

# ارزیابی جایگزینی انرژی‌های تجدیدپذیر به جای سوخت‌های فسیلی

## در ایران: رهیافت کنترل بهینه

علیمراد شریفی<sup>۱</sup> غلامحسین کیانی<sup>۲</sup> رحمان خوش اخلاق<sup>۳</sup> محمد مهدی باقری<sup>۴</sup>

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۱/۱۲/۰۱

تاریخ دریافت: ۱۳۹۱/۰۷/۰۵

### چکیده

اگرچه سوخت‌های فسیلی رشد سریع اقتصادی جوامع بشری را به همراه 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 رفاه اجتماعی، یک مدل کنترل بهینه طراحی و با استفاده از روش الگوریتم ژنتیک، مسیرهای بهینه جایگزینی انرژی خورشید و باد به جای 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 به سمت 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. کارشناس ارشد اقتصاد دانشگاه اصفهان، Email: bagheri.mohammad1366@gmail.com

## 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 با استفاده از آفتاب و باد تامین کرد. در این راستا در این مطالعه مسیر بهینه جایگزینی انرژی خورشید و باد به جای 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 به طور 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 به منظور تامین مصرف داخلی؛ (۴) گسترش تحقیقات بنیادی و توسعه‌ای و تربیت نیروی انسانی 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 به جای سوخت‌های فسیلی در پنج سناریو ارائه می‌شود.

## 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. شعرافیان (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<sup>۱</sup>، روماست<sup>۲</sup> و تسه<sup>۳</sup> (۱۹۹۷) اشاره نمود. در این مطالعه با توسعه یک مدل در قالب روش کنترل بهینه و استفاده از توابع 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 گاز طبیعی 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 زغال‌سنگ در نیمه دوم قرن بیست و یکم خواهد شد.

## ۳. روش تحقیق

هتلینگ<sup>۴</sup> (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

حاضر است پردازد 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" یاد می‌شود.

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

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

با قید:

$$\dot{Q}_i(t) = - \sum_{j=1}^J \frac{d_{ij}(t)}{u_{ij}} \quad (2)$$

در مدل فوق  $i$  منابع موجود (نفت، زغال‌سنگ، گاز طبیعی و انرژی خورشید و باد)،  $j$  بخش‌های اقتصادی (بخش خانگی، تجاری و عمومی، صنعت، حمل‌ونقل، کشاورزی و برق) و  $\Gamma$  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:

$$P_j(t) = D_j^{-1} \left[ \sum_{i=1}^I d_{ij}(t) \right] \quad (3)$$

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<sup>۲</sup> شناخته می‌شود:  $U_{ij} < 1$ . همچنین  $d_{ij}$  خالص انرژی تحویل داده شده از منبع  $i$  نسبت به تقاضای  $j$  از  $q_{ij}(t)$  واحد از منبع است که به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$d_{ij}(t) = u_{ij} q_{ij}(t) \quad (4)$$

1. Modified Hotelling's Rule
2. Efficiency Factors

$Q_i(t)$  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:

$$W_{ij} = C_i + Z_{ij} \quad (5)$$

$C_i$  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. بدین منظور ابتدا ارزش فعلی همیلتونی برای این مسئله به شرح زیر بدست می‌آید:

$$H = \sum_{j=1}^J \int_0^{\lambda_i(t)} d_{ij}(t) D_j^{-1}(\theta) d\theta - \sum_{j=1}^J \sum_{i=1}^I \frac{w_{ij}}{u_{ij}} d_{ij}(t) - \sum_{i=1}^I \lambda_i(t) \sum_{j=1}^J \frac{d_{ij}(t)}{u_{ij}} \quad (6)$$

$\lambda_i$  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 هتلینگک به شرح زیر است:

$$\dot{Q}_i(t) = - \sum_{j=1}^J \frac{d_{ij}(t)}{u_{ij}} \quad i = 1, \dots, I; \quad j = 1, \dots, J \quad (7)$$

$$\dot{\lambda}_i(t) = r \lambda_i(t), \quad i = 1, \dots, I \quad (8)$$

$$P_j(t) \leq \frac{w_{ij} + \lambda_i(t)}{u_{ij}}, \quad i = 1, \dots, I; \quad j = 1, \dots, J \quad (9)$$

$$P_j(T_j) = \frac{z_{bj}}{u_{ij}}, \quad j = 1, \dots, J \quad (10)$$

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 هتلینگک 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

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<sup>۱</sup> ( $y_0$ ) و میانگین نرخ رشد تولید ناخالص داخلی سال‌های گذشته ( $g$ )<sup>۲</sup> و نرخ تنزیل<sup>۳</sup> ( $r$ ) به شرح زیر محاسبه می‌شود.

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

در این مطالعه برای برآورد توابع تقاضای انرژی در بخش‌های مختلف از فرم تابعی کاب-داگلاس<sup>۴</sup> استفاده گردید:

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

که در آن  $E$  تقاضای انرژی در سال  $t$ ،  $E_{t-k}$  تقاضای انرژی در  $k$  سال قبل،  $\gamma$ ،  $A$ ،  $\beta$  مقادیر ثابت،  $Y$  درآمد (تولید ناخالص داخلی) در سال  $t$ ،  $P$  قیمت وزنی حامل‌های انرژی در سال  $t$ ،  $\alpha$  و  $\beta$  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 بدین خاطر صورت پذیرفته است که مقاله حاضر نخستین مقاله‌ای است که با فرض برونزا در نظر گرفتن 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 نظر گرفتن 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.

قیمتی و درآمدی کوتاه‌مدت تقاضا و  $(\beta = \frac{\beta}{1-\gamma})$  و  $(\alpha = \frac{\alpha}{1-\gamma})$  بر ترتیب 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:

$$p = \left( \frac{E}{e^{\theta E(-1)^{\gamma} y^{\beta}} \alpha} \right)^{\frac{1}{\alpha}} \quad (10)$$

#### ۴. توصیف داده‌ها

با توجه به آمار موجود، دوره زمانی ۱۳۷۰-۱۳۸۹ 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 با استفاده از الگوریتم ژنتیک در نرم‌افزار Matlab می‌توان مسیره‌های بهینه حامل‌های انرژی (نفت، زغال‌سنگ، گاز و خورشیدی و بادی) را استخراج نمود. از آنجایی که مطالعات قبلی همانند مطالعه نورداس (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 اثرگذار 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.

## ۵. نتایج تجربی

## ۱.۵. توابع تقاضای انرژی در بخش‌های مختلف اقتصادی ایران

به کارگیری روش‌های معمول اقتصادسنجی در برآورد ضرایب با استفاده 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  $F$  و  $t$  معمولی از اعتبار لازم برخوردار نبوده و رگرسیون بدست آمده یک رگرسیون کاذب باشد. از این رو با استفاده از آزمون دیکی فولر نتایج ذیل در مورد پایایی متغیرهای مورد استفاده در این تحقیق بدست آمده است. (جدول ۱)

جدول ۱. نتایج آزمون فرضیه ریشه واحد دیکی - فولر تعمیم یافته 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 دیکی فولر تعمیم یافته مطابق با وقفه بهینه با توجه به معیار شوارتز در سطح معنی داری ۵٪، کوچکتر از قدرمطلق مقادیر بحرانی و دیکی فولر تعمیم یافته، فرضیه وجود ریشه واحد یا نامانایی متغیر رد نمی‌شود و متغیر ناماناست. از این رو با استفاده از آزمون دیکی فولر نتایج حاکی از پایایی متغیرهای مورد استفاده در این تحقیق است. بعد از بررسی مانایی متغیرها با استفاده از روش

رگرسیون‌های به‌ظاهر نامرتب (SUR) تابع تقاضای انرژی در بخش‌های مختلف اقتصادی ایران به‌فرم لگاریتمی و به‌شرح زیر برآورد شده است:

$$\begin{aligned}
 LDH &= -12.52 - 0.03 * LPH + 0.47 * LY + 0.65 * LDH(-1) \\
 & \quad (-1.74) \quad (-.6) \quad (1.9) \quad (6.1) \quad R^2 = 0.90 \quad DW = 1.88 \\
 LDP &= -17.9 - 0.07 * LPP + 0.67 * LY + 0.4 * LDP(-1) \\
 & \quad (-2.6) \quad (-1.60) \quad (2.88) \quad (3.89) \quad R^2 = 0.75 \quad DW = 1.5 \\
 LDI &= -7.43 - 0.004 * LPI + 0.3 * LY + 0.59 * LDI(-1) \\
 & \quad (-1.85) \quad (-.1) \quad (2.04) \quad (2.98) \quad R^2 = 0.93 \quad DW = 1.82 \\
 LDT &= -8.54 - 0.002 * LPT + 0.33 * LY + 0.62 * LDT(-1) \\
 & \quad (-2.18) \quad (-.12) \quad (2.26) \quad (3.4) \quad R^2 = 0.98 \quad DW = 1.83 \\
 LDA &= -5.63 - 0.11 * LPA + 0.34 * LY + 0.31 * LDA(-1) \\
 & \quad (-0.93) \quad (-2) \quad (1.64) \quad (2.08) \quad R^2 = 0.34 \quad DW = 1.93 \\
 LDE &= -8.47 - 0.002 * LPE + 0.31 * LY + 0.73 * LDE(-1) \\
 & \quad (-1.74) \quad (-.2) \quad (1.80) \quad (4.99) \quad R^2 = 0.98 \quad DW = 2 \quad (11)
 \end{aligned}$$

که در آن LDH، LDP، LDI، LDT، LDA و LDE به‌ترتیب لگاریتم تقاضای انرژی در بخش‌های خانگی، تجاری و عمومی، صنعت، حمل‌ونقل، کشاورزی و برق است و LPA، LPT، LPI، LPP، LPH 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) و IDE(-1) به‌ترتیب لگاریتم تقاضای انرژی در بخش‌های خانگی، تجاری و عمومی، صنعت، حمل‌ونقل، کشاورزی و برق با یک‌دوره وقفه می‌باشند. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، علائم ضرایب برآورد شده منطبق با مبانی نظری بوده و اغلب ضرایب معنادار می‌باشند.

با استفاده از توابع برآورد شده کشش‌های قیمتی و درآمدی کوتاه‌مدت و بلندمدت در بخش‌های مختلف اقتصادی ایران محاسبه گردیده است (جدول ۲).

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 ۱۳۷۰-۱۳۸۸ 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

ناممکن خواهد بود. نتایج بدست آمده برای کَشش 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. بی‌کَشش 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.

## جدول ۲. کَشش قیمتی و درآمدی کوتاه‌مدت و بلندمدت تقاضای انرژی

### در بخش‌های مختلف اقتصادی ایران

| بخش           | کَشش قیمتی کوتاه‌مدت | کَشش درآمدی کوتاه‌مدت | کَشش قیمتی بلندمدت | کَشش 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 زغال سنگ

در مطالعه حاضر به دلیل عدم دسترسی به آمار و اطلاعات لازم به منظور 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 ( $\gamma_t$ ) شامل هزینه‌های تعمیر و نگهداری زیرساخت‌ها بوده و تابعی از سطح تولید ( $Q_t$ ) می‌باشد:

$$\gamma_t = 0.046Q_t \quad (12)$$

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

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

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

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

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

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

در رابطه فوق،  $TC$  هزینه کل تولید گاز طبیعی و  $Qg_t$  نیز میزان تولید گاز طبیعی است. ارزیابی آماری مدل، نشانگر معنادار بودن ضرایب در سطحی بیش از ۹۹ درصد 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 ۹۲ درصد 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 وات ساعت و هزینه تبدیل انرژی بادی ۱۲۰۰ ریال بازای یک کیلو وات ساعت 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 وات ساعت می‌باشد که معادل ۲۷۶ هزارمیلیارد ریال بر پتاژول است (شرکت برق منطقه‌ای اصفهان، ۱۳۹۱).

## ۲.۲.۵. هزینه اجتماعی

طبق گزارش توسعه انسانی سازمان ملل در سال ۲۰۰۷، ایران ۱/۵ درصد نشر جهانی CO<sub>2</sub> را داشته و سیزدهمین منتشر کننده‌ی دی‌اکسید کربن 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.

بدین منظور ابتدا معادل مصرف انرژی سوخت‌های فسیلی (نفت، گاز و زغال‌سنگ) در بخش‌های مختلف برحسب پناژول محاسبه می‌شود. سپس مقدار کربن انتشار یافته، با ضرب کردن مقدار مصرف انرژی فسیلی در ضریب انتشار کربن (جدول ۳) 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 با استفاده از شاخص قیمت به ۴۰۰۰۰۰ ریال در سال ۱۳۸۹ تعدیل گردیده است.

## جدول ۳. ضریب انتشار کربن

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

ماخذ: IPCC

## ۲.۲.۵. ضرایب تبدیل

ضرایب تبدیل مورد استفاده در این تحقیق از ترازنامه انرژی ایران (۱۳۸۹) استخراج گردید. (جدول ۴)

## جدول ۴. 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         |
| حمل و نقل     | 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         |

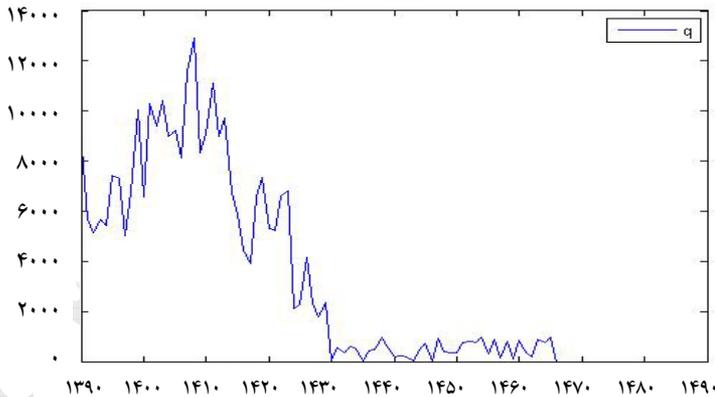
منبع: ترازنامه انرژی ایران

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

با استفاده 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<sup>۱</sup> 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 حمل‌ونقل 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. شکل ۱ مسیر زمانی جایگزینی انرژی‌های خورشید و باد در بازه زمانی ۱۳۹۰-۱۳۹۰ 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) می‌باشد که براساس سناریو اول، ۷۷ سال دیگر مصرف انرژی فسیلی در همه بخش‌های مختلف اقتصادی صفر و انرژی‌های خورشید و باد جایگزین آن می‌شود.

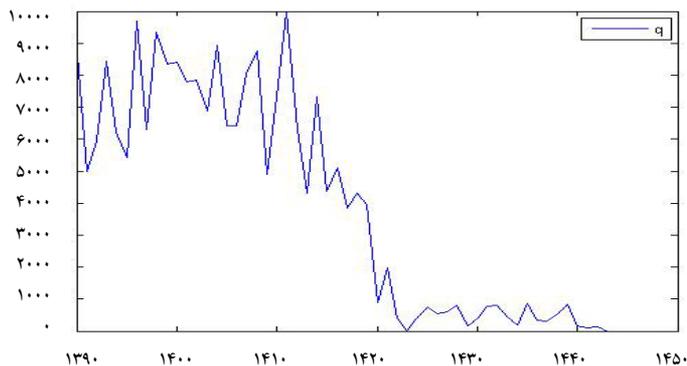


شکل ۱. جایگزینی انرژی‌های نو در سناریوی اول  
(بدون کاهش هزینه تبدیل انرژی خورشید و باد)

منبع: یافته‌های پژوهش

۱. به دلیل حجم 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.

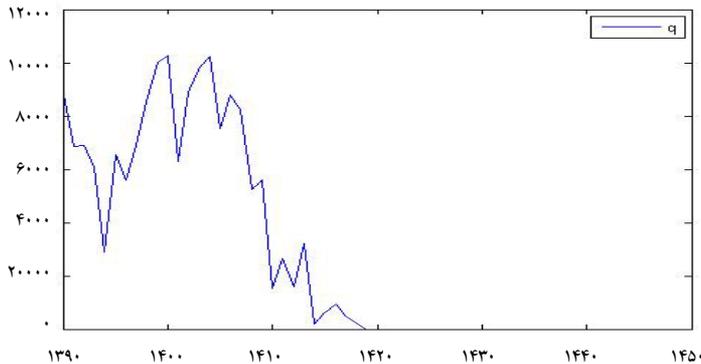
**سناریوی دوم:** با فرض کاهش ۱۰ درصدی هزینه تبدیل انرژی خورشید و باد در هر ده سال، بخش عمومی و تجاری بعد از ۲۱ سال، بخش حمل‌ونقل بعد از ۲۳ سال، بخش کشاورزی بعد از ۲۶ سال، بخش برق بعد از ۳۰ سال، بخش خانگی بعد از ۳۳ سال و بخش صنعت بعد از ۵۴ سال انتقال از انرژی‌های فسیلی به سمت انرژی خورشید و باد صورت می‌گیرد. 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. (شکل ۲)



**شکل ۲. جایگزینی انرژی‌های نو در سناریوی دوم**  
(کاهش ۱۰ درصدی هزینه تبدیل انرژی خورشید و باد در هر ده سال)

منبع: یافته‌های پژوهش

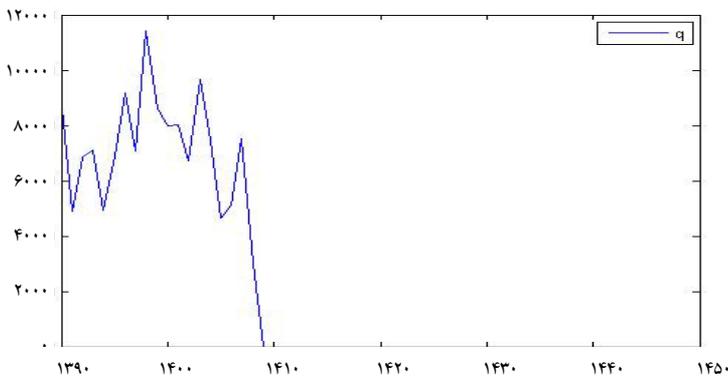
**سناریوی سوم:** با فرض کاهش ۳۰ درصدی هزینه تبدیل انرژی خورشید و باد در هر ده سال، بخش عمومی و تجاری بعد از ۱۸ سال، بخش حمل‌ونقل بعد از ۲۰ سال، بخش کشاورزی بعد از ۲۱ سال، بخش برق بعد از ۲۱ سال، بخش خانگی بعد از ۲۵ سال و بخش صنعت بعد از ۳۰ سال انتقال از انرژی‌های فسیلی به سمت انرژی خورشید و باد صورت می‌گیرد. 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. (شکل ۳)



شکل ۳. 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 ۱۳ سال، 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. (شکل ۴)



شکل ۴. جایگزینی انرژی‌های نو در سناریوی چهارم  
(کاهش ۵۰ درصدی هزینه تبدیل انرژی خورشید و باد در هر ده سال)

منبع: یافته‌های پژوهش

**سناریوی پنجم:** با وارد کردن هزینه‌های اجتماعی ایجاد شده ناشی از انتشار دی‌اکسید کربن 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  $۱.۷۱۱۷e+۰۱۸$  در سناریوی پنجم کاهش می‌یابد. اما تغییری در مسیر جایگزینی صورت نمی‌گیرد.

## ۶. نتیجه‌گیری

در این مطالعه با طراحی یک مدل کنترل بهینه چگونگی جایگزینی انرژی‌های نو به جای انرژی‌های فسیلی بررسی شد. نتایج نشان می‌دهد که سهم مصرف انرژی‌های خورشیدی و بادی در بخش‌های مختلف طی سال‌های آتی افزایش پیدا می‌کند و با تکنولوژی موجود و عدم تغییر هزینه تبدیل انرژی خورشید و باد، در سال ۱۴۶۶ جایگزینی انرژی‌های 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 انگیزه لازم برای ظهور انواع انرژی‌های جایگزین و تجدیدپذیر در صحنه 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 آلاینده‌گی 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، وسایل نقلیه 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 منابع طبیعی بسیار پرارزش، ما می‌توانیم از فرصت تحریم‌ها

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، ترجمه حسین علی‌پور کاظمی، تهران: دانشگاه شهید بهشتی.

بزرگ‌زاده، مهدی و علی‌اکبر تهرانی (۱۳۸۰) بررسی تابع هزینه گاز طبیعی در ایران، *اقتصاد انرژی*، شماره ۲۳ و ۲۴، صص ۵۳-۵۶.

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

خوش‌اخلاق، رحمان، علیمراد شریفی و میثم کوچک‌زاده (۱۳۸۴)، ارزیابی اقتصادی نیروگاه خورشیدی در ایران، *فصلنامه پژوهش‌های اقتصادی ایران*، سال هفتم، شماره ۲۴، صص ۱۷۱-۱۹۶.

سهیلی، کیومرث (۱۳۸۶) الگوی تقاضا و تحلیل دینامیک تقاضای انرژی در ایران، *فصلنامه پژوهش‌های اقتصادی*، سال هفتم، شماره دوم، صص ۶۷-۸۶.

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*، شماره ۱۵، صص ۳۵-۵۴.

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

عدلی، قهرمان (۱۳۸۸)، تخمین نرخ تنزیل اجتماعی برای ایران، *پژوهش‌های اقتصادی*، سال نهم، شماره سوم، صص ۱۳۵-۱۵۶.

لطفعلی پور، محمدرضا و ملیحه آشنا (۱۳۸۹) بررسی عوامل موثر بر انتشار دی‌اکسید کربن در اقتصاد ایران، فصلنامه مطالعات اقتصاد انرژی، سال هفتم، شماره ۲۴، 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، صص ۲۳۵-۲۶۵.  
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.sun.org.ir>

<http://www.bp.com>