌ها در هر معادله سهم، در تمام معادلات صفر خواهند بود. بدین ترتیب، معادلات سهم سوخت‌ها در یک بخش اقتصادی از یکدیگر مستقل نبوده و در نتیجه کوواریانس جملات اخلال معادلات سهم حامل های انرژی صفر نخواهد بود. بدیهی است این شرایط استفاده از برآوردگر $SURE$ را توجیه نموده و نشان می‌دهد برآورد جداگانه هریک از معادلات سهم به عدم کارایی برآوردگرها خواهد انجامید.

با توجه به اینکه جمع هزینه سوخت‌های مصرفی کل هزینه سوخت را در بر می‌گیرد، می‌توان یکی از معادلات سهم را حذف کرد و سیستم معادلات را برآورد کرد. بر این اساس اگر معادله سهم دو سوخت را بتوان محاسبه نمود، سهم سوخت سوم با کسر مجموع سهم دو سوخت پیش‌گفته از عدد ۱ به دست خواهد آمد. بر این اساس در برازش معادلات سهم سوخت‌ها در سبد انرژی مورد استفاده در نیروگاه‌ها، معادله سوخت نفت کوره می‌تواند حذف شود. بدیهی است در معادلات سهم دو سوخت دیگر (گاز طبیعی و نفت گاز) باید شاخص قیمت نفت کوره وجود داشته باشد. به همین دلیل در توابع سهم هزینه به جای استفاده از قیمت مطلق انواع سوخت، می‌توان از قیمت نسبی آن‌ها استفاده کرد. در این صورت بیان عمومی معادلات سهم سوخت‌ها عبارت است از:

$$S_{it} = f(S_{it-1}, \frac{p_{it}}{p_{jt}})$$

که در آن $\frac{p_{it}}{p_{jt}}$، نسبت قیمت سوخت‌ها به قیمت سوختی است که حذف شده است می‌باشد. با توجه به حذف معادله سهم مازوت از سیستم، در شکل تابعی بالا، قیمت‌های نسبی به صورت نسبت قیمت هر سوخت به شاخص قیمت نفت کوره استفاده شد. در نهایت الگوی معادلات سهم سوخت‌های مورد نظر به‌صورت زیر خواهد بود:

$$S_t^{go} = f(S_{t-1}^{go}, \frac{p_t^{go}}{p_t^m}, \frac{p_t^{ng}}{p_t^m})$$

$$S_t^{ng} = f(S_{t-1}^{ng}, \frac{p_t^{ng}}{p_t^m}, \frac{p_t^{go}}{p_t^m})$$

در این حالت برآورد ضرایب معادله سهم سوخت حذف‌شده به‌آسانی قابل دستیابی است. در واقع سوختی که معادله سهم آن از سیستم معادلات حذف شده‌است، به شکلی غیرمستقیم در الگو حضور دارد. برای اطمینان از برقراری ویژگی‌های تابع تقاضای کلاسیک، باید قیود تقاضای کلاسیک بر معادلات سهم‌ها تحمیل گردد. معادلات سهم بدون اعمال قیود تقارن و بودجه به قرار ذیل هستند:

$$S_{go} = \alpha_1 + \beta_1 * S_{go}(-1) + \beta_2 * \left(\frac{p_{go}}{P_m}\right) + \beta_3 * \left(\frac{p_{ng}}{P_m}\right) + \beta_4 * D_{89-95}$$

$$S_{ng} = \alpha_2 + \beta_5 * S_{ng}(-1) + \beta_6 * \left(\frac{p_{go}}{P_m}\right) + \beta_7 * \left(\frac{p_{ng}}{P_m}\right) + \beta_8 * D_{89-95}$$

قید تقارن گویای این است که تابع تقاضایی که از رفتار حداکثرسازی حاصل شده است نسبت به قیمت‌ها همگن از درجه صفر است. این قید در سیستم معادلات سهم هزینه به این صورت خواهد بود که اگر کلیهٔ قیمت‌های حامل‌های انرژی چند برابر شود، تقاضای مصرف‌کننده از انواع حامل‌های انرژی تغییری نخواهد کرد. این قید در سیستم معادلات سهم به صورت ذیل قابل بیان است:

$$\sum_{i=1}^{n} \gamma_{ij} = 0$$

قید دیگر که در سیستم معادلات سهم باید مدنظر باشد این است که حاصل جمع سهم‌ها برابر با ۱ باشد. این قید به صورت زیر بیان می‌شود:

$$\sum_{i=1}^{n} \alpha_i = 1$$

قید دیگر در سیستم معادلات سهم، قید تقارن اسلاتسکی است که بیانگر این است که اثرات قیمت بر تقاضای عوامل تولید متقارن هستند. به عبارت دیگر:

$$\left|\frac{\partial_i}{\partial p_j}\right|_{u=\bar{u}} = \left|\frac{\partial q_j}{\partial p_i}\right|_{u=\bar{u}}$$

این قیدتضمین می‌کندکه ماتریس واکنش تقاضای حامل‌های انرژی به قیمت، شبه معین منفی است و در سیستم معادلات سهم به‌صورت زیر در نظر گرفته می‌شود:

$$\gamma_{ij} = \gamma_{ji}$$

سیستم معادلات تقاضایی که برای زیرمجموعه عوامل تولید این ویژگی‌ها را برآورده کند، با تابع هزینه‌ای که دوگان تابع تولید هموتتیک و تفکیک‌پذیر باشد، سازگار است.

پس از تصریح معادلات سهم سوخت‌ها، برای برآورد معادلات سهم سوخت‌های مصرفی در تولید برق از برآوردگر رگرسیون‌های به‌ظاهر نامرتبط (SURE) که اولین‌بار

توسط زلنر[1] ارائه شد، استفاده شد. در روش SURE هریک از معادلات رگرسیونی متغیر وابسته خاص خود را دارد و هر معادله رگرسیونی به‌صورت بالقوه می‌تواند مجموعه متفاوتی از متغیرهای توضیحی داشته باشد. هر معادله رگرسیونی یک رگرسیون خطی است که می‌تواند به‌صورت مجزا نیز برآورد شود و به همین دلیل این مجموعه از معادلات را به‌ظاهر نامرتبط خوانده می‌شود (گرین[2]). نکتهٔ مهم اما در این ساختار این است که جزء خطای معادلات رگرسیونی مختلف دارای همبستگی هستند. معادلات رگرسیونی مورد نظر می‌توانند به‌صورت تکی با روش حداقل مربعات برآورد شوند. چنین برآوردهایی با وجودی که سازگار هستند، اما کارایی آنها از برآوردهای روش حداقل مربعات تعمیم‌یافته شدنی[3] (FGLS) مورد استفاده در برآوردگر زلنر کمتر است. در برآوردگر رگرسیون‌های به‌ظاهر نامرتبط، همبستگی بین اجزاء اخلال معادلات رگرسیونی در نظر گرفته شده و شرط حداقل واریانس برای تأمین کارایی برآوردها برآورده می‌شود.[4]

در الگوسازی چند معادله رگرسیونی و برآورد توام آنها با فرض وجود m معادله رگرسیونی خواهیم داشت:

$$y_{it} = x'_{it}\beta_i + u_{it} \ , \ i = ۱,۲,...,m$$

که در آن اندیس i نشان‌دهندهٔ معادله و اندیس t نمایندهٔ مشاهدات موجود برای هر معادله است. اگر m معادله به نوبهٔ خود به‌صورت برداری نمایش داده شوند، سیستم معادلات رگرسیونی به شکل زیر تشکیل می‌شود:

$$\begin{pmatrix} y_۱ \\ y_۲ \\ \vdots \\ y_m \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_۱ & ۰ & \dots & ۰ \\ ۰ & x_۲ & \dots & ۰ \\ \vdots & ۰ & \ddots & ۰ \\ ۰ & ۰ & \dots & x_m \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \beta_۱ \\ \beta_۲ \\ \vdots \\ \beta_m \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} u_۱ \\ u_۲ \\ \vdots \\ u_m \end{pmatrix} = X\beta + u$$

فرض اساسی در این سیستم آن است که اجزای خطای u_{it} برای هر معادله ویژگی‌های مطلوب را دارند، اما بین معادلات همبستگیوجود دارد. به همین دلیل در کاربرد برآوردگر

1. Zellner, (1962)
2. Greene, (2002)
3. Feasible Generalised Least Squares
4. Zellner, (1962)

SURE قبل از برآورد لازم است وجود همبستگی همزمان بین جملات اخلال معادلات آزمون شود. برای این منظور از آزمون LM[1] استفاده می‌شود.

پس از برآورد معادلات سهم سوخت‌ها، کشش‌های قیمتی تقاضا، جانشینی آلن، قیمتی موریشیما و قیمتی متقاطع با استفاده از نتایج برآورد محاسبه شده‌اند. طبق تعریف کشش قیمتی تقاضا عبارت است از درصد تغییر مقدار تقاضا نسبت به درصد تغییر معینی در قیمت کالا. برای محاسبه کشش‌های قیمتی روابط مختلفی ابداع شده است. یکی از این کشش‌ها، کشش جانشینی آلن[2] (AES) است. این کشش تغییرات درصدی در نسبت دو عامل تولید را که ناشی از یک درصد تغییر در قیمت‌های نسبی آنهاست، اندازه‌گیری می‌کند. این کشش راه مناسبی برای تعیین قابلیت جانشینی عوامل مختلف تولیداست. اگر کشش جانشینی آلن بین دو عامل مثبت باشد، آن دو عامل جانشین یکدیگر و اگر منفی باشد، مکمل هم هستند. کشش جانشینی آلن در دو حالت خودی و متقاطع برای تابع هزینه عمومی به‌صورت زیر تعریف می‌شود:[3]

$$AES_{ij} = \frac{\beta_{ij} + S_i S_j}{S_i S_j} = 1 + (\frac{\beta_{ij}}{S_i S_j})$$

$$AES_{ii} = \frac{(\beta_{ij} + S_i(S_j - 1))}{S_i^2}$$

که در آن S_j و S_i به ترتیب سهم حامل‌های انرژی j و i هستند.

کشش قیمتی موریشیما (MES)، درصد تغییر در نسبت مقدار دو نهاده را، به یک درصد تغییر در نسبت قیمت همان دو نهاده محاسبه می‌کند. این کشش توسط موریشیما (۱۹۶۷) معرفی شده و توسیط چمبرز[4] بسط یافته است. کشش جانشینی موریشیما قادر است اطلاعات کاملی از ایستاهای مقایسه‌ای و تغییر روابط فنی بین سهم اجزای نهاده‌ها در واکنش به تغییر در نسبت قیمت اجزای نهاده‌ها ارائه دهد. یکی از مزایای مهم کشش موریشیما نسبت به دیگر کشش‌های جانشینی فنی بین نهاده‌ای، در نظر گرفتن سهم هر کدام از اجزای نهاده به طور مناسب، در روابط محاسباتی کشش می‌باشد. ضرب سهم

1. Lagrange Multiplier Test Statistics
2. Allen Elasticity of Substitution, (AES)
3. Sorrell, (2008)
4.Chambers, (1988)

اجزای نهاده در رابطه کشش موریشیما، موجب می‌شود که رابطه کشش فنی به نحو صحیح و درست محاسبه شود و دچار تورش در محاسبه کشش جانشینی فنی نشود. کشش موریشیما از فرمول زیر محاسبه می‌شود:

$$AES_{ij} = \frac{\partial(Inx_i/x_j)}{\partial In p_j} = (\frac{\beta_{ij}}{S_i}) - (\frac{\beta_{ij}}{S_j}) + ۱$$

کشش قیمتی متقاطع بین نهاده‌ای، اثرات ناشی از تغییر قیمت یک نهاده بر مقادیر دیگر نهاده‌ها را اندازه‌گیری می‌کند. اگر کشش متقاطع بین نهاده‌ای مثبت (منفی) شود، نهاده‌های مورد نظر جانشین (مکمل) یکدیگر خواهند بود. به عبارت دیگر درصد تغییر در تقاضای نهاده i به ازای یک درصد تغییر در قیمت نهاده j مفهوم کشش قیمتی متقاطع جانشینی است که با فرمول زیر به دست می‌آید:

$$\eta_{ij} = \frac{\partial Inx_i}{\partial In p_j} = \frac{\beta_{ij}}{S_i} + S_j$$

٤. داده‌های مورد استفاده

محدودیت‌های آماری و نبود داده‌های مورد نیاز برای الگوسازی این تحقیق، سبب شده است که در میان نیروگاه‌های حرارتی کشور فقط شش شرکت برق منطقه‌ای انتخاب شوند. بنابراین نمونه آماری این مطالعه شامل شرکت‌های برق منطقه‌ای آذربایجان، باختر، تهران، غرب، کرمان و هرمزگان می‌باشد. این مطالعه برای دورهٔ زمانی ۱۳۹۵-۱۳۸۶ انجام شده است. متغیرهای استفاده شده شامل مصرف انرژی در بخش نیروگاهی، ارزش‌افزوده بخش نیروگاهی، سهم‌های هزینه حامل‌های انرژی، شاخص قیمت انرژی و قیمت‌های واقعی حامل‌های انرژی می‌باشند. همچنین مصرف انرژی حامل‌های انرژی در بخش نیروگاهی (نفت کوره، نفت گاز و گاز طبیعی) برحسب هزار بشکه نفت خام در نظر گرفته شده است.

قیمت فرآورده‌های نفتی برحسب ریال در هر لیتر در نظر گرفته شده است. بر اساس آمارهای ترازنامه انرژی، مصرف انرژی برحسب هزار بشکه نفت خام می‌باشد. بنابراین قیمت واقعی هریک از حامل‌های انرژی بر اساس معادل بشکه نفت خام مورد محاسبه قرار گرفته و قیمت‌های جاری بر شاخص عمده‌فروشی (سال پایه ۱۳۹۰) تقسیم شده است. سهم

هزینه‌های حامل‌های انرژی نیز از نسبت حاصل‌ضرب قیمت واقعی و مقدار مصرف هریک از سوخت‌ها بر هزینه کل انرژی مصرفی در صنعت به‌دست‌آمده است. هزینهٔ کل انرژی مصرفی به‌وسیله مجموع حاصل‌ضرب قیمت واقعی تک‌تک سوخت‌ها و مقدار کمی مصرف آن‌ها محاسبه‌شده است.

۵. نتایج و بحث

قبل از برآورد توابع سهم حامل‌های انرژی لازم است ابتدا وجود همبستگی همزمان بین جملات اخلال معادلات سیتسم آزمون شود. برای این منظور از آزمون ضریب لاگرانژ (LM) استفاده شد که نتیجه آن در جدول ۱ مشاهده می‌شود.

جدول (۱): آزمون LM برای تشخیص وجود همبستگی بین جملات اخلال در معادلات

آماره آزمون معادله اول	Prob معادله اول	آماره آزمون معادله دوم	Prob معادله دوم
۵۴/۱۱	۰/۰۰۰۰	۳/۲۹	۰/۰۳۴۹

مأخذ: نتایج پژوهش

با توجه به نتایج مندرج در جدول ۱ در هر دو معادله سیستم، فرضیه صفر عدم وجود همبستگی همزمان بین جملات اخلال رد می‌شود. بنابراین در سیستم معادلات سهم هزینه، بین جملات اخلال همبستگی همزمان وجود دارد و بنابراین می‌توان از برآوردگر معادلات رگرسیونی به‌ظاهر نامرتبط (SURE) برای برآورد آن استفاده کرد.

در مرحله بعد لازم است قیود کلاسیک تقارن و جمع‌پذیری مورد آزمون قرار گیرند. قید تقارن بیانگر این است که ضرایب قیمت نسبی سوخت‌های جایگزین در هرکدام از معادلات، برابر هستند که خود نشان‌دهنده این موضوع است که معادلات سهم هزینه‌ای هر سوخت همگن از درجه صفر می‌باشند. نتیجه این آزمون در جدول ۲ نشان داده شده است.

جدول (۲): نتیجه آزمون والد برای قید تقارن

آماره آزمون	Prob
۱/۴۵	۰/۲۲۵۵

مأخذ: نتایج پژوهش

همان‌طورکه مشاهده می‌شود با توجه به آماره کای دو، فرضیه صفر را نمی‌توان رد کرد. بر این اساس قید تقارن رد نمی‌شود، به این معنی که اگر کلیه قیمت‌های حامل‌های انرژی چند برابر شود، تقاضای مصرف‌کننده از انواع سوخت‌ها تغییری نخواهد کرد. به بیان‌دیگر در تصمیم‌گیری برای مصرف سوخت‌های مختلف، به قیمت نسبی توجه می‌شود. قید جمع‌پذیری نشان‌دهنده این است که حاصل جمع سهم‌های هزینه‌ای برابر یک خواهد بود. نتیجه این آزمون در جدول ۳ آمده است.

جدول (۳): نتیجه آزمون والد برای قید جمع‌پذیری

آماره آزمون	Prob
۱/۸۵	۰/۱۷۴۲

مأخذ: نتایج پژوهش

با توجه به جدول بالا فرضیه صفر رد نمی‌شود. در نتیجه مشخص می‌شود که مجموع سهم‌های هزینه سوخت‌های مورد استفاده در بخش شرکت‌های برق منطقه‌ای برابر یک خواهد بود.

با توجه به قیدهای آزمون‌شده سیستم معادلات سهم هزینه‌ای سوخت‌های مصرفی با استفاده از برآوردگر SURE برآورد شد که نتیجه در جدول ۴ آورده شده است.

جدول (٤): نتایج تخمین معادلات سهم هزینه‌ای گازوئیل و گاز طبیعی

متغیر	ضرایب		معناداری	
	معادله سهم مصرف گازوئیل	معادله سهم گاز طبیعی	معادله اول $p>\|Z\|$	معادله دوم $p>\|Z\|$
$S_{go}(-۱)$	۰/۷۴	–	۰/۰۰۰	–
$S_{ng}(-۱)$	–	۰/۷۴	–	۰/۰۰۰
$(\frac{P_{go}}{P_m})$	−۰/۰۴۹	۰/۰۵۶	۰/۰۲۹	۰/۰۰۰
$(\frac{P_{ng}}{P_m})$	۰/۰۵۶	−۰/۱۰۶	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰
T	۰/۴۷	−۰/۱۶۵	۰/۱۴	۰/۰۰۱
$D_{۸۶\text{-}۹۵}$	۰/۰۰۰۰۱	۰/۰۰۷	۰/۹۴۳	۰/۷۶۴
عرض از مبدأ	۰/۰۱	۰/۲۴	۰/۸۱۱	۰/۰۰۰

مأخذ: نتایج پژوهش

با توجه به ضرایب برآوردشده، در معادله اول که به سوخت گازوئیل اختصاص دارد، عرض از مبدأ، متغیر مجازی و متغیر روند معنادار نیستند، در حالی که در معادله دوم کـه بـه گاز طبیعی اختصاص دارد فقط متغیر روند معنادار نیسـت. بـا توجـه بـه نتـایج بـرآورد یـک واحد افزایش در قیمت گازوئیـل نسـبت بـه مـازوت، مصـرف سـوخت گازوئیـل را ۰/۰۴۹ درصد کاهش می‌دهد. همچنین یک واحد افـزایش قیمـت نسـبی گـاز طبیعـی بـه مـازوت، مصرف سوخت گاز طبیعی را ۰/۰۵۶ درصد افزایش می‌دهد.

با توجه به نتایج برآورد، در معادله دوم بـا یـک واحـد افـزایش در قیمـت نسـبی گـاز طبیعی به مازوت، مصرف سوخت گـاز طبیعـی ۰/۱۰۶ درصـد کـاهش مـی‌یابـد. همچنـین افزایش یک واحد قیمت نسبی گازوئیل به مازوت، مصرف سـوخت گـاز طبیعـی را ۰/۰۵۶ واحد افزایش می‌دهد. معنادار نشدن ضریب متغیـر مجـازی مربـوط بـه دوره هدفمندسـازی یارانه‌ها، بیانگر این است کـه در دوره مـورد بررسـی اجـرای ایـن قـانون نتوانسـته اسـت بـر مصرف سوخت‌های مختلف در تولید برق تأثیر قابل قبولی داشته باشد.

$$S_{go} = 0.074 S_{go(-1)}^{*} - 0.049 \left(\frac{P_{go}}{P_m}\right)^{*} + 0.056 \left(\frac{P_{ng}}{P_m}\right)^{*}$$

$$S_{ng} = 0.24 S_{ng(-1)}^{*} + 0.74 S_{ng}^{*} + 0.056 \left(\frac{P_{go}}{P_m}\right)^{*} - 0.106 \left(\frac{P_{ng}}{P_m}\right)^{*} - 0.165 D_{89\text{-}95}^{*}$$

همچنین سهم مصرف نفت کوره (سومین سوخت مصرفی) با استفاده از رابطه اتحـادی زیـر قابل محاسبه است:

$$S_m = 1 - S_{GO} - S_{ng}$$

پس از برآورد ضـرایب سیسـتم معـادلات سـهم حامـل‌هـای انـرژی، مـی‌تـوان کشـش‌هـای جانشینی (کشش‌هـای جزئـی آلـن و موریشـیما) و کشـش‌هـای قیمتـی و متقـاطع تقاضـا را محاسبه نمود. جدول‌های ۹، ۱۰ و ۱۱ که در پی آمده‌اند، مقدار محاسبه شده این کشـش‌هـا را نشان می‌دهند. یادآوری می‌شود که برای سـهم هزینـه‌ای حامـل‌هـای انـرژی از میـانگین سهم‌های هزینه‌ای سالانه استفاده شده است. جـدول ۵ کشـش‌هـای جانشـینی آلـن را نشـان می‌دهد.

جدول (۵): کشش‌های جانشینی قیمتی آلن

کشش جانشینی آلن	گازوئیل	گاز طبیعی	مازوت
گازوئیل	-۰/۸	۱/۶	۲/۰۷
گاز طبیعی	۱/۵۶	-۱/۶	۱/۳
مازوت	۲/۱۵	۱/۳۲	-۱/۱

مأخذ: نتایج پژوهش

همان‌طور که مشاهده می‌شود کشش‌های جانشینی قیمتی آلن برای سوخت‌های مختلف مثبت و نشان‌دهنده جانشین بودن انواع سوخت است. مقدار کشش جانشینی بین گازوئیل و مازوت بیشتر از بقیه است که نشان می‌دهد جانشینی بین مازوت و گازوئیل درخور توجه است. سهم محدود گازوئیل در مقابل سهم هزینه‌ای بالای مازوت در کنار کشش جانشینی بالا، زمینه مساعدی را برای جانشینی گازوئیل به جای مازوت فراهم می‌کند. کشش‌های قیمتی خودی و متقاطع بین سوخت‌ها در جدول ۶ آمده است.

جدول (٦): کشش‌های خودی و متقاطع قیمتی

کشش‌های خود قیمتی و متقاطع	گازوئیل	گاز طبیعی	مازوت
گازوئیل	-۰/۱۲	۰/۸۶	۰/۵۹
گاز طبیعی	۰/۲۴	-۰/۸۶	۰/۳۷
مازوت	۰/۳۴	۰/۷۳	-۰/۳۳

مأخذ: نتایج پژوهش

مطابق جدول ۱۰ کشش قیمتی خودی برای گازوئیل ۰/۱۲- به دست آمده است که نشان می‌دهد تقاضای سوخت گازوئیل نسبت به قیمت بی‌کشش است و از تغییر قیمت چندان متأثر نمی‌شود. این کشش قیمتی برای سایر سوخت‌ها بزرگتر است، به‌گونه‌ای که برای سوخت‌های گاز طبیعی و مازوت به ترتیب ۰/۸۶- و ۰/۳۳- به دست آمده است. بر این اساس تقاضای گاز طبیعی نسبت به تغییر قیمت واکنش تقریبا بزرگی نشان می‌دهد هرچند باز هم نسبت به قیمت بی کشش محسوب می‌شود. کشش‌های جانشینی قیمتی موریشیما نیز محاسبه شدند که نتیجه در جدول ذیل مشاهده می‌شود.

جدول (۷): کشش جانشینی قیمتی موریشیما

mes_{ij}	گازوئیل	گاز طبیعی	مازوت
گازوئیل	–	۱/۲۲	۱/۱۴
گاز طبیعی	۰/۷۸	–	۰/۹۲
مازوت	۰/۸۶	۱/۰۸	–

مأخذ: نتایج پژوهش

کشش‌های جانشینی موریشیما بیانگر رابطه جانشینی بین سوخت‌های مورد مطالعه است. بر اساس نتایج جدول بالا، نسبت گازوئیل به گاز طبیعی به ازای یک درصد تغییر در قیمت گاز طبیعی، ۱/۲۲ درصد افزایش می‌یابد، درحالی‌که این نسبت به ازای یک درصد تغییر قیمت گازوئیل، ۰/۷۸ درصد افزایش می‌یابد. همچنین در صورت افزایش یک‌درصدی قیمت گاز طبیعی، نسبت مازوت به گاز طبیعی، ۱/۰۸ درصد افزایش می‌یابد. تغییر یک درصدی قیمت مازوت نیز نسبت گاز طبیعی به مازوت را به اندازه ۰/۹۲ درصد افزایش می‌دهد.

٦. تحلیل کاربردی نتایج

به‌منظور کاربردی‌سازی نتایج برآورد الگوی جانشینی بین سوخت‌ها، دو سیاست با هدف برنامه‌ریزی برای کاهش انتشار آلاینده CO_2 تنظیم و ارزیابی شدند. آلاینده CO_2 به دلیل دردسترس بودن آمار انتشار آن انتخاب شد. سیاست اول ماهیتی اقتصادی دارد و به افزایش قیمت سوخت با هدف کاهش مصرف آن و جانشین کردن سایر سوخت‌ها به جای آن می پردازد. سیاست دوم ماهیتی دستوری دارد و به طور مستقیم به کاهش انتشار CO_2 می‌پردازد. سیاست اول دو سناریو را شامل می‌شود، سناریوی اول ۳۰ درصد کاهش انتشار CO_2 از طریق افزایش قیمت مازوت و سناریوی دوم ۳۰ درصد کاهش انتشار CO_2 از طریق افزایش قیمت گازوئیل می‌باشد. در سناریو اول، قیمت مازوت طوری تغییر پیدا می‌کند که به سبب آن مصرف مازوت کاهش یافته ومنجر به ۳۰ درصد کاهش انتشار CO_2 می‌شود. بنا بر نتایج به‌دست‌آمده برای کاهش ۳۰ درصد انتشار CO_2، قیمت مازوت باید ۸۲/۸۷۲ درصد افزایش یابد.

طبق رابطه زیر:

$$E_m = -\frac{\Delta Q_m}{\Delta Q_m} \times \frac{Q_m}{Q_m}$$

برای به دست آوردن ΔP_m از رابطه زیر استفاده می‌کنیم:

$$\Delta P_m = -\frac{\Delta Q_m}{E_m} \times \frac{P_m}{Q_m}$$

با توجه به اینکه در سال ۱۳۹۳ در شرکت‌های برق منطقه‌ای مورد مطالعه مقدار مازوت مصرف شده ۱۰۲۷۳ میلیون لیتر[1] بوده است و این مقدار مازوت مصرف شده ۳۲۶۴۶۷۱۹ میلیون مترمکعب دی‌اکسید کربن منتشر کرده است، در نتیجه هر لیتر مازوت ۳۱۷۷/۹ مترمکعب گاز دی‌اکسید کربن منتشر می‌کند. حال اگر گاز دی‌اکسید کربن ناشی از مصرف مازوت ۳۰ درصد کاهش داده شود، مقدار گاز دی‌اکسید کربن منتشر شده ۲۲۸۵۲۷۰۳/۳ میلیون مترمکعب خواهد بود. با توجه به اینکه هر لیتر مازوت ۳۱۷۷/۹ میلیون متر مکعب گاز دی‌اکسید کربن منتشر می‌کند، ۲۲۸۵۲۷۰۳/۳ میلیون مترمکعب دی‌اکسید کربن منتشر شده نیازمند مصرف ۷۱۹۱/۱۳ میلیون لیتر مازوت است. بر این اساس مصرف مازوت بایستی ۳۰۸۱ میلیون لیتر کاهش یابد.

$$\Delta Q_m = ۷۱۹۱/۱۳ - ۱۰۲۷۳ = ۳۰۸۱/۸۷$$

برای رسیدن به این هدف تغییر قیمت مازوت به صورت زیر قابل محاسبه است:

$$\Delta P_m = -\frac{-۳۰۸۱/۸۷}{۰/۳۶۲} \times \frac{۵۰۰۰}{۱۰۲۷۳} = ۴۱۴۳/۶$$

بنابراین قیمت مازوت از هر لیتر ۵۰۰۰ ریال باید به ۹۱۴۳/۶ ریال افزایش یابد.

$$P_۲ = ۵۰۰۰ + ۴۱۴۳/۶ = ۹۱۴۳/۶$$

در سناریوی دوم، هدف تغییر قیمت گازوئیل است به گونه‌ای که کاهش مصرف آن سبب کاهش ۳۰ درصدی انتشار $CO_۲$ ناشی از مصرف گازوئیل شللافللبالذرذرذد. بنا بر نتایج

۱. ترازنامه انرژی، (۱۳۹۳)

بدست آمده برای کاهش ۳۰ درصد انتشار CO_2، باید قیمت گازوئیل ۳۱۸/۷۴ درصد افزایش یابد.

طبق رابطه زیر:

$$E_{go}=-\frac{\Delta Q_{go}}{\Delta P_{go}E_m}\frac{P_{go}}{Q_{go}}$$

برای به دست آوردن تغییر لازم در قیمت گازوئیل از رابطه زیر استفاده می‌کنیم:

$$\Delta P_{go}=-\frac{\Delta Q_{go}}{E_{go}}\times\frac{P_{go}}{Q_{go}}$$

با توجه به این که در سال ۱۳۹۳ مصرف گازوئیل در شرکت‌های برق منطقه‌ای مورد مطالعه، ۸۸۷۲ میلیون لیتر[1] بوده است و مصرف این مقدار گازوئیل، ۶۲۱۸۱۵۱ میلیون متر مکعب دی‌اکسید کربن منتشر کرده است، بر این اساس از مصرف هر لیتر گازوئیل، ۷۰۰/۹ مترمکعب دی‌اکسید کربن منتشر شده است. ۳۰ درصد کاهش در انتشار دی‌اکسید کربن معادل ۱۸۶۵۴۴۵/۳ میلیون مترمکعب CO_2 است که برای این منظور مصرف گازوئیل بایستی ۲۶۶۱/۸ میلیون لیتر کاهش یابد. در این صورت مقدار مصرف گازوئیل باید به ۶۲۱۰/۱۶۶ میلیون لیتر کاهش یابد.

$$\Delta Q_{go}=۶۲۱۰/۱۶۶-۸۸۷۲=-۲۶۶۱/۸۳۴$$

تغییر قیمت لازم برای رسیدن به این مقدار کاهش مصرف به ترتیب زیر محاسبه می‌شود:

$$\Delta P_{go}=-\frac{-۲۶۶۱/۸۳۴}{۰/۱۲۵۵}\times\frac{۱۳۰۰}{۸۸۷۲}=۳۱۰۷/۸۴۳$$

با توجه به قیمت ۱۳۰۰ ریال برای هر لیتر گازوئیل، برای رسیدن به هدف این سیاست، قیمت گازوئیل باید به ۵۴۴۳/۶ ریال افزایش یابد.

$$P_2=۱۳۰۰+۴۱۴۳/۶=۵۴۴۳/۶$$

خلاصه این سناریو در جدول ۸ خلاصه شده است.

---

۱. ترازنامه انرژی، (۱۳۹۳)

جدول (۸): نتیجه سناریوهای کاهش انتشار گاز CO_2 ناشی از کاهش مصرف مازوت و گازوئیل

۳۰ درصد کاهش انتشار CO_2 ناشی از کاهش مصرف مازوت				۳۰ درصد کاهش انتشار CO_2 ناشی از کاهش مصرف گازوئیل			
قیمت مازوت قبل و بعد از اجرای سناریو (ریال)		میزان مصرف سوخت مازوت قبل و بعد از اجرای سناریو (میلیون مترمکعب)		قیمت گازوئیل قبل و بعد از اجرای سناریو (ریال)		میزان مصرف سوخت گازوئیل قبل و بعد از اجرای سناریو (میلیون مترمکعب)	
مصرف ثانویه	مصرف اولیه	قیمت ثانویه	قیمت اولیه	مصرف ثانویه	مصرف اولیه	قیمت ثانویه	قیمت اولیه
۶۲۱۰/۱۶۶	۸۸۷۲	۵۴۴۳/۶	۱۳۰۰	۷۱۹۱/۱۳	۱۰۲۷۳	۹۱۴۳/۶	۵۰۰۰

مأخذ: نتایج پژوهش

برای اینکه بتوان دو سناریو سیاستی را مقایسه کرد، بهتر است در هر دو سناریو مقدار سوخت‌ها را به یک واحد اندازه‌گیری مشترک تبدیل کرد. از آنجاکه هر سوخت ارزش حرارتی متفاوتی دارد، برای یکسان‌سازی واحدهای اندازه‌گیری، از شاخص بی تی یو (BTU)[1] استفاده شد. در جدول ۹ ارزش حرارتی هر سوخت نشان داده شده است:

جدول (۹): ارزش حرارتی سوخت‌های گاز طبیعی، گازوئیل و مازوت

سوخت	ارزش حرارتی	BTU
هر مترمکعب گاز طبیعی	۸۶۰۰ کیلو کالری	۳۴۱۰۴/۶
هر لیتر گازوئیل	۹۲۳۲ کیلو کالری	۳۶۶۱۰/۹
هر لیتر مازوت	۹۷۹۰ کیلو کالری	۳۸۸۲۳/۷

مأخذ: ترازنامه انرژی، ۱۳۹۳

در جدول ۱۰ نتیجه یکسان‌سازی مقادیر سوخت‌های مازوت، گازوئیل و گاز طبیعی حاصل از شبیه‌سازی دو سناریو سیاستی نشان داده شده است:

1. British Thermal Unit

یک شاخص سنجش گرمای استاندارد است و نشان دهنده مقدار گرمایی است که گرمای یک پوند آب را از ۶۰ درجه فارنهایت به ۶۱ درجه فارنهایت می‌رساند.

جدول (۱۰): یکسان‌سازی واحد مقادیر کمی سوخت‌های مازوت و گازوئیل

۳۰ درصد کاهش انتشار CO_2 ناشی از کاهش مصرف مازوت (میلیون *BTU*)	۳۰ درصد کاهش انتشار CO_2 ناشی از کاهش مصرف گازوئیل (میلیون *BTU*)
ارزش حرارتی ۳۰۸۰/۸۱ هزار لیتر مازوت کاهش‌یافته	ارزش حرارتی ۲۶۶۱/۸۳۴ هزار لیتر گازوئیل کاهش‌یافته
۱۱۹۶۴۷/۲۷	۲۸۲۴۳۰/۸۸

مأخذ: نتایج پژوهش

بر این اساس در سناریوی اول ارزش حرارتی ۱۱۹۶۴۷/۲۷ میلیون بی تی یو کاهش یافته است، در حالی که در سناریوی دوم ارزش حرارتی کاهش یافته ۲۸۲۴۳۰/۸۸ میلیون بی تی یو است. با توجه به این مقادیر سناریوی اول کاراتر از سناریوی دوم است.

در سیاست دوم، این هدف دنبال می‌شود که اگر مصرف سوخت هایی با آلایندگی بالا مستقیماً با سوخت‌های کمتر آلاینده جایگزین شوند، اثر بر انتشار CO_2 چگونه خواهد بود. این سیاست نیز شامل دو سناریو است. در سناریوی اول فرض می‌شود مصرف مازوت ۱۰۰ میلیون لیتر کاهش یابد. با توجه به این که مصرف هر لیتر مازوت ۳۱۷۷/۹ مترمکعب CO_2 منتشر می‌کند[1]، در اثر کاهش مصرف ۱۰۰ میلیون لیتر مازوت، ۳۱۷۷۹۰ میلیون مترمکعب انتشار CO_2 کاهش می‌یابد. همچنین با توجه به این که هر لیتر مازوت ۳۸۸۲۳/۷ بی تی یو ارزش حرارتی دارد، پس با کاهش ۱۰۰ میلیون لیتر مصرف مازوت، ۸۸۲۳۷۰ میلیون بی تی یو از ارزش حرارتی کاسته می‌شود.

حال اگر این کاهش ارزش حرارتی با گاز طبیعی جانشین شود، سوال این است که مصرف گاز طبیعی چقدر باید افزایش یابد و در نتیجه آن، مقدار انتشار CO_2 چه تغییری خواهد کرد؟ هر مترمکعب گاز طبیعی ۳۴۱۰۴/۶ بی تی یو ارزش حرارتی دارد، برای جبران ۳۸۸۲۳۷۰ میلیون بی تی یو از دست رفته در نتیجه کاهش مصرف مازوت، مصرف گاز طبیعی باید ۱۱۳/۸۳۷ میلیون مترمکعب افزایش یابد. هر مترمکعب گاز طبیعی ۷۹۳/۹۴ مترمکعب CO_2 منتشر می‌کند، مصرف ۱۱۳/۸۳۷ میلیون مترمکعب گاز طبیعی بیشتر سبب انتشار ۹۰۳۷۹/۷۵ میلیون مترمکعب CO_2 خواهد شد. درنتیجه اجرای این سناریو، انتشار

۱. ترازنامه انرژی، (۱۳۹۳)

$CO_۲$ معادل ۲۲۷۴۱۰/۲۵ میلیون مترمکعب کاهش می‌یابد. خلاصه این شبیه‌سازی در جدول ۱۱ نشان داده شده است:

جدول (۱۱): نتیجه سناریوی کاهش ۱۰۰ میلیون لیتر سوخت مازوت

ارزش حرارتی کاهش‌یافته ناشی از کاهش مصرف مازوت (میلیون BTU)	افزایش مصرف گاز طبیعی برای جبران ۳۸۸۲۳۷۰ ارزش حرارتی کاهش‌یافته (میلیون مترمکعب)	انتشار $CO_۲$ ناشی از مصرف ۱۰۰ میلیون لیتر سوخت مازوت (میلیون مترمکعب)	انتشار $CO_۲$ ناشی از افزایش ۱۱۳/۸۳۷ میلیون مترمکعب مصرف گاز طبیعی (میلیون مترمکعب)	درصد تغییر انتشار $CO_۲$
۳۸۸۲۳۷۰	۱۱۳/۸۳۷	۳۱۷۷۹۰	۹۰۳۷۹/۷۵	-۷۱/۵۶

مأخذ: نتایج پژوهش

در سناریوی دوم فرض می‌شود کاهش مصرف ۱۰۰ میلیون لیتر گازوئیل با افزایش مصرف گاز طبیعی جایگزین شود. مصرف هر لیتر گازوئیل ۷۰۰/۹ مترمکعب $CO_۲$ منتشر می‌کند.[۱] کاهش مصرف ۱۰۰ میلیون لیتر گازوئیل سبب کاهش انتشار ۷۰۰۹۰ میلیون مترمکعب $CO۲$ می‌شود. همچنین هر لیتر گازوئیل، ۳۶۶۱۰/۹ بی تی یو ارزش حرارتی تولید می‌کند. با کاهش ۱۰۰ میلیون لیتر مصرف گازوئیل، ارزش حرارتی تولید شده ۳۶۶۱۰۹۰ میلیون بی تی یو کاهش می‌یابد که باید با گاز طبیعی جایگزین شود. با توجه به این که هر مترمکعب گاز طبیعی ۳۴۱۰۴/۶ بی تی یو ارزش حرارتی تولید می‌کند، برای جبران کاهش ۳۶۶۱۰۹۰ میلیون بی تی یو ناشی از کاهش مصرف گازوئیل، باید مصرف گاز طبیعی ۱۰۷/۳۵ میلیون مترمکعب افزایش یابد. هر مترمکعب گاز طبیعی ۷۹۳/۹۴ مترمکعب $CO_۲$ منتشر می‌کند بنابراین افزایش ۱۰۷/۳۵ میلیون مترمکعب مصرف گاز طبیعی، سبب افزایش انتشار ۸۵۲۲۹/۴۵۹ میلیون مترمکعب $CO_۲$ می‌شود. بنابراین در سناریو دوم ، ۱۵۱۳۹/۴۵۹ میلیون مترمکعب به انتشار $CO_۲$ افزوده می‌شود. نتیجه این شبیه‌سازی در جدول ۱۲ نشان داده شده است.

۱. ترازنامه انرژی، (۱۳۹۳)

جدول (۱۲): نتیجهٔ سناریوی کاهش ۱۰۰ میلیون لیتر سوخت گازوئیل

ارزش حرارتی کاهش‌یافته ناشی از کاهش مصرف گازوئیل (میلیون BTU)	افزایش مصرف گاز طبیعی برای جبران ۳۶۶۱۰۹۰ ارزش حرارتی کاهش‌یافته (میلیون مترمکعب)	انتشار CO_2 ناشی از مصرف ۱۰۰ میلیون لیتر سوخت گازوئیل (میلیون مترمکعب)	انتشار CO_2 ناشی از افزایش مصرف ۱۰۷/۳۵ میلیون مترمکعب گازطبیعی (میلیون مترمکعب)	درصد تغییر انتشار CO_2
۳۶۶۱۰۹۰	۱۰۷/۳۵	۷۰۰۹۰	۸۵۲۲۹/۴۵۹	۲۱/۶

مأخذ: نتایج پژوهش

بر اساس نتایج بدست آمده اثر کاهش مصرف مازوت از نظر محیط زیستی مطلوب تر از کاهش مصرف گازوئیل و جایگزین کردن گاز طبیعی است. اگر هدف کاهش انتشار CO_2 باشد، نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد کاهش ۱۰۰ میلیون لیتر مصرف مازوت کاراتر از کاهش ۱۰۰ میلیون لیتر مصرف گازوئیل است. کاهش ۱۰۰ میلیون لیتر مصرف مازوت انتشار CO_2 را ۷۱/۵۶ درصد کاهش خواهد داد، درحالی‌که کاهش ۱۰۰ میلیون لیتر مصرف گازوئیل، انتشار CO_2 را ۲۱/۶ درصد افزایش می‌دهد.

۷. نتیجه‌گیری و پیشنهاد

ازآنجاکه در فرایند تولید مصرف حامل های انرژی مستقل از یکدیگر نیستند، لازم است در برآورد تقاضا و جانشینی حامل های انرژی اثرات متقابل مصرف یک حامل انرژی بر سایر حامل‌های انرژی در نظر گرفته شود. ساختار الگوی به کار گرفته شده در این پژوهش این اثرات متقابل و هم‌زمان را در نظر گرفته است.

نتایج نشان داده است که گازوئیل، مازوت و گاز طبیعی در تولید برق می‌توانند جانشین یکدیگر باشند. از آنجا که الگوسازی لازم برای محاسبه کشش‌های جانشینی بین سوخت‌ها در دورهٔ ۱۰ ساله (۱۳۹۵-۱۳۸۶) انجام شده، اثر هدفمندسازی یارانه‌ها در الگو لحاظ شده است. مقادیر مثبت کشش جانشینی قیمتی آلن نشان‌دهنده وجود رابطه جانشینی بین گازوئیل و مازوت می‌باشد. مقادیر این کشش برای گازوئیل و گاز طبیعی ۱/۶ و برای گازوئیل و مازوت ۲/۰۷ به دست آمد. همچنین کشش‌های خودی و متقاطع جانشینی

بیانگر بی‌کشش بودن گاز طبیعی نسبت به قیمت گازوئیل می‌باشد، درحالی‌که گازوئیل نسبت به تغییر ۱ درصدی در قیمت گاز طبیعی واکنش نشان داده و تقاضای آن ۰/۸۶ افزایش می‌یابد. همچنین کشش‌های قیمتی موریشیما برای گازوئیل و گاز طبیعی مثبت به دست آمد که دلالت بر افزایش مصرف گاز طبیعی نسبت به گازوئیل به ازای افزایش در قیمت گازوئیل یا گاز طبیعی دارد. همین موضوع نیز برای گاز طبیعی و مازوت هم صادق است. بنابراین کاهش قیمت گازوئیل و مازوت برای صرفه‌جویی در مصرف انرژی و جلوگیری از آلودگی محیط‌زیست پیشنهاد می‌شود.

همچنین بر اساس نتایج حاصل از سیاست‌های کاربردی، با کاهش ۱۰۰ میلیون لیتری مصرف مازوت، باید مقدار مصرف گاز طبیعی ۱۱۳/۸۳۷ میلیون متر مکعب افزایش یابد، که این مقدار مصرف گاز طبیعی انتشار گاز دی‌اکسید کربن را به اندازه ۲۲۷۴۱۰/۲۵ میلیون متر مکعب کاهش می‌دهد. همچنین بر اساس نتایج حاصل از محاسبات با کاهش ۱۰۰ میلیون لیتر مصرف گازوئیل، مصرف گاز طبیعی باید ۱۰۷/۳۵ میلیون متر مکعب افزایش یابد، که این مقدار مصرف گاز طبیعی انتشار گاز دی‌اکسید کربن را ۱۵/۱۴ میلیون مترمکعب افزایش می‌دهد.

بر این اساس از منظر محیط زیستی و هدف کاهش انتشار دی‌اکسید کربن، جایگزینی گاز طبیعی به جای مازوت می‌تواند مفید و مؤثر باشد، در حالی که جایگزین کردن گاز طبیعی به جای گازوئیل باعث افزایش انتشار دی‌اکسید کربن می‌شود و بنابراین از نظر محیط زیستی مفید و مؤثر نیست.

۸. منابع

الف) فارسی

اشراق‌نیای جهرمی، عبدالحمید و ایقانی یزدلی، روح الله (۱۳۸۷)، «مدل‌سازی مصرف گاز طبیعی و فرآورده‌های نفتی و بررسی امکان جانشینی گاز طبیعی به‌جای فرآورده‌های نفتی در ایران»، *مجله علمی و پژوهشی شریف*، شماره ۴۵.

بریگام، یوجین و پاپاس، جیمز (۱۳۶۵)، «اقتصاد در مدیریت»، ترجمه علی اصغر موسوی الغروی، مرکز نشر دانشگاهی.

بهبهانی‌فرد، پ. (۱۳۸۳)، «بررسی عوامل مؤثر بر تقاضای انواع انرژی در بخش صنعت استان اصفهان و تخمین کشش‌های جانشینی بین آن‌ها»، نهمین کنفرانس شبکه‌های توزیع برق.

مرزبان، حسین و اکبریان، رضا و قاسمی، علی (۱۳۸۴)، «بررسی تقاضا برای انواع سوخت و جایگزینی بین آن‌ها در نیروگاه‌های حرارتی تولید برق کشور (تابعه وزارت نیرو)»، *فصلنامه پژوهش‌های اقتصادی*، شماره ۱۶.

صمدی، سعید و شریفی، علیمرادو احمدزاده، عزیز و خانزادی، آزاد (۱۳۸۷)، «جانشینی بین نهاده انرژی با سرمایه در بخش فلزات اساسی»، *مجلهٔ تحقیقات اقتصادی*، شمارهٔ ۸۹، صفحات ۱۵۵-۱۲۹.

شاهمرادی، اصغر و زاهدی، راضیه و حقیقی، ایمان (۱۳۸۸)، «تحلیل تأثیر سیاست‌های قیمتی در بخش‌های اقتصادی (با تمرکز بر آب و انرژی)»، وزارت نیرو، معاونت برنامه‌ریزی و امور اقتصادی، دفتر برنامه‌ریزی تلفیقی و راهبردی، تهران، ایران.

محتشم دولتشاهی، طهماسب (۱۳۹۰)، «مبانی علم اقتصاد: اقصاد خرد و اقتصاد کلان»، چاپ سی و یکم، ویراست ششم.

ب) انگلیسی

Arsenault, E. and Bernard, J. and Carr, C. and Genest-Laplante, E. (1995), "A total energy demand model of Québec: Forecasting properties", *Energy Economics*, no.17(2), pp. 163-171.

Bhattacharyya, S.C. (2011), "Energy Economics: Concepts, Issues, Markets and Governance", Dundee springer.

Ben, W.A. (1986), "ASEAN energy demand: trends and structural change", Institute of Southeast Asian Studies.

Fiorito, G. (2011), " Capital-Energy Substitution for Climate and Peak Oil Solutions? An International Comparison Using the EU-KLEMS Database, In Institute for Environmental Science and Technology", Universitat Autònoma de Barcelona, Bellaterra (Cerdanyola), Spain.

Greene, W.H. Econometric analysis. Pearson, 7th Edition, 2012.

Hope, E. (1995), "Energy price increases in developing countries: case studies of Colombia, Ghana, Indonesia, Malaysia, Turkey, and Zimbabwe", World Bank Policy Reaserch Working Paper.

Huas, R. and Schipper, L. (1998), "Residential Energy Demand in OECD-countries and the Role of Irreversible Efficiency Improvements", *Energy Economics*, vol. 20, pp. 421-442.

Kaboudan, M. and Liu, Q. (2004), "Forecasting quarterly US demand for natural gas, EJ: Inform Technol Econ Manage", INFORMATION TECHNOLOGY FOR ECONOMICS AND MANAGEMENT, Volume 2 , Number 1, pp. 1-14.

Singh, A. (2010), "Inter-Fuel Substitution, Industrial Energy Demand and Carbon Emissions". VDM Verlag.

Sorrell, S. (2008), "Energy-Capital Substitution and the Rebound Effect", St. John's College, Oxford.

Zellner, A. (1962), "An efffincient method of estimating seemingly unrelated regressions and tests of aggregation bias", *Journal of American Statistical ssociation*, vol.57, pp.500-509.