ارزیابی جایگزینی انرژی‌های تجدیدپذیر به‌جای سوخت‌های فسیلی در ایران: رهیافت کنترل بهینه

علیمراد شریفی[1] غلامحسین کیانی[2] رحمان خوش‌اخلاق[3] محمدمهدی باقری[4]

تاریخ دریافت: ۱۳۹۱/۰۷/۰۵ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۱/۱۲/۰۱

چکیده

اگرچه سوخت‌های فسیلی رشد سریع اقتصادی جوامع بشری را به‌همراه داشته، اما انتشار آلاینده‌های ناشی از مصرف این سوخت‌ها، موجب بروز تغییرات آب و هوایی شده است. از سوی دیگر، منابع سوختهای فسیلی نظیر نفت،گاز، ذغال‌سنگ و اورانیوم به تدریج در حال کاهش است. این موضوع، پژوهش در زمینه انرژی‌های جایگزین و تجدیدشونده شامل انرژی خورشیدی و بادی را ضروری می‌سازد.

در این مقاله به منظور حداکثر کردن رفاه‌اجتماعی، یک مدل کنترل بهینه طراحی و با استفاده از روش الگوریتم ژنتیک، مسیرهای بهینه جایگزینی انرژی خورشید و باد به‌جای سوختهای فسیلی در طی زمان در ایران ترسیم شده است. نتایج تحقیق نشان می‌دهد در صورت ثابت ماندن هزینه تبدیل انرژی خورشیدی و بادی و در نظر گرفتن نرخ تنزیل اجتماعی پنج درصد، انتقال از انرژی‌های فسیلی به‌سمت انرژی خورشیدی و بادی در سال ۱۴۶۶(۷۷ سال پس از سال مبنا) و با فرض کاهش ۵۰ درصدی هزینه تبدیل انرژی خورشید و باد در هر ده سال، این انتقال در سال ۱۴۰۹ (۲۰ سال پس از سال مبنا) می‌بایست صورت پذیرد.

واژگان کلیدی: نظریه کنترل بهینه، جانشینی درون‌زا، انرژی خورشیدی و بادی، نرخ تنزیل اجتماعی.

JEL: Q21, Q32, Q42, Q47.

۱. دانشیار اقتصاد دانشگاه اصفهان، Email: alimorad@ase.ui.ac.ir

۲. استادیار اقتصاد دانشگاه اصفهان، Email: kianigh@yahoo.com

۳. استاد اقتصاد دانشگاه اصفهان، Email: rahmankh44@yahoo.com

۴. کارشناس‌ارشد اقتصاد دانشگاه اصفهان، Email:bagheri.mohammad1366@gmail.com

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286454.1392.3.11.6.8]

۱. مقدمه

در حال حاضر، بیش از ۸۱ درصد کل انرژی مصرفی جهان و بیش از ۹۵ درصد انرژی مصرفی در ایران را سوخت‌های فسیلی تامین می‌کند(سانا،۱۳۹۰). مصرف این نوع از سوخت‌ها باعث تولید گازهای سمی و آلوده‌کننده هوا، بارش باران‌های اسیدی و در نتیجه آلودگی رودخانه‌ها، دریاچه‌ها و آبهای زیرزمینی و بالاخره بالا رفتن میزان گاز کربنیک موجود در اتمسفر زمین شده است. از طرف دیگر به دلیل رشد مصرف انرژی و استفاده بی‌رویه از منابع انرژی فسیلی و همچنین پایان‌پذیر بودن منابع نفتی و گازی کشور می‌بایست از هم اکنون به فکر انرژی‌های جایگزین بود.

برای کاهش آلودگی‌های مختلف ناشی از مصرف سوخت‌های فسیلی و استفاده بهینه از نفت، گاز و زغال‌سنگ لازم است به انرژی خورشیدی و بادی که منبع لایزال و سازگار با محیط است، توجه بیشتری شود. زیرا دریافتی انرژی خورشیدی و بادی در ایران بالا و تکنولوژی استفاده از آن نیز ساده است؛ به طوری که می‌توان بسیاری از نیازهای انرژی کشور را بااستفاده از آفتاب و باد تامین کرد. در این راستا در این مطالعه مسیر بهینه جایگزینی انرژی خورشید و باد به‌جای سایر حامل‌های انرژی(نفت، زغال‌سنگ و گاز طبیعی) در طول زمان استخراج می‌شود.

لازم به ذکر است در اسناد فرادستی نظام و نمودهای برنامه پنجم و همچنین سند چشم انداز ۲۰ ساله، سیاست‌های کلی بخش نفت و گاز به‌طور کامل مشخص است که مسیر سیاستگذاری‌ها با هدف استفاده و بهره‌برداری حداکثری از منابع نفت و گاز است، و از جمله آنها می‌توان به (۱) اتخاذ تدابیر و راهکارهای مناسب برای گسترش اکتشاف نفت و گاز و شناخت کامل منابع کشور؛ (۲) افزایش ظرفیت تولید صیانت شده نفت، متناسب با ذخایر موجود؛ (۳) افزایش ظرفیت تولید گاز متناسب با حجم ذخایر کشور به‌منظور تامین مصرف داخلی؛ (۴) گسترش تحقیقات بنیادی و توسعه‌ای و تربیت نیروی‌انسانی متخصص و ارتقای فناوری در زمینه‌های منابع و صنایع نفت، گاز و پتروشیمی اشاره نمود. این مطالعه در سایه سیاست‌های کلی بخش انرژی صورت گرفته است و نشان می‌دهد سیاست استفاده از انرژی‌های فسیلی و به تعویق انداختن بهره‌برداری از انرژی‌های تجدیدپذیر خسارت‌هایی را به بخش انرژی وارد می‌نماید.

در ادامه این تحقیق ابتدا مدلی کنترل بهینه طراحی شده ارائه می‌شود. سپس آمار و اطلاعات مورد استفاده بررسی شده و در بخش پایانی نتایج برآورد توابع تقاضا انرژی در بخش‌های مختلف اقتصادی ایران و هزینه استخراج سوخت‌های فسیلی و همچنین مسیر بهینه جایگزینی انرژی‌های خورشید و باد به‌جای سوخت‌های فسیلی در پنج سناریو ارائه می‌شود.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286454.1392.3.11.6.8]

۲. پیشینه مطالعات

تاکنون در ایران، مطالعات اقتصادی اندکی در زمینه انرژی‌های نو انجام شده است.گندمکار(۱۳۸۸) در تحقیقی با عنوان ارزیابی انرژی باد در کشور ایران، ایران را سرشار از منابع انرژی تجدیدپذیر و تجدیدناپذیر می‌داند و از نظر او موقعیت جغرافیایی کشور ایران موجب شده است که منبع بسیار بزرگی از انرژی بادی باشد. شعربافیان(۱۳۸۶) ضمن برآورد پتانسیل فنی و اقتصادی انرژی خورشیدی حرارتی در ایران، نشان داد پتانسیل انرژی‌های تجدیدپذیر چندین برابر منابع فسیلی است. شریفی، خوش‌اخلاق و کوچک‌زاده(۱۳۸۴) اقتصادی بودن نیروگاه خورشیدی(فتوولتاییک) را در مقایسه با نیروگاه دیزلی و اتصال به شبکه سراسری برق را به‌منظور تامین برق روستاهای مرکزی ایران بررسی کرده و نتیجه گرفتند که سیستم‌های انرژی فتوولتایی در مقایسه با دیگر سیستم‌ها هزینه واحد کمتری دارند.

از جمله مطالعات انجام شده در این زمینه می‌توان به مطالعه چاکرورتی[1]، روماست[2] و تسه[3](۱۹۹۷) اشاره نمود. در این مطالعه با توسعه یک مدل در قالب روش کنترل بهینه و استفاده ازتوابع هزینه‌های استخراج سوخت‌های فسیلی و توابع تقاضای انرژی برای کشورهای OECD، مسیر بهینه انتقال از سوخت‌های فسیلی به انرژی خورشیدی بررسی شده است. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که اگر نرخ تاریخی کاهش هزینه تولید انرژی خورشیدی حفظ شود، بیش از ۹۰ درصد از زغال‌سنگ این کشورها هرگز مورد استفاده قرار نمی‌گیرد و جهان از استفاده نفت و گازطبیعی به انرژی خورشیدی حرکت می‌کند. همچنین چکروورتی و تز(۱۹۹۹)، نشان داده‌اند که مصرف نفت و گاز طبیعی نسبت به تغییرات در هزینه تبدیل انرژی خورشیدی بسیار حساس بوده و اگر هزینه تبدیل انرژی خورشیدی بدون تغییر باقی بماند، در حال حاضر نفت و ذخایر گاز طبیعی و در آینده‌ی نزدیک زغال‌سنگ تامین‌کننده اصلی انرژی خواهند بود. با این حال، اگر نرخ تاریخی هزینه تبدیل انرژی خورشیدی بواسطه تحقیق و توسعه به مرور کاهش یابد، انرژی خورشیدی جایگزین ذغال‌سنگ در نیمه دوم قرن بیست و یکم خواهد شد.

۳. روش تحقیق

هتلینگ[4](۱۹۳۱) با در نظر گرفتن «ارزش اجتماعی» منابع پایان‌پذیر، مدل بهینه استخراج منابع را تدوین نمود. ارزش اجتماعی ناخالص تولید یا استخراج یک واحد نهایی از منبع مورد نظر با قیمتی که جامعه

1. Chakravorty
2. Roumasset
3. Tse
4. Hoteling

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286454.1392.3.11.6.8]

حاضر است بپردازد تا آن واحد از محصول را بدست آورد اندازه‌گیری می‌شود و به اعتقاد وی، برنامه‌ریزان باید ذخایر منابع پایان‌پذیر را برای دوره‌های متعدد به گونه‌ای تخصیص دهند که در هر دوره حاصل جمع هزینه نهایی و ارزش کمیابی منابع با قیمت بازار رقابتی برابر شود. در غیر این صورت تخصیص ذخایر در دوره‌های متعدد بهینه نبوده و از نظر اجتماعی کارآمد نخواهد بود.

بمنظور حل عددی قاعده مذکور، وی از روش حساب تغییرات بهره گرفت. هر چند که قاعده هتلینگ دارای محدودیت‌هایی از جمله صفر بودن هزینه نهایی استخراج، عدم وجود پیشرفت فنی و نادیده گرفتن کشش قیمتی تقاضا بود که توانایی پیش‌بینی مدل را کاهش می‌داد. قاعده هتلینگ در دهه‌های بعد تعمیم و اصلاح گردید که امروز با عنوان "قاعده تصحیح شده هتلینگ"[1] یاد می‌شود.

در این مطالعه از مدل توسعه‌یافته چاکرورتی، روماست و تسه(۱۹۹۷) برای تعیین مسیر بهینه جایگزینی انرژی‌های نو به‌جای انرژی‌های فسیلی در بخش انرژی ایران استفاده می‌شود. هدف این مدل، حداکثرسازی رفاه‌اجتماعی با توجه به مقدار ثابت ذخایر سوخت‌های فسیلی است:

$$Max \int_0^{\infty} e^{-rt} \left[\sum_{j=1}^{J} \int_0^{\sum_{i=1}^{I} d_{ij(t)}} D_j^{-1}(\theta) d\theta - \sum_{j=1}^{J} \sum_{i=1}^{I} \frac{w_{ij}}{u_{ij}} d_{ij(t)}\right] dt \quad (۱)$$

با قید:

$$\dot{Q}_i(\mathrm{t}) = -\sum_{j=1}^{J} \frac{d_{ij(t)}}{u_{ij}} \quad (۲)$$

در مدل فوق i منابع موجود (نفت، زغال‌سنگ، گازطبیعی و انرژی خورشید و باد)، j بخش‌های اقتصادی (بخش خانگی، تجاری و عمومی، صنعت، حمل‌ونقل، کشاورزی و برق) و r نرخ تنزیل را نشان می‌دهد. همچنین $D_j^{-1}(\theta)$ تابع تقاضای معکوس انرژی در بخش j ام، به‌عنوان متغیر کنترل، به صورت زیر است:

$$P_j(t) = D_j^{-1}[\sum_{i=1}^{I} d_{ij(t)}] \quad (۳)$$

از آنجا که فرایند تبدیل منابع (نفت، گاز، زغال‌سنگ و خورشید و باد) به انرژی با اتلاف انرژی همراه است، U_{ij} نسبت واحدهای انرژی تحویلی به بخش j، به کل انرژی خام ورودی موجود در یک واحد از منبع i است که به عنوان ضریب کارایی[2] شناخته می‌شود: $U_{ij} < ۱$. همچنین d_{ij} خالص انرژی تحویل داده شده از منبع i نسبت به تقاضای j از $q_{ij}(\mathrm{t})$ واحد از منبع است که به صورت زیرتعریف می‌شود:

$$d_{ij}(t) = u_{ij}\ q_{ij}(\mathrm{t}) \quad (۴)$$

1. Modified Hotelling's Rule
2. Efficiency Factors

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286454.1392.3.11.6.8]

$Q_i(\mathrm{t})$ شامل ذخایر برآورد شده و اثبات شده منابع نفت، گاز و زغال‌سنگ است که به‌عنوان متغیر وضعیت در نظر گرفته می‌شوند. در مدل فوق w_{ij} مجموع هزینه‌های تبدیل و استخراج به‌صورت زیر نمایش داده می‌شود:

$$w_{ij} = c_i + z_{ij} \tag{۵}$$

که C_i هزینه نهایی استخراج منبع(انرژی) i است و Z_{ij} هزینه تبدیل منبع انرژی i نسبت به تقاضای j است که برابر با مجموع هزینه‌های عملیاتی و تعمیر و نگهداری از تجهیزات استفاده شده در تبدیل منبع است. در این مطالعه فرض می‌شود که هزینه استخراج انرژی خورشید و انرژی باد، صفر بوده ولی هزینه تبدیل آن برابر با Z_b است.

مدل زمانی پیوسته با افق زمانی نامحدود فوق در قالب مسئله کنترل بهینه حل می‌شود. بدین‌منظور ابتدا ارزش فعلی همیلتونی برای این مسئله به شرح زیر بدست می‌آید:

$$H = \sum_{j=1}^{J} \int_0^{\sum_{i=1}^{I} d_{ij}(t)} D_j^{-1}(\theta) d\theta - \sum_{j=1}^{J} \sum_{i=1}^{I} \frac{w_{ij}}{u_{ij}} d_{ij}(t) - \sum_{i=1}^{I} \lambda_i(t) \sum_{j=1}^{J} \frac{d_{ij(t)}}{u_{ij}} \tag{۶}$$

λ_i متغیر رانت کم‌یابی برای منابع انرژی i شامل(نفت، گاز و زغال‌سنگ) است. شرایط مرتبه اول برای حل این مسئله براساس اصل ماکزیمم و شرط بهینه اجتماعی هتلینگ به شرح زیر است:

$$\dot{Q}_i(\mathrm{t}) = -\sum_{j=1}^{J} \frac{d_{ij(t)}}{u_{ij}} \qquad i = 1, \dots, I; \quad j = 1, \dots, J \tag{۷}$$

$$\dot{\lambda}_i(t) = r\lambda_i(t), \qquad i = 1, \dots, I \tag{۸}$$

$$P_j(t) \le \frac{w_{ij} + \lambda_i(t)}{u_{ij}}, \quad i = 1, \dots, I; \qquad j = 1, \dots, J \tag{۹}$$

$$P_j(T_j) = \frac{z_{bj}}{u_{ij}}, \quad j = 1, \dots, J \tag{۱۰}$$

شرط اول که جزو شروط اصل ماکزیمم است، بیان می‌کند که میزان ذخایر هر منبع(نفت، گاز و ذغال سنگ) از طریق تقاضای انرژی در بخش‌های مختلف اقتصادی تهی می‌شود. طبق شرط دوم رانت کم‌یابی انرژی‌های فسیلی از طریق مقادیرشان در دوره زمانی اولیه با نرخ بهره افزایش خواهد یافت. شرط سوم وضعیت مصرف انرژی نفت، گاز و زغال‌سنگ را در بخش‌های مختلف و شرط چهارم وضعیت مصرف انرژی خورشید و باد در بخش‌های مختلف تعیین می‌کند. در واقع شرط سوم بیانگر شرط بهینه اجتماعی هتلینگ است که می‌بایست میانگین قیمت پرداختی جامعه در بخش‌های مختلف بابت انرژی (نفت، گاز، زغال‌سنگ و خورشید و باد) بیشتر از مجموع هزینه استخراج، هزینه تبدیل و نرخ کم‌یابی انرژی‌های فسیلی (نفت،گاز و زغال‌سنگ) باشد تا آن بخش انرژی فسیلی را تقاضا کند. شرط چهارم در تکمیل شرط سوم

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286454.1392.3.11.6.8]

به‌عنوان شرط انتقالی و مرحله گذار از انرژی فسیلی به انرژی خورشید و باد است. طبق این شرط زمانی که میانگین قیمت پرداختی جامعه در بخش‌های مختلف بابت انرژی (نفت، گاز، زغال‌سنگ و خورشید و باد) برابر با هزینه تبدیل انرژی خورشید و باد شود، فقط از انرژی خورشید و باد استفاده می‌شود و تقاضای انرژی‌های فسیلی (نفت، گاز و زغال‌سنگ) صفر می‌شود.

متغیرهای موجود در مدل فوق در قالب متغیرهای کنترل، وضعیت، رانت کم‌یابی و متغیرهای برون‌زا تقسیم‌بندی می‌شوند. متغیرهای کنترل شامل مصرف انرژی در بخش‌های مختلف اقتصادی از انرژی نفت، گاز، زغال‌سنگ و انرژی خورشیدی و بادی است. متغیرهای وضعیت شامل ذخایر نفت، گاز و زغال‌سنگ می‌شود که با تقاضای انرژی از این ذخایر در طول زمان مقدار این ذخایر تمام خواهد شد. در این مدل سه متغیر کم‌یابی برای ذخایر نفت، گاز و زغال‌سنگ در نظر گرفته شده که به‌طور پیوسته و به اندازه نرخ بهره در طول زمان افزایش می‌یابد. متغیر برون‌زای مدل، تولید ناخالص داخلی در هر سال است که با استفاده از تولید ناخالص داخلی در سال پایه[۱] (y_0) و میانگین نرخ رشد تولید ناخالص داخلی سال‌های گذشته(g)[۲] و نرخ تنزیل[۳] (r) به شرح زیر محاسبه می‌شود.

$$y = \frac{y_0(1+g)^{t-1}}{(1+r)^{t-1}} \qquad (۸)$$

در این مطالعه برای برآورد توابع تقاضای انرژی در بخش‌های مختلف از فرم تابعی کاب-داگلاس[۴] استفاده گردید:

$$E = AP^{\alpha}Y^{\beta}E_{t-k}^{\gamma} \qquad (۹)$$

که در آن E تقاضای انرژی در سال t، E_{t-k} تقاضای انرژی در k سال قبل، A,γ مقادیر ثابت، Y درآمد (تولید ناخالص داخلی) در سال t، P قیمت وزنی حامل‌های انرژی در سال t، α و β بترتیب کشش‌های

۱. مقدار تولید ناخالص داخلی در سال پایه یعنی سال ۱۳۸۹، ۶۳۴ هزار میلیارد ریال است.

۲. میانگین نرخ رشد تولید ناخالص داخلی سال‌های گذشته ۵ درصد می‌باشد.

۳. نرخ تنزیل که در این مطالعه استفاده شده است ۵ درصد می‌باشد.

۴. انتخاب فرم تابعی کاب–داگلاس بدین‌خاطر صورت پذیرفته است که مقاله حاضر نخستین مقاله‌ای است که با فرض برونزا درنظرگرفتن تقاضا به پیش‌بینی عرضه انرژی‌های تجدیدپذیر و قابلیت جایگزینی آن با انرژیهای فسیلی در چارچوب مدل کنترل بهینه پرداخته است. افزون بر این می‌توان با در نظرگرفتن سایر فرمهای تابعی که از بسط مرتبه دوم سری تیلور استخراج می‌گردند(همانند فرم درجه دوم و فرم ترانسلوگ) به تعمیم نتایج مدل پرداخت ولیکن بایست توجه نمود که بکارگیری فرم تابعی پیچیده‌تر ممکن است الزاماً نتایج قابل قبولی ارائه ندهد و به‌منظور آغاز چنین تحلیلی بکارگیری فرم تابعی ساده همانند کاب–داگلاس مناسب خواهد بود.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286454.1392.3.11.6.8]

قیمتی و درآمدی کوتاه‌مدت تقاضا و ($\dot{\beta} = \frac{\beta}{1-\gamma}$) و ($\dot{\alpha} = \frac{\alpha}{1-\gamma}$) بترتیب کشش‌های درآمدی و قیمتی بلندمدت تقاضاست.

همچنین در این فرم، تقاضای انرژی در هر بخش شامل مجموع تقاضا از حامل‌های انرژی نفت، گاز، زغال‌سنگ و انرژی خورشیدی و بادی بوده و قیمت پرداختی در هر بخش شامل میانگین وزنی قیمت پرداختی هر بخش نسبت به حامل‌های انرژی نفت، گاز، زغال‌سنگ و انرژی خورشیدی و بادی است. بدین ترتیب فرم تابع تقاضای معکوس مورد استفاده در مدل رابطه (۱) با فرض k=1 به شرح زیر است:

$$p = \left(\frac{E}{e^{\theta} E(-1)^{\gamma}\, y^{\beta}}\right)^{\frac{1}{\alpha}} \qquad (۱۰)$$

٤. توصیف داده‌ها

با توجه به آمار موجود، دوره زمانی ۱۳۸۹-۱۳۷۰ برای برآورد تابع تقاضای انرژی در نظر گرفته شده است. به منظور انجام تحلیل بخش‌های اقتصادی ایران را به شش بخش خانگی، تجاری و عمومی، صنعت، حمل‌ونقل، کشاورزی و برق تقسیم‌بندی شدند. آمار تولید ناخالص داخلی از حساب‌های ملی ایران و آمار مصرف و قیمت پرداختی انرژی از ترازنامه انرژی سال ۱۳۸۹ وزارت نیرو و ترازنامه هیدروکربوری وزارت نفت استخراج گردید. همچنین مقادیر تقاضای انرژی به پتاژول و قیمت پرداختی به (هزار ریال به پتاژول) تبدیل شده‌اند. برای تجزیه و تحلیل برآورد توابع تقاضا و هزینه از نرم‌افزار Eviews.7 استفاده شده است.

با بسط مدل فوق و شرایط مذکور و بااستفاده از الگوریتم ژنتیک در نرم‌افزار Matlab می‌توان مسیرهای بهینه حامل‌های انرژی(نفت، زغال‌سنگ، گاز و خورشیدی و بادی) را استخراج نمود. از آنجایی که مطالعات قبلی همانند مطالعه نوردهاس(۱۹۹۲) بیانگر این هست که سه عامل گسترش تحقیق و توسعه و نرخ رشد بازار و نرخ فروش تکنولوژی در کاهش هزینه تبدیل انرژی خورشید و باد در آینده اثر گذار هستند، در این تحقیق پنج سناریوی متفاوت با فرض نرخ بهینه تنزیل اجتماعی پنج درصد در نظر گرفته شده است. در سناریوی «اول» هزینه تبدیل انرژی خورشید و باد در طول زمان ثابت باقی می‌ماند اما در سناریوهای «دوم»، «سوم» و «چهارم» هزینه تبدیل انرژی خورشید و باد هر ده سال به ترتیب ۱۰، ۳۰ و ۵۰ درصد کاهش می‌یابد و در سناریوی«پنجم» هزینه اجتماعی به مدل اضافه می‌شود با این فرض که هزینه تبدیل انرژی خورشید و باد در طول زمان کاهش پیدا نمی‌کند.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286454.1392.3.11.6.8]

۵. نتایج تجربی

۱.۵. توابع تقاضای انرژی در بخش‌های مختلف اقتصادی ایران

به کارگیری روش‌های معمول اقتصادسنجی در برآورد ضرایب بااستفاده از داده‌های سری زمانی بر این فرض استوار است که متغیرهای مدل مانا هستند. وجود متغیرهای نامانا در مدل در حال می‌تواند سبب شود آزمون‌های t و F معمولی از اعتبار لازم برخوردار نبوده و رگرسیون بدست آمده یک رگرسیون کاذب باشد. از این رو با استفاده از آزمون دیکی‌فولر نتایج ذیل در مورد پایایی متغیرهای مورد استفاده در این تحقیق بدست آمده است. (جدول۱)

جدول۱. نتایج آزمون فرضیه ریشه واحد دیکی- فولر تعمیم‌یافته متغیرهای مدل

متغیر	آماره آزمون ADF	مقدار بحرانی در سطح ۵٪	مرتبه	وضعیت مانایی
DH	۶.۰۷	۳.۰۶	۱	مانا
PH	۳.۶	۳.۰۶	۲	مانا
DP	۶.۰۴	۳.۰۶	۲	مانا
PP	۴.۸۸	۳.۰۴	۰	مانا
DI	۲.۸۴	۳.۰۶		نامانا
PI	۴.۵۱	۳.۰۴	۰	مانا
DT	۶.۵۶	۳.۰۶	۲	مانا
PT	۳.۵۲	۳.۰۶	۲	مانا
DA	۴.۸۵	۳.۰۵	۱	مانا
PA	۳.۴۲	۳.۰۶	۲	مانا
DE	۳.۳۹	۳.۰۵	۱	مانا
PE	۲.۷۲	۳.۰۶		نامانا
Y	۴.۰۴	۳.۰۶	۲	مانا

منبع: یافته‌های پژوهش

در این آزمون اگر قدرمطلق آماره دیکی‌فولر تعمیم‌یافته مطابق با وقفه بهینه با توجه به معیار شوارتز در سطح معنی‌داری ۵٪، کوچکتر از قدرمطلق مقادیر بحرانی و دیکی‌فولر تعمیم‌یافته، فرضیه وجود ریشه واحد یا نامانایی متغیر رد نمی‌شود و متغیر ناماناست. از این رو با استفاده از آزمون دیکی‌فولر نتایج حاکی از پایایی متغیرهای مورد استفاده در این تحقیق است. بعد از بررسی مانایی متغیرها با استفاده از روش

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286454.1392.3.11.6.8]

رگرسیون‌های به ظاهر نامرتبط(SUR) تابع تقاضای انرژی در بخش‌های مختلف اقتصادی ایران به فرم لگاریتمی و به شرح زیر برآورد شده است:

LDH=-12.52-0.03*LPH+0.47*LY+0.65*LDH(-1)
(-1.74) (-.6) (1.9) (6.1) $R^2 = 0.90$ DW=1.88
LDP=-17.9-0.07*LPP+0.67*LY+0.4*LDP(-1)
(-2.6) (-1.60) (2.88) (3.89) $R^2 = 0.75$ DW=1.5
LDI=-7.43-0.004*LPI+0.3*LY+0.59*LDI(-1)
(-1.85) (-.1) (2.04) (2.98) $R^2 = 0.93$ DW=1.82
LDT=-8.54-0.002*LPT+0.33*LY+0.62*LDT(-1)
(-2.18) (-.12) (2.26) (3.4) $R^2 = 0.98$ DW=1.83
LDA=-5.63-0.11*LPA+0.34*LY+0.31*LDA(-1)
(-0.93) (-2) (1.64) (2.08) $R^2 = 0.34$ DW=1.93
LDE=-8.47-0.002*LPE+0.31*LY+0.73*LDE(-1)
(-1.74) (-.2) (1.80) (4.99) $R^2 = 0.98$ DW=2 (۱۱)

که در آن LDH، LDP، LDI، LDT، LDA وLDE به‌ترتیب لگاریتم تقاضای انرژی در بخش‌های خانگی، تجاری و عمومی، صنعت، حمل‌ونقل، کشاورزی و برق است و LPH، LPP، LPI، LPT، LPA و LPE به‌ترتیب لگاریتم قیمت پرداختی بابت انرژی در بخش‌های مختلف و LY تولید ناخالص داخلی می‌باشد. همچنین LDH(-1)، LDP(-1)، LDI(-1)، LDT(-1)، LDA(-1) وlDE(-1) به‌ترتیب لگاریتم تقاضای انرژی در بخش‌های خانگی، تجاری و عمومی، صنعت، حمل‌ونقل، کشاورزی و برق با یک دوره وقفه می‌باشند. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، علائم ضرایب برآورد شده منطبق با مبانی نظری بوده و اغلب ضرایب معنادار می‌باشند.

بااستفاده از توابع برآورد شده کشش‌های قیمتی و درآمدی کوتاه‌مدت و بلندمدت در بخش‌های مختلف اقتصادی ایران محاسبه گردیده است(جدول۲).

کششهای قیمتی بدست آمده از معادلات تقاضای کل انرژی حکایت از بی‌کشش بودن قیمت انرژی در بخش‌های مختلف اقتصادی دارد. این کشش در بخشهای حمل‌ونقل، صنعت و برق کمتر از سه بخش خانگی، عمومی و کشاورزی است. نظر به اینکه داده‌های آماری تقاضای انرژی در بازه زمانی ۱۳۸۸-۱۳۷۰ و قیمت‌ها بصورت یارانه‌ای بوده است بنابراین بدیهی است که کشش‌های قیمتی پایین بدست آورده شود. برای بازه مذکور امکان تدوین سناریوهای افزایش قیمت(قیمت‌های غیر یارانه‌ای) وجود ندارد زیرا در اینصورت مقادیر مصرف انرژی نیز بایست تغییر داده شود و در عمل امکان برآورد تابع تقاضای انرژی

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286454.1392.3.11.6.8]

نامکن خواهد بود. نتایج بدست آمده برای کشش درآمدی در بخش خانگی، عمومی و حمل‌ونقل بزرگتر از سایر بخش‌هاست. که این مسئله حاکی از آن است که تغییرات درآمد(در اینجا تولید ناخالص داخلی) اثر بیشتری بر مصرف انرژی در این بخش‌ها نسبت به سایر بخشها دارد. بی‌کشش بودن قیمت انرژی در بخشهای مختلف مصرفی سبب شده است تا با توجه به ساختار کنونی این بخشها و امکان جایگزین‌سازی محدود انرژی، تقاضا واکنش زیادی به افزایش قیمت نداشته باشد.

جدول۲. کشش قیمتی و درآمدی کوتاه‌مدت و بلندمدت تقاضای انرژی در بخش‌های مختلف اقتصادی ایران

بخش	کشش قیمتی کوتاه‌مدت	کشش درآمدی کوتاه‌مدت	کشش قیمتی بلندمدت	کشش درآمدی بلندمدت
خانگی	-۰.۰۳	۰.۴۷	-۰.۰۸	۱.۳
عمومی و تجاری	-۰.۰۷	۰.۶۷	-۰.۱۱	۱.۱
صنعت	-۰.۰۰۴	۰.۲	-۰.۰۰۹	۰.۴۸
حمل‌ونقل	-۰.۰۰۲	۰.۳۳	-۰.۰۰۵	۰.۸۶
کشاورزی	-۰.۱۱	۰.۳۴	-۰.۱۵	۰.۴۹
برق	-۰.۰۰۲	۰.۳۱	-۰.۰۰۷	۱.۱

منبع: یافته‌های پژوهش

۲.۵. توابع هزینه استخراج نفت،گاز و زغال‌سنگ

در مطالعه حاضر به دلیل عدم‌دسترسی به آمار و اطلاعات لازم به‌منظور برآورد توابع هزینه استخراج نفت و گاز از تابع هزینه استخراج نفت که توسط محمدی و معتمدی(۱۳۸۹) برآورد شده و همچنین تابع هزینه استخراج گاز که توسط بزرگ‌زاده و تهرانی(۱۳۸۰) برآورد شده استفاده می‌شود اما با استفاده از اطلاعات موجود هزینه استخراج و ذخایر زغال‌سنگ در ترازنامه انرژی سال ۱۳۸۹، تابع هزینه استخراج زغال‌سنگ تخمین زده شد.

محمدی و معتمدی(۱۳۸۸) هزینه تولید نفت را به سه بخش کلی هزینه‌های اکتشاف، هزینه‌های توسعه و هزینه‌های عملیاتی تولید طبقه‌بندی نمودند: هزینه اکتشاف شامل هزینه‌های جستجوی زمین‌شناسی و اکتشاف و طراحی مخازن نفتی و حفر چاههای اکتشافی بوده و سهم هزینه اکتشاف از کل هزینه‌ها ۲۰٪ است. هزینه‌های توسعه(γ_t) شامل هزینه‌های تعمیر و نگهدار ی زیرساخت‌ها بوده و تابعی از سطح تولید (Q_o) می‌باشد:

$$\gamma_t = 0.046 Q_{O_t} \qquad (۱۲)$$

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286454.1392.3.11.6.8]

هزینه‌های عملیاتی(V_t) تولید شامل این هزینه‌ها شامل مخارج نیروی انسانی و سایر هزینه‌های متغیر تولید است. فرم تابعی آن به‌صورت زیر است:

$$V_t = 0.7714Qo_t^{-0.2433} \quad (۱۳)$$

هزینه‌های کل تولید نفت C_t (جمع اجزای هزینه به اضافه ۲۰٪ برای هزینه اکتشاف) می‌باشد که به شرح زیر است:

$$C_t = 1.2(0.46Qo_t + 0.7714Qo_t^{-0.2423}) \quad (۱۴)$$

در مطالعه‌ای دیگر، بزرگ‌زاده و تهرانی(۱۳۸۰) تابع زیر را به‌عنوان تابع هزینه استخراج گاز برآورد نموده‌اند:

$$TC_t = 63Qg_t - 0.0025{Qg_t}^2 + 5.44 * 10^{-18}{Qg_t}^3 \quad (۱۵)$$

در رابطه فوق، TC هزینه کل تولید گاز طبیعی و Qg_t نیز میزان تولید گازطبیعی است. ارزیابی آماری مدل، نشانگر معنادار بودن ضرایب در سطحی بیش از ۹۹درصد است. در مطالعه حاضر تابع هزینه استخراج زغال‌سنگ نیز به فرم درجه سوم برآورد گردید:

$$TC_t = 8.9Qc_t - 4.99 * 10^{-6}{Qc_t}^2 + 8.74 * 10^{-13}{Qc_t}^3 \quad (۱۶)$$

در رابطه بالا،TC هزینه کل تولید زغال‌سنگ و Qc_t نیز میزان تولید زغال‌سنگ است. ارزیابی آماری مدل، نشانگر معنادار بودن ضرایب در سطح ۹۲درصد است.

۲.۵. ۱. هزینه‌های تبدیل

هزینه تبدیل از جمع هزینه عملیاتی و هزینه سرمایه‌گذاری سالانه بدست می‌آید. برای مدل جایگزینی انرژی نو هزینه تبدیل برق بوجود آمده از انرژی خورشید و باد و هزینه برق بوجود آمده در نیروگاهها برای انتقال برق به بخش‌های مختلف تقاضا را در نظر می‌گیریم. هزینه تبدیل انرژی خورشیدی ۶۰۰۰ ریال به ازای یک کیلو وات‌ساعت و هزینه تبدیل انرژی بادی۱۲۰۰ ریال بازای یک کیلو وات‌ساعت است که به طور میانگین ۳۸۰۰ ریال بازای یک کیلو وات ساعت(معادل ۱۰۵۵ میلیارد ریال بر پتاژول) است. هزینه تبدیل برق در نیروگاه‌های گازی و بخاری به‌طور یکسان ۸۱۳ دلار به ازای یک کیلو وات‌ساعت می‌باشد که معادل ۲۷۶ هزارمیلیارد ریال بر پتاژول است (شرکت برق منطقه‌ای اصفهان، ۱۳۹۱).

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286454.1392.3.11.6.8]

۲.۲.۵. هزینه اجتماعی

طبق گزارش توسعه انسانی سازمان‌ملل در سال ۲۰۰۷، ایران ۱/۵ درصد نشر جهانی CO_2 را داشته و سیزدهمین منتشر کننده‌ی دی‌اکسیدکربن بوده است. در این تحقیق با وارد کردن هزینه‌های اجتماعی ناشی از مصرف انرژی‌های فسیلی در بخش‌های مختلف اقتصادی ایران، میزان کاهش مازاد رفاه اجتماعی بررسی گردیده است.

بدین‌منظور ابتدا معادل مصرف انرژی سوخت‌های فسیلی(نفت،گاز و زغال‌سنگ) در بخش‌های مختلف برحسب پتاژول محاسبه می‌شود. سپس مقدار کربن انتشار یافته، با ضرب کردن مقدار مصرف انرژی فسیلی در ضریب انتشار کربن(جدول۳) به دست می‌آید. با ضرب مقدار انتشار کربن در هزینه اجتماعی، هزینه کل اجتماعی ناشی از مصرف سوخت‌های فسیلی و نشر کربن به دست می‌آید. هزینه اجتماعی ناشی از انتشار هر تن کربن در سال ۱۳۸۱، ۸۰۰۰۰ ریال بوده(ترازنامه انرژی کشور، ۱۳۸۹) که بااستفاده از شاخص قیمت به ۴۰۰۰۰۰ ریال در سال ۱۳۸۹ تعدیل گردیده است.

جدول۳. ضریب انتشار کربن

نوع سوخت	ضریب انتشار کربن(پتاژول/تن کربن)
گاز طبیعی	۱۵۳۰۰
نفت و فرآورده‌های نفتی	۱۹۵۰۰
زغال سنگ	۲۵۸۰۰

ماخذ:IPCC

۳.۲.۵. ضرایب تبدیل

ضرایب تبدیل مورد استفاده در این تحقیق از ترازنامه انرژی ایران(۱۳۸۹) استخراج گردید.(جدول۴)

جدول٤. ضرایب تبدیل

بخش	نفت	گاز	زغال سنگ	خورشید و باد
خانگی	۰.۷۶	۰.۶۱	۰.۲	۰.۱۶
تجاری و عمومی	۰.۷۶	۰.۶۱	۰.۲	۰.۱۶
صنعت	۰.۷۶	۰.۶۱	۰.۲	۰.۱۶
حمل‌ونقل	۰.۷۶	۰.۶۱	۰.۲	۰.۱۶
کشاورزی	۰.۷۶	۰.۶۱	۰.۲	۰.۱۶
برق	۰.۳۷	۰.۳۷	۰.۲	۰.۱۶

منبع: ترازنامه انرژی ایران

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

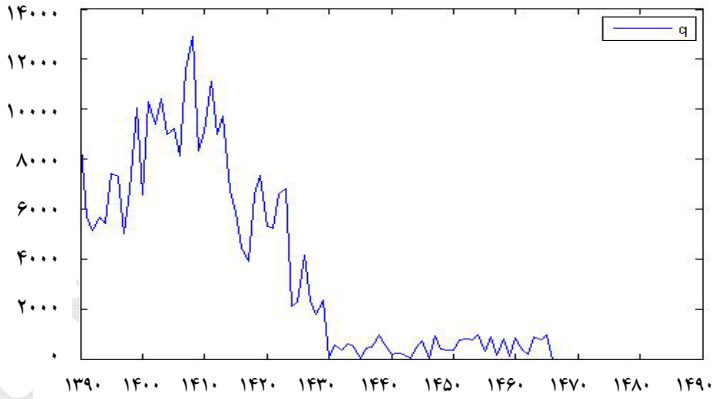
[DOR: 20.1001.1.22286454.1392.3.11.6.8]

۳.۵. زمان جایگزینی انرژی‌های نو به جای انرژی‌های فسیلی در سناریوهای مختلف

بااستفاده از مدل تصریح شده قسمت قبل مقادیر بهینه مصرف انرژی(نفت، گاز، زغال‌سنگ و خورشید و باد) در بخش‌های مختلف(خانگی، تجاری و عمومی، صنعت، حمل‌ونقل، کشاورزی و برق) طی زمان‌های آتی محاسبه[1] و از این طریق زمان جایگزینی انرژی خورشید و باد در سناریوهای مختلف بررسی شده و نتایج زیر بدست آمده است:

سناریوی اول: نتایج تحقیق نشان می‌دهند با فرض ثابت بودن هزینه تبدیل انرژی خورشید و باد، بترتیب بخش عمومی و تجاری بعد از ۲۵ سال، بخش حمل‌و نقل بعد از ۲۷ سال، بخش کشاورزی بعد از ۳۰ سال، بخش برق بعد از ۳۵ سال، بخش خانگی بعد از ۴۱ سال و بخش صنعت بعد از ۷۷ سال، تقاضای خود از انرژی‌های فسیلی را به سمت انرژی‌های خورشید و باد انتقال خواهند داد. شکل۱ مسیر زمانی جایگزینی انرژی‌های خورشید و باد در بازه زمانی ۱۴۹۰-۱۳۹۰ نمایش می‌دهد.

در این شکل q مجموع تقاضای انرژی فسیلی شامل نفت، گاز و زغال‌سنگ در بخش‌های خانگی، تجاری و عمومی، صنعت، کشاورزی، حمل‌ونقل و برق(برحسب پتاژول) می‌باشدکه براساس سناریو اول، ۷۷ سال دیگر مصرف انرژی فسیلی در همه بخش‌های مختلف اقتصادی صفر و انرژی‌های خورشید و باد جایگزین آن می‌شود.



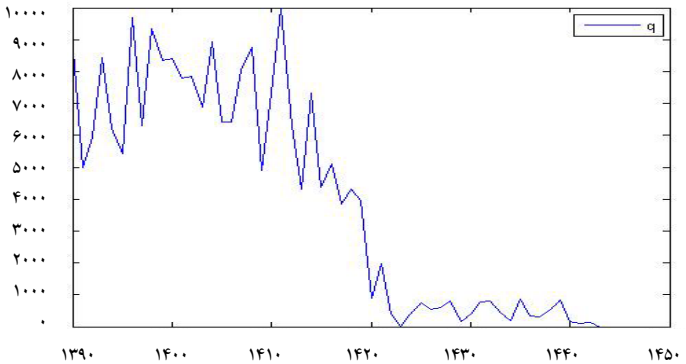
شکل۱. جایگزینی انرژی‌های نو در سناریوی اول
(بدون کاهش هزینه تبدیل انرژی خورشید و باد)

منبع: یافته‌های پژوهش

۱. به دلیل حجیم بودن نتایج، نتایج جزئی مربوط به مقدار مصرف انرژی(نفت، گاز، زغال‌سنگ و خورشید و باد) در بخش‌های مختلف گزارش نشده است. در صورت تمایل با نویسندگان مقاله مکاتبه شود.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286454.1392.3.11.6.8]

سناریوی دوم: با فرض کاهش ۱۰ درصدی هزینه تبدیل انرژی خورشید و باد در هر ده سال، بخش عمومی و تجاری بعد از ۲۱ سال، بخش حمل‌ونقل بعد از ۲۳ سال، بخش کشاورزی بعد از ۲۶ سال، بخش برق بعد از ۳۰ سال، بخش خانگی بعد از ۳۳ سال و بخش صنعت بعد از ۵۴ سال انتقال از انرژی‌های فسیلی به‌سمت انرژی خورشید و باد صورت می‌گیرد. بر این اساس در سناریوی دوم، ۵۴ سال دیگر تقاضای انرژی فسیلی در همه بخش‌های مختلف اقتصادی صفر می‌شود و انتقال به سمت انرژی‌های خورشید و باد کامل می‌شود.(شکل۲)

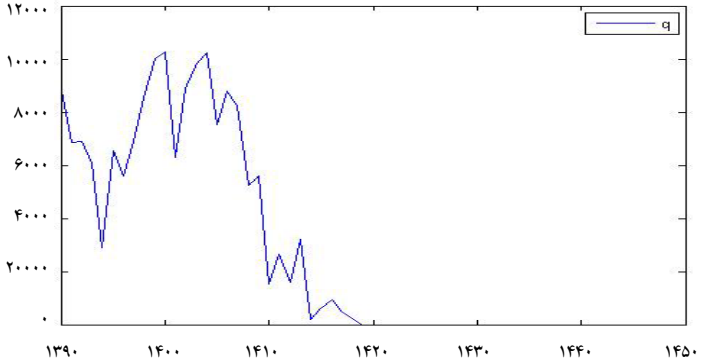


شکل۲. جایگزینی انرژی‌های نو در سناریوی دوم
(کاهش ۱۰ درصدی هزینه تبدیل انرژی خورشید و باد در هر ده سال)

منبع: یافته‌های پژوهش

سناریوی سوم: با فرض کاهش ۳۰ درصدی هزینه تبدیل انرژی خورشید و باد در هر ده سال، بخش عمومی و تجاری بعد از ۱۸ سال، بخش حمل‌ونقل بعد از ۲۰ سال، بخش کشاورزی بعد از ۲۱ سال، بخش برق بعد از ۲۱ سال، بخش خانگی بعد از ۲۵ سال و بخش صنعت بعد از ۳۰ سال انتقال از انرژی‌های فسیلی به سمت انرژی خورشید و باد صورت می‌گیرد. بنابراین با فرض سناریوی سوم،۳۰ سال دیگر تقاضای انرژی فسیلی در همه بخش‌های مختلف اقتصادی صفر می‌شود و انتقال به سمت انرژی‌های خورشید و باد صورت می‌گیرد.(شکل۳)

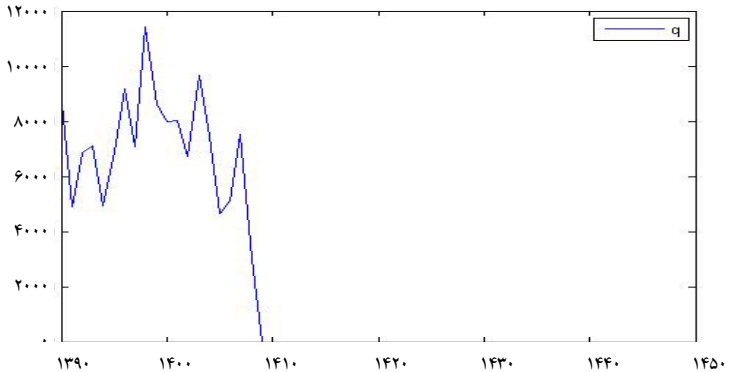
[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286454.1392.3.11.6.8]



شکل۳. جایگزینی انرژی‌های نو در سناریوی سوم
(کاهش ۳۰ درصدی هزینه تبدیل انرژی خورشید و باد در هر ده سال)

منبع: یافته‌های پژوهش

سناریوی چهارم: با فرض سناریوی چهارم، بخش عمومی و تجاری بعد از ۱۳سال، بخش حمل‌ونقل بعد از ۱۶ سال، بخش کشاورزی بعد از ۱۸ سال، بخش برق بعد از ۲۰ سال، بخش خانگی بعد از ۲۰ سال و بخش صنعت بعد از ۲۰ سال انتقال از انرژی‌های فسیلی به سمت انرژی خورشید و باد صورت می‌گیرد. بنابراین با فرض کاهش ۵۰ درصدی هزینه تبدیل انرژی خورشید و باد در هر ده سال،۲۰ سال دیگر تقاضای انرژی فسیلی در همه بخش‌های مختلف اقتصادی صفر می‌شود و انتقال به سمت انرژی‌های خورشید و باد صورت می‌گیرد.(شکل۴)



شکل٤. جایگزینی انرژی‌های نو در سناریوی چهارم
(کاهش ۵۰ درصدی هزینه تبدیل انرژی خورشید و باد در هر ده سال)

منبع: یافته‌های پژوهش

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286454.1392.3.11.6.8]

سناریوی پنجم: با وارد کردن هزینه‌های اجتماعی ایجاد شده ناشی از انتشار دی‌اکسیدکربن در مدل تاثیر آن بر مازاد رفاه اجتماعی و مسیر زمانی جایگزینی انرژی خورشید بررسی شد. نتایج نشان می‌دهند که میزان مازاد رفاه اجتماعی از ۱.۷۷۶۴e+۰۱۸ در سناریوی اول به ۱.۷۱۱۷۷e+ ۰۱۸ در سناریوی پنجم کاهش می‌یابد. اما تغییری در مسیر جایگزینی صورت نمی‌گیرد.

٦. نتیجه‌گیری

در این مطالعه با طراحی یک مدل کنترل بهینه چگونگی جایگزینی انرژی‌های نو به‌جای انرژی‌های فسیلی بررسی شد. نتایج نشان می‌دهد که سهم مصرف انرژهای خورشیدی و بادی در بخش‌های مختلف طی سال‌های آتی افزایش پیدا می‌کند و با تکنولوژی موجود و عدم تغییرهزینه تبدیل انرژی خورشید و باد، در سال ۱۴۶۶ جایگزینی انرژهای خورشیدی و بادی صورت می‌گیرد و با کاهش هزینه تبدیل انرژی خورشید و باد از ۱۰ تا ۵۰ درصد در هر ده سال مدت جایگزینی از سال ۱۴۴۳ به سال ۱۴۰۹ کاهش می‌یابد.

در این راستا موارد زیر باید مورد تاکید باشد:

تدوین راهبرد، برای ایجاد انگیزهٔ لازم برای ظهور انواع انرژی‌های جایگزین و تجدیدپذیر در صحنهٔ اقتصاد کشور.

حصول اطمینان از این که منابع سرمایه‌ای کافی برای تسهیل حضور انواع انرژی‌های جایگزین و تجدیدپذیر در اقتصاد کشور در زمان‌های مورد نیاز وجود خواهد داشت.

موضوع کاهش آلایندگی انرژی، محوری است که در آینده‌نگری در مورد انرژی باید به آن توجه شود. در این چهارچوب جایگزینی سوخت‌های فسیلی یک چشم‌انداز اجتناب‌ناپذیر است.

در ایران، انرژی شامل نفت، گاز با قیمت کم در اختیار مردم قرار می‌گیرد و باید با تدوین استانداردهای مصرف انرژی در ساختمان‌ها، وسایل خانگی، لامپ‌های روشنایی، مبدل‌های صنعتی، وسایل‌نقلیه و غیره از مصرف انرژی در این قسمت‌ها به میزان چشم‌گیری کاست.

تکنولوژی کاربردهای انرژی خورشیدی و بادی آنقدر پیچیده نیست که به استفاده از متخصصان خارجی نیاز داشته باشیم. می‌توان با تلاشی مختصر، تکنولوژی مربوط به آن را از طریق تحقیق و توسعه و بازاریابی افزایش داد.

دولت ایران در دهه‌های گذشته وارد کننده تکنولوژی برای حل مسائل خود بوده است. به دلیل محدود بودن انرژی‌های فسیلی و امکان تمام شدن این منابع‌طبیعی بسیار پرارزش، ما می‌توانیم از فرصت تحریم‌ها

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286454.1392.3.11.6.8]

استفاده کنیم و به فکر توسعه منابع انرژی خورشیدی و بادی باشیم و به‌جای وارد کننده بودن، به‌عنوان صادر کننده تکنولوژی انرژی خورشیدی مطرح شویم.

پیشنهاد می‌شود نسبت به تقاضای انرژی در بخش حمل‌ونقل و عمومی توجه شود زیرا با توجه به رشد زیاد وسایل حمل‌ونقل و رشد تقاضای انرژی فسیلی در این بخش نیاز به تکنولوژی‌های جدید با فناوری مصرف سوخت فسیلی کمتر یا انرژی‌های نو می‌باشد.

منابع و مآخذ

احمدیان، مجید(۱۳۷۰)، **نظریه قیمت در اقتصاد منابع پایان‌پذیر کاربرد نظریه کنترل**، تهران: انتشارات دانشگاه تهران.

اینتریلیگیتور، میشل (۱۳۸۷)، **بهینه‌سازی ریاضی**، ترجمهٔ حسین علی‌پور کاظمی، تهران: دانشگاه شهید بهشتی.

بزرگ‌زاده، مهدی و علی‌اکبر تهرانی(۱۳۸۰) بررسی تابع هزینه گازطبیعی در ایران، *اقتصاد انرژی*، شماره ۲۳ و۲۴، صص۵۳-۵۶.

چیانگ، آلفا.(۱۳۸۷)، **اصول بهینه‌یابی پویا**، ترجمه عباس شاکری و فریدون اهرابی، تهران: انتشارات دانشگاه علامه‌طباطبایی.

خوش‌اخلاق، رحمان، علیمراد شریفی و میثم کوچک‌زاده(۱۳۸۴)، ارزیابی اقتصادی نیروگاه خورشیدی در ایران، *فصلنامه پژوهش‌های اقتصادی ایران*، سال هفتم، شماره ۲۴، صص۱۷۱-۱۹۶.

سهیلی، کیومرث(۱۳۸۶) الگوی تقاضا و تحلیل دینامیک تقاضای انرژی در ایران، *فصلنامه پژوهش‌های اقتصادی*، سال هفتم، شماره دوم، صص۶۷-۸۶.

سوری، علی (۱۳۹۰)، **اقتصاد ریاضی: روش‌ها و کاربردها**، تهران: انتشارات سمت.

شعر بافیان، نیلوفر(۱۳۸۶) برآورد پتانسیل فنی و اقتصادی انرژی خورشیدی حرارتی در ایران: راهکاری برای توسعه پایدار انرژی خورشیدی، *فصلنامه مطالعات اقتصاد انرژی*، شماره۱۵، صص ۳۵-۵۴.

شیرین‌بخش، شمس‌الله و زهرا حسن‌خونساری(۱۳۸۴)،**کاربرد Eviews در اقتصاد سنجی**، انتشارات پژوهشکده امور اقتصادی.

عبدلی، قهرمان(۱۳۸۸)، تخمین نرخ تنزیل اجتماعی برای ایران، *پژوهش‌های اقتصادی*، سال نهم، شماره سوم، صص۱۳۵-۱۵۶.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286454.1392.3.11.6.8]

لطفعلی‌پور، محمدرضا و ملیحه آشنا(۱۳۸۹) بررسی عوامل‌موثر بر انتشار دی‌اکسیدکربن در اقتصاد ایران، *فصلنامه مطالعات اقتصاد انرژی*، سال هفتم، شماره۲۴،صص ۱۲۱- ۱۴۵ .

محمدی، تیمور و منیره معتمدی(۱۳۸۹) بهینه‌یابی تولید نفت در ایران(مطالعه موردی میدان هفتگل با تاکید بر تولید صیانتی)، *پژوهشنامه اقتصادی*، سال دهم، شماره سوم،ص۲۳۵- ۲۶۵ .

وزارت نیرو(۱۳۸۸)، ترازنامه انرژی سال ۱۳۸۸، معاونت امور انرژی. دفتر برنامه‌ریزی‌های انرژی.

Chakravorty.U (2001) "Endogenous Substitution of Energy Resources:Theory and Application to the Indian Energy Sector"," in M. Toman et al., eds., India and Global Climate Change: Perspectives on Economics and Policy from a Developing Country, Washington, D.C.: RFF Press, pp138.

Chakravorty. U, Magné.B, Moreaux. M. (2003) "From Coal to Clean Energy: Hotelling with a Limit on the Stock of Externalities". IDEI Working Paper n. 229 .

Chakravorty. U,Krulce. D.L. (Nov., 1994). "Heterogeneous Demand and Order of Resource Extraction . Econometrica", Vol. 62, No. 6, pp. 1445-1452

Chakravorty.U , Moreaux.M, Tidball.M.(May 2008). "Ordering the Extraction of Polluting Nonrenewable Resources".American Economic Review. Vol. 98, No. 3, pp. 1128-1144

Chakravorty.U, Roumasset.J, Tse.K(December 1997). "Endogenous Substitution among Energy Resources and Global Warming",Journal of Political Economy, Vol. 105, No. 6, pp. 1201-1234

Chakravorty.U, Tse.K.P.(1999). "Transition from Fossil Fuels to Renewable Energy: Evidence from a Dynamic Simulation Model with Endogenous Resources Substitution". Indian Journal of Quantitative Economics14(1)

Hoteling, h.(1973). "The Economics of Exhaustible Resources".Journal of political Economy, pp.137-175.

Nordhaus, William D. ''The Allocation of Energy Resources.'' Brookings Papers.Econ. Activity, no. 3.

Roumasset.J, Christopher Wada.C. (JUNE 2011). "Ordering the Extraction of Renewable Resources: Hotelling, Herfindahl, and Groundwater (431) Association of Environmental and Resource Economists". Inaugural Summer Conference 9-10, Seattle

http://www.eia.doe.gov
http://www.iea.com
http://www.suna.org.ir
http://www.bp.com

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286454.1392.3.11.6.8]