



ارزیابی کمی امنیت انرژی ایران و تحلیل حساسیت نتایج به نحوه محاسبه

مرتضی جلالی¹، امیرمهدی حبیبی²، زهرا سادات عادل برخوردار^{3*}

1- دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی مکانیک و انرژی، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران

2- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی مکانیک و انرژی، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران

3- استادیار، دانشکده مهندسی مکانیک و انرژی، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران

* z_adel@sbu.ac.ir، تهران

چکیده

در این مطالعه ضمن ارائه تعریف بومی و بروزشده برای امنیت انرژی، با استفاده از 22 شاخص در 5 دسته کلی شامل تداوم عرضه پایدار، ایمنی و اطمینان عرضه، محدودیت های محیط زیستی و منابع طبیعی، محدودیت های اقتصادی و تاب آوری و محدودیت های سیاسی-امنیتی، شاخص کلی امنیت انرژی ایران در دوره 1384-1400 با استفاده از روش وزن دهی شانون-تاپسیس ارزیابی شده است. با توجه به نقش فناوری های تجدیدپذیر در توسعه پایدار، در این مطالعه تاثیر کمپایی مواد حیاتی خام مورد نیاز فناوری های تجدیدپذیر نیز بر امنیت انرژی دیده شده است. نتایج نشان می دهند دسته محدودیت های اقتصادی و امنیتی و محدودیت های زیست محیطی وضعیت نزولی شدیدتری را تجربه کرده اند. شاخص ترکیبی امنیت انرژی بطور متوسط روند نزولی را در طی دوره مذکور طی کرده است. بالاترین و پایین ترین شاخص امنیت انرژی در طی دوره مورد بررسی به ترتیب برای سال 1386 با شاخص 0.56 و سال 1397 با شاخص 0.38 ارزیابی شده است. از شاخص هرفیندال-هیرشمن به عنوان شاخص کمپایی مواد حیاتی خام مورد نیاز فناوری های تجدیدپذیر استفاده شده است. مقادیر محاسبه شده نشان دهنده تمرکز بالای تولید این مواد در تعداد محدودی از کشورهای خاص است که این موضوع امنیت انرژی کشور را کاهش می دهد. در این مقاله، تحلیل حساسیت شاخص امنیت انرژی نسبت به روش های نرمال سازی، تجمیع و دسته بندی شاخص ها انجام شده است تا علت اختلافات مشاهده شده در محاسبات امنیت انرژی در مطالعات مختلف بررسی شود. نتایج نشان می دهد که محاسبه امنیت انرژی به ویژه نسبت به روش نرمال سازی از حساسیت بالایی برخوردار است.

کلیدواژگان: امنیت انرژی، شاخص مرکب، آنتروپی، تاپسیس، مواد حیاتی خام

Quantitative assessment of Iran's energy security and sensitivity analysis of the results with respect to the computation method

Morteza Jalali¹, Amirmahdi Habibi², Zahra Sadat Adel Barkhorda^{3*}

1- PhD candidate, Faculty of Mechanical and Energy Engineering, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran

2- MSc student, Faculty of Mechanical and Energy Engineering, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran

3- Assistant Professor, Faculty of Mechanical and Energy Engineering, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran

* P.O.B. 167651719 Tehran, Iran, z_adel@sbu.ac.ir

Received: 11 April 2025 Accepted: 19 September 2025

Abstract

This study presents a localized and updated definition of energy security and evaluates Iran's overall energy security index during the period 2005 to 2021 using 22 indicators categorized into five main groups namely continuity of sustainable supply, safety and reliability of supply, environmental and natural resource constraints, economic constraints and resilience, and political security constraints. Considering the role of renewable energy technologies in sustainable development, this study evaluates the impact of critical raw minerals required for production of renewable energy technologies on energy security. The results indicate that the composite energy security index has followed a downward trend during the mentioned period. The highest and lowest energy security indices during the studied period were 0.56 in 2007 and 0.38 in 2018, respectively. The Herfindahl Hirschman Index is used to assess critical raw mineral scarcity for renewable technologies, revealing high production concentration in a few countries, which poses energy security challenges. This paper analyzes the sensitivity of the energy security index to normalization, aggregation, and classification methods to explain discrepancies in its calculation across studies. Results show high sensitivity to normalization methods.

Keywords: Energy Security, Composite Index, Entropy, TOPSIS, Critical Raw Materials

1- مقدمه

در اثر به وجود آمدن مسایل زیست محیطی و تغییر اقلیم در سالهای اخیر، گذار انرژی از سوخت های فسیلی به سمت انرژی تجدیدپذیر امری ضروری به جهت حفظ محدوده دمایی 1/5 درجه سانتیگراد در اثر توافق نشست کاپ¹ 28 خواهد بود. در مطالعاتی که در حوزه گذار انرژی برای کشورهای اروپایی صورت پذیرفته است؛ بر این امر صحنه گذاشته می شود که در صورت گذار انرژی، کشورهای مذکور شاهد کاهش ریسک امنیت انرژی خواهند بود. این مساله عمدتاً به دلیل پراکندگی بیشتر پتانسیل انرژی های تجدیدپذیر نسبت به منابع انرژی فسیلی است. از طرفی دیگر در صورت رخ دادن گذار انرژی مباحث مرتبط با تغییر اقلیم نیز پوشش داده می شود [1].

در حال حاضر فناوری های انرژی های تجدیدپذیر که در گذار انرژی مورد استفاده قرار می گیرند به مواد معدنی ای نیاز خواهند داشت که میزان این مواد در سطح جهان محدود می باشد و تامین آنها در آینده چالش برانگیز خواهد بود. در حال حاضر کمیابی مواد معدنی در حد پیش بینی های آتی مطرح است و هنوز اثر خود را بر قیمت فناوری ها نشان نداده است. لیکن افزایش قیمت های مواد معدنی مذکور در آینده محتمل است. از طرفی دیگر انحصار و کمیابی در دسترسی به برخی مواد معدنی نسبت به منابع سوخت های فسیلی بیشتر است بطوریکه کشوری نظیر کنگو 75٪ منابع کبالت را در اختیار دارد. کشورهای چین و آفریقای جنوبی نیز به ترتیب نزدیک به 62٪ منابع گرافیت و 76٪ منابع پلاتین را دارا می باشد [2].

حجم ذخایر برخی از مواد مورد نیاز فناوری های تجدیدپذیر نظیر مولیبدن، کروم و منگنز در ایران به ترتیب 0/28٪، 0/35٪ و 0/23٪ از کل ذخایر جهان بوده [3،4] و با رخ دادن گذار انرژی از سوخت های فسیلی به تجدیدپذیر، کمیابی این مواد بیش از پیش در ایران برجسته خواهد شد. این در حالی است که حجم ذخایر برخی دیگر از مواد شامل لیتیوم و کبالت در ایران نامشخص است. با رخ دادن گذار انرژی از سوخت های فسیلی به تجدیدپذیر، بیش از پیش مساله کمیابی مواد در ایران برجسته خواهد شد. پس موضوع کمیابی مواد در گذار انرژی اثرگذار خواهد بود که این امر خود بر امنیت انرژی نیز تاثیر می گذارد [5].

از طرف دیگر باید بررسی نمود که آیا گذار انرژی به سمت تجدیدپذیرها برای کشورهایی که همانند ایران تا کنون متکی بر سوخت های فسیلی بوده اند و زیرساخت های تجدیدپذیر در آنها در مقایسه با کشورهای پیشرو در این حوزه که واردکننده سوخت های فسیلی بوده اند ناچیز است؛ سبب افزایش امنیت انرژی خواهد شد یا خیر. گذار به سمت تجدیدپذیرها مخاطراتی نظیر کمبود دانش برای توسعه فناوری و کمبود منابع و همچنین ظرفیت فرآوری مواد معدنی برای ساخت تجهیزات ایجاد خواهد نمود. مسائل مذکور می توانند سبب کاهش امنیت انرژی گردد و می بایست مورد بررسی و مطالعه قرار گیرند تا با

سرمایه گذاری بر روی کاهش مخاطرات مذکور، توسعه انرژی های تجدیدپذیر سبب بهبود هرچه بیشتر امنیت انرژی کشور شود.

تعریف امنیت انرژی از حیث اینکه به طور مشخص چه می باشد و از چه اجزایی تشکیل شده است؛ مقدمه ای بر محاسبه کمی و ارائه راهکار در جهت بهبود آن است. این در حالی است که در ادبیات موضوع، تعریف یکسان و همه پذیر برای امنیت انرژی وجود ندارد [6].

بیلیکی [7] امنیت انرژی را عرضه قابل اطمینان و کافی انرژی در قیمت منطقی تعریف کرده اند. سوکول و براوون [8] در تعریف خود را به عرضه کافی انرژی و قیمت های مقرون به صرفه با در نظر گرفتن توسعه اجتماعی- فرهنگی و حفظ محیط زیست اشاره نموده اند. در این تعریف برخلاف تعریف قبل رد پای مسایل اجتماعی و زیست محیطی مرتبط با انرژی نیز دیده می شود. آژانس بین المللی انرژی² به مقدار کافی، مقرون به صرفه بودن و دسترسی قابل اطمینان به حامل های انرژی و خدمات آن، که شامل در دسترس بودن منبع، کاهش وابستگی به واردات انرژی، کاهش فشار به محیط زیست، رقابت پذیری در بازار و اتکا به منابع بومی سازگار با محیط زیست در هر اقلیم اشاره کرده است. بازبین و همکاران [9] در تعریف خود از حامل های انرژی و خدمات مربوط به آن در قیمت های منطقی و با ثبات به همراه یک مقدار موثر استفاده نموده اند. در ادامه این تعریف به عدم واردات انرژی و توجه به افزایش تقاضای آن در آینده به طوریکه در لحظه تامین شود اشاره شده است. در این تعریف به بحث مقرون به صرفه بودن حامل های انرژی³ و امنیت عرضه صحنه گذاشته شده است. موضوعات زیست محیطی در تعریف مذکور جایی ندارد اما بحث واردات که ذیل بخش در دسترس بودن انرژی است و سبب افزایش ریسک امنیت انرژی می گردد؛ بیان شده است. در گزارش مرکز تحقیقات انرژی آسیا و اقیانوسیه⁴ [10] امنیت انرژی به صورت توانایی یک اقتصاد برای تضمین تامین منابع انرژی به صورت پایدار و با سطح قیمتی ای که اثر مخربی بر اقتصاد نداشته باشد بیان شده است. در ادامه این تعریف چهار بخش توانایی⁵، دسترسی⁶، قابل قبول بودن⁷ و مقرون به صرفه بودن انرژی لحاظ شده است. منظور از توانایی، دارا بودن ذخایر فسیلی است که این امر در کشورهای صادرکننده انرژی مطرح می شود. کشورهای اروپایی که دارای ذخایر فسیلی نمی باشند حامل های انرژی را وارد نموده و بدین صورت دسترسی انرژی معنی پیدا می کند. دسترسی انرژی مرتبط با ژئوپلیتیک می باشد. از طرفی دیگر قابل قبول بودن انرژی به معنای رعایت مسایل زیست محیطی خواهد بود. در بخش اول این تعریف توجه بیشتری به مسایل اقتصادی انرژی صورت پذیرفته است، اما در بخش دوم اغلب حوزه های امنیت انرژی پوشش داده می شود [11]. آژونی و بریر [12] امنیت انرژی را به عنوان یک ویژگی ای که در آن یک سیستم در تمام ابعاد خود به طور بهینه و پایدار، و به دور از هرگونه تهدید، عمل می کند؛ تعریف نموده اند. با

5. Availability
6. Accessibility
7. Acceptability

1. COP-28
2. International Energy Agency
3. Affordability
4. Asia Pacific Energy Research Centre

این تعریف هر بعدی می‌تواند لحاظ شود و تمام ریسک‌ها قابل بررسی خواهند بود.

با در نظر گرفتن شرایط ایران و با بررسی تعاریف مطرح شده در سایر مطالعات، امنیت انرژی را می‌توان تداوم عرضه پایدار، ایمن و مطمئن انرژی با در نظر گرفتن محدودیت‌های فناوری، آب، محیط‌زیست، سیاسی-امنیتی و اقتصادی به نحوی که در برابر تغییرات و نوسانات درونی و یا بیرونی سیستم انرژی تاب‌آور باشد نامید. به بیانی دیگر امنیت انرژی در تلاش برای کاهش تهدیدات اقتصادی، ژئوپلیتیکی، فنی و زیست‌محیطی مرتبط با بازار انرژی و افزایش تاب‌آوری در مقابل این تهدیدات است.¹ عرضه پایدار به منزله توانایی سیستم عرضه در برابر تغییرات داخلی و خارجی می‌باشد. تاب‌آوری امکان تغییر از یک انرژی خاص به انرژی دیگر و انعطاف بیشتر در این زمینه را فراهم خواهد نمود. در عرضه پایدار مباحثی نظیر دسترسی برابر آحاد جامعه و نبود فقر انرژی مطرح می‌گردد. منظور از دسترسی برابر، دسترسی به حامل‌های انرژی نبوده، بلکه دسترسی به خدمات انرژی مطرح است. تغییر اقلیم می‌تواند باعث آسیب به بخش کشاورزی [14]، افزایش میانگین دمای کره زمین [15] و آسیب به سیستم‌های انرژی [16] گردد. از طرف دیگر محتمل است در آینده‌ای نه چندان دور انتشار کربن و گازهای گلخانه‌ای سبب جریمه و تحریم کشور از سوی کنوانسیون‌های بین‌المللی شود [17]. از این رو در تعریف امنیت انرژی مطالعه حاضر، بدان اشاره شده است.

در پژوهش‌های خارجی، امنیت انرژی ایران به صورت کمی ارزیابی نشده است. در مطالعات داخلی نیز ارزیابی کمی امنیت انرژی به صورت محدود صورت گرفته است. در تمامی پژوهش‌های داخلی و خارجی، ارزیابی کمی امنیت انرژی با توجه به مسائل زیست‌محیطی و مواد مورد نیاز فناوری‌های تجدیدپذیر صورت نگرفته است. یکی از نوآوری‌های مطالعه حاضر در نظر گرفتن امنیت عرضه مواد، انتشار گازهای گلخانه‌ای و آلاینده‌ها در قالب شاخص‌های جداگانه بوده است. با توجه به منابع فسیلی ایران، تعدادی شاخص جدید نیز که پوشش‌دهنده این مساله می‌باشند نیز ایجاد شده است. از طرفی دیگر در مطالعه حاضر از روش وزن‌دهی ترکیبی شانون-آنتروپی استفاده شده است؛ در حالیکه اکثر مطالعات پیشین از روش وزن‌دهی یکسان به هر شاخص بهره برده‌اند.

فصل‌بندی مطالعه حاضر به شرح زیر است. در بخش پیشینه پژوهش، مروری بر مطالعات جهانی انجام شده بر روی امنیت انرژی ارائه می‌شود. بخش 3 به معرفی و نحوه محاسبه شاخص‌ها و بخش 4 به محاسبه آنها می‌پردازد. بخش 5 نتایج بدست‌آمده برای امنیت انرژی را با توجه به شاخص‌ها و روش محاسبه بیان شده در بخش‌های پیشین ارائه و تحلیل می‌کند. در بخش 5، تحلیل حساسیت بر روی نحوه محاسبه شاخص امنیت انرژی ارائه می‌شود. فصل آخر به جمع‌بندی موارد گفته شده در مطالعه حاضر اختصاص دارد.

2- پیشینه پژوهش

امنیت انرژی را می‌توان به دو صورت کیفی و کمی تحلیل نمود. محاسبه کمی امنیت انرژی در وهله اول نیازمند تعریف شاخص‌ها و سپس محاسبه امنیت انرژی به وسیله شاخص‌ها است. معمولاً شاخص‌هایی که در مطالعات بررسی، ایجاد و یا از آنان استفاده می‌گردد به دو دسته ساده و ترکیبی (یا تجمعی) تقسیم می‌شوند.

کرویت و همکاران [18] ابتدا با توجه به چهار مفهوم به صرفه‌بودن، دسترسی، مقبولیت اجتماعی-زیست محیطی و در دسترس بودن، امنیت انرژی را به عنوان چهار ناحیه تعریف و در هر ناحیه شاخص‌های امنیت انرژی را از حیث ساده یا ترکیبی بودن دسته‌بندی نموده‌اند. شاخص‌های ساده در این مطالعه عبارتند از: تخمین منابع فسیلی، نسبت ذخیره به تولید نفت، تنوع سوخت، وابستگی به واردات، ثبات سیاسی، قیمت انرژی، سهم سوخت‌های پاک در کل سبد انرژی و نقدینگی بازار.

آنگ و همکاران [19] در سال 2014 به بررسی و دسته‌بندی 104 مطالعه صورت گرفته در حوزه امنیت انرژی در بازه زمانی سال 2000 الی 2014 پرداخته‌اند. در این مطالعه مشخص شده است که از 104 مطالعه مذکور، در کدام مطالعات شاخص‌های دسترسی بودن، زیرساخت، قیمت، تأثیرات اجتماعی، حاکمیت و بازدهی انرژی مورد استفاده قرار گرفته است.

رادونویک و همکاران [20] برای 28 کشور اروپایی از سال 1990 الی 2012 امنیت انرژی را با استفاده از روش وزن‌دهی یکسان بر اساس ترکیب شش شاخص شدت انرژی، مصرف انرژی نهایی، وابستگی به واردات انرژی، سرانه تولید ناخالص داخلی، شدت کربن و سهم انرژی‌های تجدیدپذیر و هسته‌ای در سبد انرژی محاسبه کرده‌اند و میزان وزن اختصاص داده شده به هر شاخص بر اساس نظر کارشناسان بوده است. نتایج مطالعه [20] نشان می‌دهد در دوره 1990-2012 کشورهای هلند، اسلونی و اسپانیا بیشترین بیشترین بهبود در شاخص امنیت انرژی را تجربه نموده‌اند.

اسماعیلی و همکاران [21] یک چارچوب کلی برای محاسبه امنیت انرژی در نظر گرفته‌اند که شامل انتخاب شاخص‌ها، جمع‌آوری داده برای هر شاخص، نرمال‌سازی، وزن‌دهی به روش آنتروپی، تجمیع و در نهایت محاسبه امنیت انرژی است. در این مطالعه شاخص‌های ساده امنیت انرژی نظیر سرانه تولید ناخالص داخلی، میزان انتشار کربن دی اکسید، شدت کربن و سهم سوخت‌های فسیلی در سبد عرضه انرژی مجدداً باز تعریف شده است و امنیت انرژی ایران بر اساس همین چارچوب از سال 2012 الی 2021 تعیین شده است. نتایج پژوهش مذکور نشان می‌دهد امنیت انرژی ایران از 0/38 در سال 2012 به 0/61 در سال 2021 خواهد رسید.

سووکول و براون [22] امنیت انرژی را برای 18 کشور شامل آمریکا، اتحادیه اروپا، استرالیا، نیوزلند، چین، هند، ژاپن، کره جنوبی و 10 کشور آسیای جنوبی از سال 1990 الی 2010 را ارزیابی کرده‌اند. در این مطالعه با توجه به پنج بعد شامل در دسترس بودن، مقرون به صرفه بودن، توسعه تکنولوژی، پایداری و مقررات از شاخص‌ها جهت محاسبه امنیت انرژی استفاده شده است. در مطالعه مذکور از روش وزن‌دهی یکسان به شاخص‌ها برای محاسبه امنیت انرژی استفاده شده و نتایج نشان می‌دهد در طی دوره بررسی شده، ژاپن و میانمار به ترتیب بیشترین و کمترین شاخص امنیت انرژی را دارا بوده‌اند. سووکول [23] در سال 2012 در مطالعه‌ای که از نتایج مطالعه [20] استفاده نموده و از 20 کشوری که در مطالعه پیشین بر روی آنها کار کرده بوده‌است، کشور مالزی و مانپار را انتخاب و در این مطالعه به طور اختصاصی بر روی آنها کار کرده است. همانند مطالعه پیشین خود مجدداً از همان شاخص‌ها و روش محاسبه امنیت انرژی استفاده نموده است. سووکول و همکاران [8] در سال 2010 با تعریف شاخص‌های امنیت انرژی شامل در دسترس بودن،

1. کاهش تهدیدات اقتصادی و ژئوپلیتیکی از مطالعه [13] گرفته شده است.

فناوری‌های تجدیدپذیر که در گذار انرژی مورد استفاده قرار می‌گیرند به موادی نیاز خواهند داشت که میزان ذخایرشان در سطح جهان محدود بوده و دارای ریسک عرضه در آینده خواهند بود [27]. در مطالعات به اینگونه مواد، مواد حیاتی خام⁴ [28] یا مواد استراتژیک [29] اطلاق می‌شود. آژانس بین‌المللی انرژی [2] به بررسی میزان مواد مورد نیاز فناوری‌های تجدیدپذیر پرداخته و سهم مواد حیاتی در فناوری‌های تجدیدپذیر در قیاس با فناوری‌های فسیلی را بیان کرده‌است. به عنوان مثال برای استحصال 1 مگاوات توان از یک توربین باد فراساحلی به حدود 8000 کیلوگرم مس، 2500 کیلوگرم روی، 400 کیلوگرم منگنز و 100 کیلوگرم نیکل نیاز است؛ در حالیکه برای استحصال 1 مگاوات توان از یک نیروگاه گاز، تنها به 900 کیلوگرم مس و 20 کیلوگرم از سایر مواد نیاز است. همچنین در گزارش مذکور با فرض ثابت بودن میزان مواد بکاررفته در فناوری‌های تجدیدپذیر، میزان افزایش تقاضا در سال 2040 به نسبت به 2020 برای لیتیوم، گرافیت، کبالت و نیکل بر اساس سناریو توسعه پایدار محاسبه شده‌است؛ به نحویکه تقاضا برای مواد مذکور به ترتیب 42 برابر، 25 برابر، 21 برابر و 19 برابر می‌شود. در مطالعه مذکور میزان منابع موجود برای مواد مس، کبالت و لیتیوم کمتر از میزان تقاضا در سال 2040 برآورد شده‌است.

براساس داده‌های آژانس انرژی جهانی در سال 2022، 80٪ از برق تولیدی کشور با گاز طبیعی و 13٪ دیگر با فرآورده‌های نفتی تولید شده است. همچنین سهم نیروگاه‌های برق آبی و هسته‌ای در تولید برق به ترتیب حدود 3٪ و 2٪ بوده‌است. سهم انرژی‌های بادی و خورشیدی کمتر از 1٪ گزارش شده‌است. این در حالی است که سهم نفت و گاز در کل عرضه اولیه انرژی حدود 99٪ می‌باشد. انتشار کربن دی اکسید نیز 696 میلیون تن می‌باشد که نسبت به سال 2000، 123٪ افزایش یافته‌است. شدت انرژی نیز نسبت به سال 2000، افزایشی 26 درصدی را تجربه کرده‌است.

باتوجه به شاخص‌های امنیت انرژی بررسی شده در مطالعات پیشین و شرایط کشور ایران، تعدادی از شاخص‌های مطرح شده بررسی و انتخاب شده‌اند. اهمیت انتخاب شاخص‌های امنیت انرژی زمانی برجسته می‌گردد که چندین شاخص در تعارض با یکدیگر بوده و سیاست‌گذار براساس محدودیت سیستم‌های انرژی، برخی اصلاحات را بر شاخص‌ها اعمال نماید [30]. در مطالعه حاضر از شاخص تنوع سوخت نیروگاه‌های برق [13، 23]، تنوع سبد عرضه انرژی [8، 13، 17، 23]، معادل هزینه واردات انرژی [8، 13، 17، 23]، شدت انرژی [8، 13، 17، 23]، بازده سیستم انرژی [17، 23]، سهم استفاده از سوخت‌های سنتی [20]، سرانه تولید ناخالص داخلی⁵ [18، 19، 24]، سرانه هزینه فرصت انرژی [20-22]، سرانه مصرف انرژی [8، 21] ثبات قیمت [31]، انتشار گازهای گلخانه‌ای و آلاینده [20-26]، کمبود حاشیه ذخیره برنامه‌ریزی برق⁶ [32]، سهم هزینه انرژی در سبد خانوار شهری [21]، شرایط تجاری⁷ [33، 34] نسبت نفت به طلا⁸ [35] و نسبت ذخیره به تولید نفت و گاز [19] استفاده شده است.

علاوه بر موارد ذکر شده، در این مطالعه شاخص مواد مورد نیاز فناوری‌های تجدیدپذیر، سهم فروش نفت در بودجه دولت، سهم درآمد حاصل از صادرات

به‌صرفه‌بودن، بازدهی و محیط‌زیست، امنیت انرژی را برای 22 کشور عضو سازمان همکاری توسعه و اقتصادی از سال 1970 الی 2007 با روش نمره استاندارد تحلیل نموده‌اند. در این مطالعه از 10 شاخص ساده نظیر وابستگی به واردات نفت، وابستگی به واردات گاز، وابستگی حمل و نقل به سوخت‌های فسیلی، قیمت برق، گازوئیل و بنزین، شدت انرژی، سرانه مصرف برق، شدت انرژی حمل و نقل انتشار کربن دی‌اکسید و سولفور دی‌اکسید استفاده شده‌است. نتایج نشان می‌دهد شاخص امنیت انرژی کشورهای نروژ، دانمارک و نیوزلند تقریباً ثابت بوده‌است. از طرف دیگر بیشترین بهبود شاخص امنیت انرژی در کشورهای انگلیس، بلژیک و ژاپن رخ داده‌است.

ژانگ و همکاران [24] در سال 2017 امنیت انرژی 30 استان کشور چین را در سال 2013 بررسی نموده‌اند. در این بررسی از 20 شاخص ساده استفاده شده است که عیناً در مطالعات پیشین سووکول وجود داشته‌است. بعد از تعریف شاخص‌ها و جمع‌آوری اطلاعات، برای نرمال‌سازی از روش کمینه- بیشینه¹ و برای وزن‌دهی از روش فرآیند تحلیل سلسله مراتبی فازی² استفاده شده است. نتایج نشان داده تنوع‌بخشی به سبد عرضه سوخت، کاهش انتشار کربن دی اکسید، افزایش بازده سیستم عرضه انرژی و سرمایه‌گذاری در زیرساخت‌های فناوری تجدیدپذیر باعث ارتقا امنیت انرژی می‌گردد.

همان‌طور که پیش‌تر ذکر گردید؛ در تعدادی دیگر از مطالعات از تجمیع چندین شاخص ساده در کنار همدیگر استفاده شده و یک شاخص ترکیبی (یا تجمعی) ایجاد شده است. به بیان دیگر هر شاخص ترکیبی خود از چند شاخص ساده تشکیل شده است. در بخش دیگر مقاله کروت و همکاران [18]، شاخص‌های ترکیبی آسیب‌پذیری نفتی، ترکیبی بر مبنای شانون (جانسن) و تمایل به پرداخت³ بررسی شده است.

انستیتو قرن بیست و یک [25] در سال 2018 یک شاخص ترکیبی امنیت انرژی ایجاد نموده است که این شاخص خود از 8 دسته کلی شامل وضعیت بین‌المللی سوخت، واردات سوخت، هزینه‌های انرژی، نوسانات قیمت نفت، شدت مصرف، بخش برق، حمل و نقل و محیط‌زیست تشکیل شده‌است. هر دسته خود از تعدادی شاخص تشکیل می‌شود؛ به‌نحویکه دسته وضعیت بین‌المللی سوخت شامل شاخص‌های امنیت جهانی ذخایر نفت خام، امنیت جهانی تولید نفت خام، امنیت جهانی ذخایر گاز طبیعی، امنیت جهانی تولید گاز طبیعی، امنیت جهانی ذخایر زغال‌سنگ و امنیت جهانی تولید زغال‌سنگ می‌باشد. برای محاسبه امنیت انرژی نیز به هر شاخص بر اساس نظر کارشناسان وزنی داده شده‌است. بر این اساس ایالات متحده و اوکراین به ترتیب بهترین و بدترین وضعیت امنیت انرژی در سال 2018 را داشته‌اند. شایان ذکر است شاخص امنیت انرژی کشور ایران در مطالعه مذکور بررسی نشده است.

آژانس بین‌المللی انرژی‌های تجدیدپذیر [26] در سال 2023 گزارشی در خصوص گذار انرژی منتشر کرده‌است. در این گزارش بر این امر صحنه گذاشته می‌شود که در صورت گذار انرژی، ریسک امنیت انرژی به‌واسطه وجود پتانسیل بادی و خورشیدی کاهش پیدا خواهد کرد؛ زیرا برخلاف منابع انرژی فسیلی، در نقاط محدود جهان متمرکز نشده‌اند. در این گزارش طیف گسترده‌ای از اقدامات مورد نیاز برای دستیابی به گذار انرژی ذکر شده‌است.

5. Gross Domestic Product (GDP) Per Capita
6. Lack of planning reserve margin (PRM)
7. Terms of trade (TOT)
8. Oil/Gold

1. min-max
2. Fuzzy Analytic Hierarchy Process
3. Willingness to pay
4. Critical raw material

در سمت تقاضا آن سبب کاهش مصرف انرژی و افزایش امنیت انرژی می‌گردد [37].

جدول 1 شاخص‌های استفاده شده در این مطالعه

دسته‌بندی	نام شاخص	نحوه محاسبه
	سهم واردات از سبد انرژی	سهم واردات از کل سبد انرژی
	نسبت ذخیره به تولید	نسبت ذخیره به تولید نفت و گاز
	سرنانه مصرف نهایی انرژی	کل مصرف نهایی انرژی جمعیت
تداوم عرضه	هزینه واردات انرژی	سهم واردات انرژی از عرضه اولیه انرژی
پایدار	بازده سیستم انرژی	کل مصرف نهایی انرژی تولید ناخالص داخلی
	شدت انرژی	کل مصرف نهایی انرژی تولید ناخالص داخلی
	کمبود ضریب ذخیره تولید برق	فاصله ذخیره تولید تا درصد مطلوب 26٪ جهت اطمینان از تداوم عرضه [32]
	تنوع سبد عرضه	رابطه (1)
ایمنی و اطمینان عرضه	تنوع سوخت نیروگاه‌ها	رابطه (1)
	سهم سوخت‌های سنتی	درصد استفاده از هیزم
	امنیت تامین مواد معدنی انرژی‌های تجدیدپذیر	شاخص هرفیندال-هیرشمن ¹
محیط‌زیست و منابع طبیعی	معادل انتشار گازهای گلخانه‌ای و آلاینده	جمع کل انتشار بر اساس آمارهای گذشته تعیین می‌شود. (میلیون تن معادل دی اکسید کربن)
	نسبت نفت به طلا	نسبت قیمت طلا به نفت
	شرایط تجاری	$100 \times \frac{(\text{شاخص قیمت صادرات})}{(\text{شاخص قیمت واردات})}$
اقتصادی و تاب‌آوری	شاخص ثبات قیمتی	درصد تغییرات قیمت در هر 5 سال
	سهم هزینه انرژی در سبد خانوار شهری	هزینه انرژی خانوار کل هزینه خانوار
	سرنانه تولید ناخالص داخلی	تولید ناخالص داخلی جمعیت
	نسبت سرمایه‌گذاری انرژی	سهمی از سرمایه کل در زیرساخت‌های انرژی

انرژی نسبت به کل درآمد ارزی و میزان سرمایه‌گذاری در بخش انرژی نیز مورد بررسی و استفاده قرار گرفته و برای آنان شاخص‌هایی ایجاد شده‌است. صادرات انرژی ایران برخلاف کشورهای اروپایی، بر بودجه دولت و درآمد ارزی اثر قابل‌توجه خواهد داشت. لذا یکی از نوآوری‌های مطالعه حاضر، در نظر گرفتن محدودیت منابع مواد حیاتی خام ایران بر شاخص امنیت انرژی بوده است. در بخش سوم این مطالعه، نحوه دسته‌بندی و محاسبه شاخص‌ها بیان شده‌است.

3- روش‌شناسی

ارزیابی کمی امنیت انرژی مستلزم استفاده از شاخص‌های کمی می‌باشد. ایجاد یک شاخص باید شرایطی را داشته باشد. این شرایط عبارتند از: مشخص بودن موضوعی که قرار است توسط شاخص محاسبه شود؛ استفاده از شاخص با توجه به مرز سیستم، مشخص بودن معیار سنجش شاخص و سازگار بودن با تعریف امنیت انرژی اولیه [36]. در این مطالعه شاخص‌های مورد استفاده در 5 دسته کلی شامل تداوم عرضه پایدار، ایمنی و اطمینان عرضه، محدودیت‌های محیط‌زیستی و منابع طبیعی، محدودیت‌های اقتصادی و تاب‌آوری و محدودیت‌های سیاسی امنیتی همانند جدول 1 دسته‌بندی شده‌اند. در این مطالعه در دسته تداوم عرضه پایدار، سهم واردات از سبد انرژی، نسبت ذخیره به تولید، سرنانه مصرف نهایی انرژی، معادل هزینه واردات انرژی، بازده سیستم انرژی، شاخص‌های شدت انرژی و کمبود حاشیه ذخیره برنامه‌ریزی برق عنوان شده است.

وقتی سهم واردات انرژی در سبد عرضه قابل توجه باشد؛ ریسک وابستگی به واردات زیاد شده و امنیت انرژی به مخاطره می‌افتد. پژوهش [18] از این شاخص استفاده نموده است. شاخص نسبت ذخیره به تولید یکی از شاخص‌های کلیدی در ارزیابی امنیت انرژی بوده و در مطالعه [19] عنوان شده‌است. این شاخص نشان می‌دهد که با نرخ تولید فعلی یک منبع انرژی (مانند نفت، گاز یا زغال‌سنگ)، ذخایر شناخته‌شده آن برای چه مدت زمانی قابل برداشت خواهد بود. با توجه به ذخایر عظیم نفت و گاز ایران و اتکا به تولید نفت و گاز، این شاخص ابزاری است تا طول عمر آماری مخازن را ارزیابی کنند. شاخص سرنانه مصرف نهایی [21، 8] انرژی نشان‌دهنده میزان مصرف انرژی از دیدگاه امنیت انرژی است؛ بطوریکه بیانگر میزان وابستگی هر فرد به منابع انرژی برای تأمین نیازهای اساسی می‌باشد. مقدار بالای این شاخص می‌تواند نشان‌دهنده ناکارآمدی در بهره‌وری انرژی باشد که در شرایط بحران یا محدودیت عرضه، امنیت انرژی را تهدید می‌کند. کم بودن مقدار شاخص مذکور نشان‌دهنده کمبود دسترسی به انرژی نیز می‌باشد که مربوط به ایران با توجه به بالاتر بودن سطح دسترسی به انرژی‌های مدرن نسبت به مقیاس جهانی نمی‌شود. شاخص معادل هزینه واردات انرژی در پژوهش‌های [8، 13، 17، 23] استفاده شده و بیانگر میزان هزینه‌ای است که کشور برای تأمین انرژی از منابع خارجی می‌پردازد. از دیدگاه امنیت انرژی، افزایش این شاخص نشان‌دهنده وابستگی بالاتر به واردات و در نتیجه، افزایش ریسک‌های اقتصادی و ژئوپلیتیکی مرتبط با عرضه انرژی است. در مقابل، کاهش این شاخص می‌تواند به معنای توسعه منابع داخلی، بهبود بهره‌وری انرژی یا تنوع‌بخشی به سبد انرژی باشد که به تقویت امنیت انرژی کمک می‌کند. بازدهی بالا چه در سمت عرضه انرژی و چه

1. Herfindahl-Hirschman index

شده است. هر چه پراکندگی عرضه بین‌المللی برای یک ماده معدنی خاص کمتر باشد شاخص امنیت تامین مواد معدنی بیشتر دچار مشکل می‌گردد. از طرفی دیگر وابستگی به واردات مواد معدنی مورد نیاز در فناوری‌های تجدیدپذیر، امنیت تامین مواد را کاهش می‌دهد. لازم به ذکر است مواد معدنی مورد مطالعه در این پژوهش در منابع وزارت صنعت و معدن سال 1402، آمار تولید صنعتی یافت نشد [40]. برای ارزیابی انحصار تولید منابع معدنی از شاخص هرفیندل-هرشمن که یکی از شاخص‌های اندازه‌گیری تمرکز یا تنوع در یک بازار جهانیست با رابطه زیر استفاده شده است. در رابطه (2) S_i نشان‌دهنده سهم بازار کشور i در کشور است.

$$HHI = \sum_i (S_i)^2 \quad (2)$$

عناصر مورد بررسی شامل لیتیوم، نیکل، کبالت، عناصر خاکی کمیاب¹، سیلیکون، تلوریم، ایندیم و گالیوم هستند. این عناصر با استفاده از شاخص تمرکز هرفیندل-هرشمن تحلیل و محاسبه شده‌اند. این شاخص نشان می‌دهد که آیا تولید یک ماده معدنی خاص و الزامی برای تجهیزات انرژی‌های تجدیدپذیر در دست تعداد کمی از تولیدکنندگان یا کشورها متمرکز است؛ یا اینکه منابع تامین آن متنوع و پراکنده هستند. این امر می‌تواند در تحلیل ریسک‌های زنجیره تامین و امنیت دسترسی به این مواد معدنی حائز اهمیت باشد. هدف از این محاسبات، ارزیابی میزان تمرکز منابع و توزیع آن‌ها در صنایع مختلف است تا به درکی بهتر از سطح رقابت‌پذیری و وابستگی به این عناصر دست یافته شود.

در دسته محدودیت‌های محیط‌زیستی و منابع طبیعی، شاخص انتشار گازهای گلخانه‌ای و آلاینده‌ها بررسی شده است. در پژوهش‌های [20-22، 26] این شاخص مورد استفاده قرار گرفته است. بررسی پایدار امنیت انرژی مستلزم در نظر گرفتن محیط‌زیست است. انتشار کربن و گازهای گلخانه‌ای مربوط به بخش تغییرات اقلیم می‌باشد. همانطور که در بخش تعریف امنیت انرژی ذکر گردید؛ تغییر اقلیم بر تقاضا، تولید و مقبولیت اجتماعی انرژی اثرگذار می‌باشد. همچنین به جهت احتمال شکل‌گیری ابعاد سیاسی و مالیات‌های بین‌المللی برای انتشار گازهای آلاینده، این بخش در نظر گرفته شده است.

در دسته محدودیت‌های اقتصادی و تاب‌آوری، شاخص‌های نسبت قیمت طلا به نفت [35]، شرایط تجارت یا مبادله [33، 34]، شاخص ثبات قیمتی [31]، سهم هزینه انرژی در سبد خانوار شهری [21]، سرانه تولید ناخالص داخلی [18، 19، 24] نسبت سرمایه‌گذاری در زیر ساخت‌های انرژی و هزینه فرصت انرژی [20-22] بررسی شده است.

شاخص نسبت قیمت طلا به نفت، به عنوان یک شاخص هشداردهنده در امنیت انرژی کشورهای صادرکننده نفت مطرح است. افزایش این نسبت، معمولاً نشان‌دهنده کاهش قیمت نفت یا افزایش تقاضا برای دارایی‌های امن مانند طلاست؛ که به تبع آن، درآمد ملی از صادرات نفت کاهش و ریسک‌های اقتصادی افزایش می‌یابد. این شاخص به دولت‌ها کمک می‌کند تا سیاست‌های تنوع‌بخشی در سبد انرژی و مدیریت ریسک را تقویت کنند تا از نوسانات بازار جلوگیری و امنیت انرژی حفظ شود [35].

هزینه فرصت انرژی (میلیون دلار)	یارانه اعطایی دولت در قیاس با صادرات انرژی
سهم صادرات انرژی از درآمد ارزی	سهم ارز حاصله از صادرات انرژی بر کل درآمدهای ارزی را می‌سنجد.
سیاسی امنیتی	سهم نفت در بودجه دولت
	کل نفت فروخته کل بودجه دولت

در کنار بازدهی، شاخص شدت انرژی به نسبت کل مصرف انرژی به تولید ناخالص داخلی در یک کشور اشاره دارد. شاخص شدت انرژی در مطالعات [8، 13، 17، 23] استفاده شده و نشان‌دهنده این است که چه مقدار انرژی برای تولید یک واحد از تولید ناخالص داخلی مصرف می‌شود. آخرین شاخص در این دسته، حاشیه ذخیره برنامه‌ریزی برق [32] عنوان شده است. این شاخص در جهت اطمینان از تداوم عرضه پایدار برق ایجاد شده و هرچه مقدار این شاخص از 26٪ کمتر باشد؛ ریسک عرضه برق بیشتر شده و امنیت انرژی خدشه‌دار خواهد شد [38].

در دسته ایمنی و اطمینان عرضه، شاخص تنوع سبد عرضه، شاخص تنوع سبد سوخت نیروگاه‌ها [13، 23]، شاخص سهم استفاده از سوخت‌های سنتی [20]، شاخص امنیت تامین مواد معدنی انرژی‌های تجدیدپذیر بررسی شده‌است. شاخص تنوع سبد عرضه انرژی یکی از معیارهای کلیدی در ارزیابی امنیت انرژی است که نشان‌دهنده میزان وابستگی یک کشور به منابع مختلف انرژی می‌باشد. این شاخص با در نظر گرفتن سهم هر منبع انرژی در سبد عرضه محاسبه می‌شود [18].

مقدار بالای این شاخص نشان‌دهنده توزیع متوازن انرژی از منابع مختلف است که وابستگی به یک منبع خاص را کاهش داده و ریسک‌های ناشی از نوسانات قیمت، تحریم یا اختلال در عرضه را کم می‌کند. در مقابل، مقدار پایین آن نشان‌دهنده اتکا به یک یا چند منبع محدود است که امنیت انرژی را در برابر شوک‌های خارجی تهدید می‌کند. تنوع سبد عرضه با استفاده از رابطه شانون همانند رابطه (1) محاسبه می‌شود. در این معادله p_i سهم حامل i در کل سبد عرضه می‌باشد.

$$Shannon\ index = - \sum_i p_i \ln p_i \quad (1)$$

شاخص تنوع سبد سوخت نیروگاه‌ها نشان‌دهنده ترکیب سوخت‌های مورد استفاده در نیروگاه‌ها است. افزایش این شاخص به کاهش وابستگی به یک نوع سوخت و افزایش انعطاف‌پذیری در مواجهه با نوسانات بازار کمک می‌کند. این شاخص نیز از رابطه شانون همانند رابطه (1) می‌گردد.

فقر انرژی با عدم دسترسی به شبکه‌های سراسری انرژی نیز معنا می‌شود. بر همین اساس سهمی از مردم که از سوخت‌های سنتی نظیر هیزم، فضولات دامی و غیره استفاده می‌کنند با شاخص سهم استفاده از سوخت‌های سنتی بیان شده است. هر چه این میزان بیشتر گردد، بر فقر انرژی افزوده و باعث کمتر شدن امنیت انرژی می‌شود [39].

در دسته امنیت زنجیره تامین تکنولوژی، ریسک تامین مواد معدنی حیاتی برای انرژی‌های خورشیدی و بادی (پنل خورشیدی و توربین بادی) بکارگرفته

سهم نفت در بودجه دولت نیز برای کشوری مانند ایران با توجه به صادرات نفت، بسیار با اهمیت می‌باشد. هر چه سهم نفت در بودجه دولت بیشتر باشد؛ اتکالی کشور به صادرات نفت بیشتر بوده و در این حیطه آسیب‌پذیر می‌باشد. بودجه‌ای که دچار وابستگی بالا به فروش نفت باشد؛ در صورت عدم فروش نفت دچار کسری شدید خواهد شد.

4- داده‌ها و محاسبه شاخص‌ها

برای هر شاخص ذکر شده در بخش قبل، داده‌های مورد نیاز از منابع معتبر برای سال‌های 1384 الی 1400 جمع‌آوری شده و این داده‌های خام جهت تولید شاخص‌ها مورد استفاده قرار گرفته‌اند. اطلاعات و داده‌های مرتبط با انرژی این پژوهش از ترازنامه انرژی وزارت نیرو (ترازنامه انرژی، دفتر برنامه‌ریزی و اقتصاد کلان برق و نیرو)، ترازنامه هیدروکربنی (معاونت برنامه‌ریزی وزارت نفت، موسسه مطالعات بین‌المللی انرژی)، بانک مرکزی (بانک اطلاعات سری‌های زمانی اقتصادی بانک مرکزی)، مرکز آمار و سایر منابع داخلی و خارجی معتبر حوزه انرژی اخذ شده است. در برخی موارد مانند داده‌های صادرات و تولید نفت که بعد از سال 1397 بعلت محرمانه‌بودن منتشر نمی‌شوند، از داده‌های ترازنامه سازمان کشورهای صادرکننده نفت³ (بولتن سالیانه اوپک) [44] استفاده شده است.

بعد از محاسبه شاخص‌ها به‌منظور محاسبه شاخص ترکیبی امنیت انرژی، ابتدا داده‌های خام مرتبط با مؤلفه‌های منتخب جمع‌آوری گردید. در مرحله بعد، جهت حذف اثر تفاوت مقیاس‌ها و واحدهای اندازه‌گیری میان شاخص‌ها، داده‌ها با استفاده از روش نرمال‌سازی بیشینه-کمینه به بازه استاندارد (0,1) تبدیل شدند. این روش یکی از تکنیک‌های رایج در پردازش داده‌ها بوده و با هدف تسهیل مقایسه بین متغیرها، و جلوگیری از سلطه شاخص‌های با مقادیر عددی بزرگ‌تر و به‌طور کلی، نرمال‌سازی داده‌ها برای تجزیه و تحلیل دقیق‌تر و عادلانه‌تر صورت می‌پذیرد [45].

پس از نرمال‌سازی، به‌منظور وزن‌دهی به شاخص‌ها، از روش آنتروپی شانون استفاده شد. این روش به‌عنوان یکی از رویکردهای تعیین وزن، با سنجش میزان پراکندگی اطلاعات هر شاخص، نقش هر متغیر را بدون دخالت قضاوت ذهنی مشخص می‌سازد. روش آنتروپی شانون یکی از تکنیک‌های مبتنی بر داده برای تعیین وزن شاخص‌ها در مدل‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره است. این روش که برگرفته از نظریه اطلاعات شانون می‌باشد [46] بر این اصل استوار است که هرچه پراکندگی یا تنوع داده‌های مربوط به یک شاخص بیشتر باشد، آن شاخص حاوی اطلاعات بیشتری است و بنابراین باید وزن بالاتری داشته باشد.

در مرحله نهایی، شاخص‌های نرمال و وزن‌دهی شده با استفاده از روش تصمیم‌گیری چندمعیاره‌ای تاپسیس³ جمع‌شدند. روش تاپسیس براساس مفهوم نزدیکی به راه‌حل ایده‌آل، گزینه‌ها (در اینجا سال‌های مورد بررسی) را نسبت به دو مرجع ایده‌آل مثبت و منفی رتبه‌بندی می‌کند. گام‌های اصلی در پیاده‌سازی این روش شامل تشکیل ماتریس تصمیم نرمال‌شده، اعمال اوزان، تعیین راه‌حل‌های ایده‌آل مثبت و منفی، محاسبه فاصله اقلیدسی از این نقاط، و در نهایت محاسبه شاخص نزدیکی نسبی برای رتبه‌بندی گزینه‌ها می‌باشد.

شرایط تجارت یا مبادله معیاری در اقتصاد است که سطح نسبی قیمت کالاهای صادراتی یک کشور را نسبت به کالاهای وارداتی آن ارزیابی می‌کند. این شاخص نشان می‌دهد که یک کشور به‌ازای هر واحد کالاهای صادراتی خود، چه تعداد کالاهای وارداتی می‌تواند دریافت کند و به‌عنوان یک شاخص مهم از سلامت اقتصادی و پویایی تجارت کشور محسوب می‌شود. این شاخص به ویژه برای کشورهای صادرکننده کالا¹ نشان‌دهنده توسعه زنجیره و یا عدم توسعه زنجیره پایین دست محصول خام می‌باشد [33,34].

شاخص دیگر در این بخش، ثبات قیمت حامل‌های انرژی است. عدم کاهش قیمت حقیقی حامل‌های انرژی یکی از شاخص‌های کلیدی در جذب سرمایه‌گذار است. نکته مهم در خصوص قیمت حامل‌های انرژی این است که مقدار بهینه قیمت که امنیت انرژی را بیشینه نماید مشخص نیست و دیدگاه‌های موجود در این زمینه بسیار متضاد می‌باشد. چستر [41] و نویل [42] از بازار آزاد دفاع کرده و اذعان می‌دارند قیمت حامل‌ها باید جهانی باشد. ابهامی که مطرح است اینست که اگر قیمت حامل‌ها جهانی گردند؛ آیا الزاماً امنیت انرژی بالا خواهد رفت، آیا دهک‌های آسیب‌پذیر توانایی استفاده و برطرف نمودن تقاضای انرژی مفید خود را در سطوح قیمت جهانی حامل‌ها دارا می‌باشند یا خیر. از طرف دیگر آیا قیمت پایین انرژی سبب افزایش مصرف و عدم بهبود بازده سامانه‌های انرژی می‌گردد یا خیر. در مقابل، شاخص سهم هزینه انرژی در درآمد خانوار، به منظور ارزیابی سطح اثرپذیری خانوارها از اقتصاد انرژی مطرح گردیده است.

از جمله شاخص‌های رفاه عمومی جامعه، بالا بودن سرانه تولید ناخالص داخلی است. این موضوع هم از دیدگاه اقتصاد انرژی و هم از دیدگاه میزان مصرف انرژی در امنیت انرژی اثرگذار می‌باشد. سرانه تولید ناخالص داخلی شاخصی است که ارزش اقتصادی تولیدشده به ازای هر نفر را نشان می‌دهد. از دید امنیت انرژی، درآمد سرانه بالاتر فرصت سرمایه‌گذاری در زیرساخت‌های انرژی و تنوع بخشی به منابع و تاب‌آوری بیشتر جامعه در برابر تغییرات را فراهم می‌کند.

شاخص نسبت سرمایه‌گذاری در زیرساخت‌های انرژی، تغییر درصدی سرمایه‌گذاری‌های خالص در این حوزه را نسبت به سال گذشته نشان می‌دهد. در محاسبه این شاخص، درصد استهلاک از کل سرمایه‌گذاری‌ها کسر می‌شود تا تصویر دقیق‌تری از سرمایه‌گذاری‌های واقعی و به‌روزرسانی زیرساخت‌ها ارائه شود. افزایش این شاخص، به معنای تعهد بیشتر به بهبود، نگهداری و توسعه شبکه‌های انرژی داخلی است که از دیدگاه منابع معتبر بین‌المللی مانند آژانس جهانی انرژی و گزارش‌های تحلیلی معتبر [43] نشانه‌ای از بهبود امنیت انرژی و کاهش وابستگی به واردات انرژی محسوب می‌شود. کاهش این شاخص ممکن است نشان‌دهنده ناکارآمدی در جذب سرمایه‌گذاری‌های لازم برای توسعه زیرساخت‌های انرژی و افزایش ریسک‌های اقتصادی و انرژی باشد.

در دسته محدودیت‌های سیاسی امنیتی، شاخص‌های سهم صادرات انرژی از درآمد ارزی و سهم نفت در بودجه دولت بررسی شده است. شاخص سهم صادرات انرژی از درآمد ارزی برای کشورهای همانند ایران که صادرکننده انرژی می‌باشد، امنیت اقتصادی و ارزی را به امنیت صادرات انرژی پیوند زده است. هر چه مقدار این وابستگی بیشتر باشد به زیان امنیت انرژی است. شاخص

3. Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution

1. Commodity

2. The Organization of the Petroleum Exporting Countries (OPEC)

پس از بدست آوردن راه حل ایده آل های مثبت y_{ij}^+ و منفی y_{ij}^- در رابطه (8) و (9)، در آخرین گام فاصله اقلیدسی هر داده از حل های ایده آل مثبت و منفی طبق رابطه (10) و (11) تعیین شده و نزدیکی نسبی به جواب ایده آل طبق رابطه (12) محاسبه می شود. افزایش نزدیکی نسبی به راه حل ایده آل، نشان دهنده ارتقاء سطح میانگین آن بعد از امنیت انرژی است. به طور خاص، زمانی که نزدیکی نسبی برابر با 1 باشد، نشان می دهد که آن بعد از امنیت انرژی به بیشینه مقدار خود دست یافته است. در مقابل، مقدار صفر برای نزدیکی نسبی بیانگر قرار گرفتن آن بعد در پایین ترین سطح امنیت انرژی است. هرچه وضعیت امنیت انرژی در یک سال بهتر باشد؛ حاصل رابطه (12) بیشتر به 1 نزدیک خواهد بود [49،50]. در رابطه (10) و (11) d^+ و d^- به ترتیب فاصله اقلیدسی داده ها از ایده آل مثبت و منفی را بیان می کنند و در رابطه (12) F_i نزدیکی نسبی به جواب ایده آل می باشد.

$$y_{ij}^+ = \max(y_{ij}) \quad (8)$$

$$y_{ij}^- = \min(y_{ij}) \quad (9)$$

$$d^+ = \sqrt{\sum_{i=1}^m (y_{ij} - y_{ij}^+)^2} \quad (10)$$

$$d^- = \sqrt{\sum_{i=1}^m (y_{ij} - y_{ij}^-)^2} \quad (11)$$

$$F_i = d_i^- / (d_i^+ + d_i^-) \quad (12)$$

5- نتایج

شاخص های ارائه شده در جدول 1 محاسبه شده و نتایج نهایی برای دوره زمانی سال های 1384 تا 1400 محاسبه شده است. در شکل 1 نتایج بدست آمده از محاسبه شاخص های امنیت انرژی در 5 دسته کلی بصورت همگن شده آورده شده است. نتایج بدست آمده نشان دهنده نوسان در دسته های مختلف امنیت انرژی می باشد. این نوسان علاوه بر وضعیت داده های موجود در کشور در برخی موارد می تواند متأثر از اعمال هدفمندسازی یارانه و تغییرات قیمتی، شرایط تحریم های بین المللی و شرایط پاندومی کرونا باشد.

همان گونه که شکل 1 نشان می دهد، در این بین بهترین شاخص امنیت انرژی برای سال 1386 و کمترین شاخص متعلق به سال 1397 بوده و روند غالب نزولی در این نمودار قابل مشاهده است. اگرچه نمودار شامل نوسانات و فراز و نشیب هایی در طول دوره است؛ اما مسیر کلی شاخص از سال 1384 تا 1400 شمیسی، به سمت پایین حرکت کرده است. روند نتایج بدست آمده با روند نتایج مطالعات ترکمانی و همکاران [51] تا حد نسبی مطابقت دارد. اگرچه عدد شاخص های بدست آمده متفاوت است. نتایج مطالعه کریمی [52] نیز به وضعیت مشابهی رسیده است، در مطالعه مذکور بعلت عدم لحاظ انتشار، وضعیت مطلوب تر از نتایج مطالعه حاضر بوده است

این روش یکی از روش های کلاسیک و پر کاربرد در تصمیم گیری چندمعیاره است که توسط زنگ و هانگ [46] معرفی شد. ایده اصلی آن این است که بهترین گزینه کمترین فاصله را از راه حل ایده آل مثبت (بهترین حالت ممکن) و بیشترین فاصله را از راه حل ایده آل منفی (بدترین حالت ممکن) داشته باشد. روش تاپسیس شامل 5 مرحله نرمال سازی ماتریس تصمیم، تشکیل ماتریس تصمیم موزون، تعیین راه حل ایده آل مثبت و منفی، محاسبه فاصله اقلیدسی گزینه ها از مراجع ایده آل، محاسبه شاخص نزدیکی نسبی و رتبه بندی می باشد که در ادامه به تفصیل بیان شده است.

داده های مربوط به هر شاخص در سال های 1384 الی 1400 جمع آوری شده و با استفاده از روش نرمال سازی مورد پردازش قرار می گیرند و در نتیجه، ماتریس تصمیم گیری نرمال برای هر بعد حاصل می شود. هر عنصر در این ماتریس مقدار شاخص نرمال شده را طبق رابطه (3) نشان می دهد که در آن i شاخص و j سال مورد نظر و x ماتریس تصمیم گیری نرمال برای هر بعد است.

$$x = [x_{ij}] \quad (3)$$

وزن هر شاخص در هر یک از ابعاد با استفاده از روش وزن دهی آنتروپی شانون تعیین می شود. برای این منظور، ابتدا آنتروپی اطلاعاتی مربوط به شاخص از طریق رابطه (4) محاسبه می گردد [47].

$$e_i = -k \sum_{i=1}^m (p x_{ij}) \times \ln(x_{ij}) \quad (4)$$

در رابطه (4) e_i وزن هر شاخص، K تابع تعداد شاخص های هر دسته و m تعداد سال های مورد بررسی یعنی 17 می باشد. رابطه K و n براساس رابطه (5) حساب می شود، n تعداد شاخص های هر دسته می باشد. $p(x_{ij})$ نیز با استفاده از رابطه (6) محاسبه می گردد. p نیز احتمال نرمال شده ای است که مجموع کل آن برابر 1 خواهد بود، و برای محاسبه آنتروپی استفاده می شود.

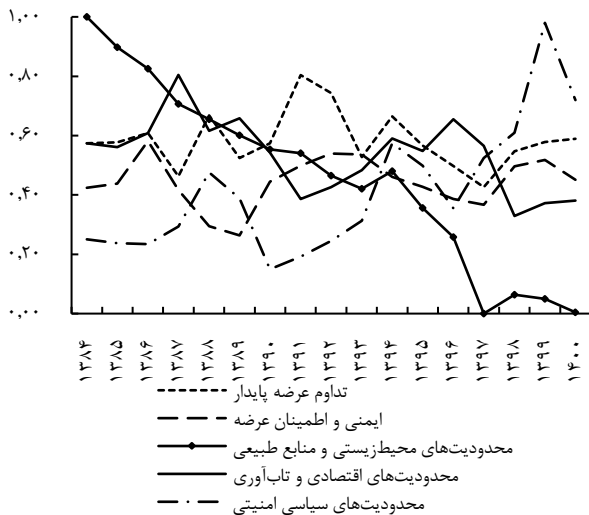
$$k = 1 / \ln(n) \quad (5)$$

$$p(x_{ij}) = (x_{ij}) / \sum_{i=1}^m (x_{ij}) \quad (6)$$

هنگامی سهم یک شاخص در ارزیابی امنیت انرژی کمتر خواهد شد که درجه بی نظمی آن زیاد گردد که این مسئله با آنتروپی سنجیده می گردد. به منظور تعیین درجه انحراف از اطلاعات، حاصل رابطه (4) از بردار واحد کسر شده و وزن دهی هر شاخص، برابر است با حاصل تقسیم درجه انحراف بر مجموع تمامی درجات انحراف شاخص ها که مطابق رابطه (7) محاسبه می گردد که در آن e_i وزن هر شاخص می باشد.

$$w_{ij}^+ = \frac{(1 - e_i)}{\sum_{i=1}^n (1 - e_i)} \quad (7)$$

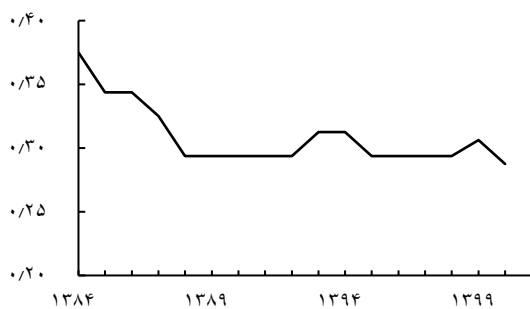
با بدست آوردن وزن هر شاخص و ضرب کردن آن در ماتریس نرمال، ماتریس تصمیم گیری نرمال وزنی $y_{ij} = [y_{ij}]$ حاصل می گردد و نهایتاً برای هر شاخص بهترین و بدترین وضعیت در هر سال مشخص می شود. شایان ذکر است برای شاخص های منفی نظیر میزان انتشار، بهترین وضعیت کمینه اعداد بدست آمده در سال های مورد بررسی می باشد [48].



شکل 2 تغییرات زمانی ابعاد امنیت انرژی

بخشی از مفهوم امنیت انرژی در گرو تنوع‌بخشی به سبد انرژی و همچنین استفاده از ظرفیت‌های انرژی‌های تجدیدپذیر می‌باشد. با توجه به وابستگی تجهیزات انرژی‌های تجدیدپذیر به مواد معدنی کمیاب، بررسی تنوع جهانی پراکندگی و تولید این مواد مطابق شکل 3 شان می‌دهد به مرور زمان تمرکز تولید جهانی بیشتر شده و عمده تولید مواد معدنی ضروری انرژی‌های تجدیدپذیر در اختیار چند کشور خاص می‌باشد. این موضوع از نگرش امنیت انرژی برای ایران که تولیدکننده اصلی اغلب مواد معدنی کمیاب نیست دارای اهمیت است.

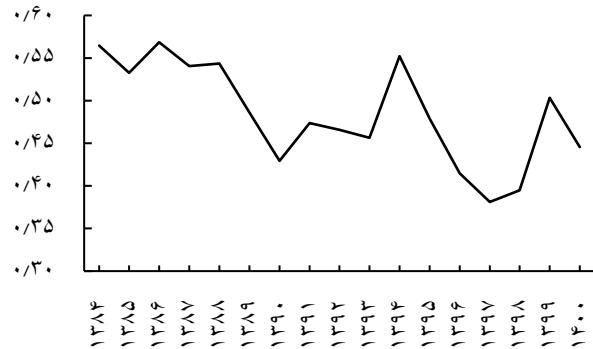
تحلیل روند نتایج، نشان می‌دهد که امنیت انرژی در ایران در بازه زمانی 1384 تا 1400 شمسی، با روند نزولی مواجه بوده است. این روند، به طور عمده ناشی از روندهای نزولی در ابعاد "محدودیت‌های اقتصادی و تاب‌آوری" و "محدودیت‌های محیط زیستی و منابع طبیعی" می‌باشد.



شکل 3 شاخص هرفیندال - هیرشمن کمیابی مواد معدنی

6- تحلیل حساسیت

محاسبه و تعیین شاخص ترکیبی امنیت انرژی، به‌عنوان یک سنجش کمی برای ارزیابی وضعیت چندوجهی امنیت انرژی، مستلزم اتخاذ رویکردی دقیق و روشمند است. با این حال، ماهیت چندبعدی ابعاد متنوع امنیت انرژی، فرآیند محاسبه شاخص ترکیبی را علاوه بر خود شاخص، وابسته به انتخاب روش‌شناسی، به‌ویژه در مراحل تجمیع داده‌ها، نرمال‌سازی و دسته‌بندی شاخص‌های اولیه، می‌سازد [53].



شکل 1 شاخص ترکیبی امنیت انرژی

مطابق با نتایج به‌دست آمده، در سال‌های میانی این دوره، به‌ویژه از حدود سال 1387 به بعد، شاخص به‌طور مستمر کاهش می‌یابد و این افت تا سال 1397 ادامه دارد. در این سال، شاخص به پایین‌ترین مقدار خود (حدود 0/38) می‌رسد که هم‌زمان با تشدید تحریم‌های اقتصادی، کاهش صادرات نفت، افزایش وابستگی بودجه به درآمدهای انرژی، و ضعف در توسعه زیرساخت‌های انرژی است. کاهش امنیت انرژی در این سال‌ها به دلیل آسیب‌پذیری اقتصاد انرژی کشور نسبت به شوک‌های خارجی رخ داده است.

پس از این افت شدید، در سال‌های 1398 و به‌ویژه 1399، شاخص اندکی بهبود می‌یابد. این افزایش مقطعی عمدتاً ناشی از کاهش تقاضای انرژی در اثر شیوع پاندمی کرونا، محدود شدن مصرف داخلی و کاهش واردات است. این تغییر، گرچه در ظاهر بهبود وضعیت را نشان می‌دهد، اما از نظر ماهوی یک انحراف آماری موقت و غیربنیادی است که می‌تواند به سرعت جبران شود. در واقع، بهبود رخ داده در این سال‌ها به دلیل اصلاح سیاست‌های انرژی نبوده، بلکه معلول کاهش فعالیت‌های اقتصادی در دوران بحران کرونا بوده است. در نهایت، در سال 1400 شاخص مجدداً کاهش می‌یابد و مسیر نزولی خود را از سر می‌گیرد. این روند نشان می‌دهد که به‌رغم برخی نوسانات مقطعی، روند کلی امنیت انرژی کشور طی این دوره نزولی بوده است.

در شکل 2 به منظور درک بهتر روندهای شاخص کلی امنیت انرژی با تمرکز بر روندهای متفاوت هرکدام از ابعاد امنیت انرژی در دسته بندی مربوطه مورد بررسی قرار گرفته است. در شاخص‌های "محدودیت‌های اقتصادی و تاب‌آوری" و "محدودیت‌های محیط‌زیستی و منابع طبیعی"، روندی نزولی و تضعیف‌شونده مشاهده می‌شود.

شاخص محدودیت‌های محیط‌زیستی و منابع طبیعی، بیشترین روند نزولی را در بین ابعاد مختلف امنیت انرژی نشان می‌دهد. محدودیت‌های اقتصادی و تاب‌آوری نیز به‌صورت مستمر و نوسانی کاهش پیدا کرده است.

است. در روش تاپسیس با نرمال سازی با روش وزن نسبی شاخص امنیت انرژی سال 1400 حدود 0/18 واحد بیشتر از حالت پایه خواهد شد.

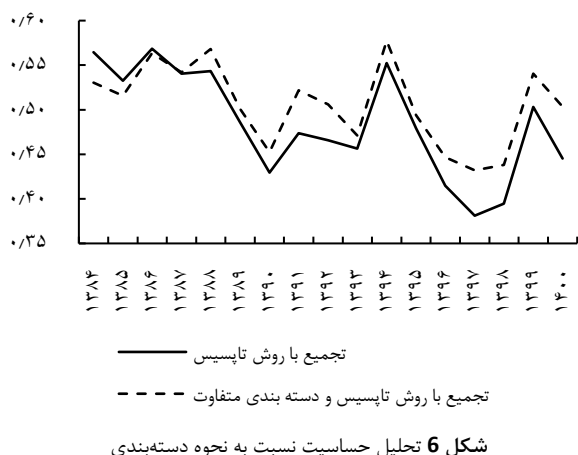


شکل 5 تحلیل حساسیت نسبت به روش نرمال سازی

نتایج نشان می دهد تفاوت در نرمال سازی، واگرایی بین نتایج را به همراه دارد که این مسئله به دلیل تغییر در تأثیر سهم شاخص هایی است که در طول مدت مورد بررسی کم یا زیاد شده اند. نمودار شکل 5 نشان می دهد که شاخص امنیت انرژی به روش نرمال سازی حساس است. روش نرمال سازی با جمع مربعات کمترین مقدار شاخص و بیشترین نوسان را ارائه می دهد، در حالی که روش وزن نسبی روندی نرم تر و مقداری بالاتر دارد. این تفاوت ها بیانگر تأثیر معنادار انتخاب تکنیک نرمال سازی بر نتایج نهایی تحلیل امنیت انرژی است.

6-3- تحلیل حساسیت نسبت به دسته بندی شاخص های امنیت انرژی

در شکل 6 شاخص ترکیبی امنیت انرژی با تغییر در نحوه دسته بندی ارائه شده است. در دسته بندی جدید، شاخص انتشار به دسته محدودیت های سیاسی-امنیتی و شاخص های بازده سیستم انرژی و شدت انرژی به دسته ایمنی و اطمینان عرضه منتقل شده اند. همان طور که مشاهده می شود، در اکثر سال ها اختلاف بین دو روش دسته بندی کم است و روند کلی شاخص حفظ شده است. این موضوع بیانگر آن است که تغییرات در دسته بندی تأثیر قابل توجهی بر شاخص کل نداشته اند و شاخص ترکیبی از پایداری نسبتاً خوبی برخوردار است.



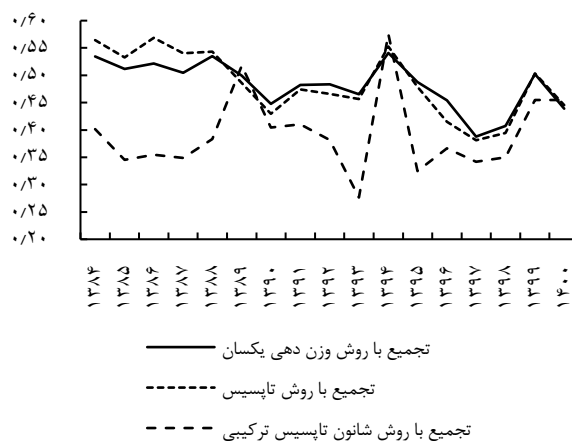
شکل 6 تحلیل حساسیت نسبت به نحوه دسته بندی

این وابستگی، ضرورت انجام تحلیل حساسیت را به منظور ارزیابی میزان پایداری و قابلیت اعتماد شاخص ترکیبی در برابر تغییرات در مفروضات و روش های محاسباتی، برجسته می نماید. برای آنالیز میزان حساسیت شاخص ترکیبی امنیت انرژی به پارامترهای مختلف، تحلیل حساسیت این مسئله در 3 سناریو متفاوت بررسی شده است. تفاوت سناریوهای مذکور در شیوه تجمیع داده ها، نرمال سازی و دسته بندی شاخص های امنیت انرژی می باشد.

6-1- تحلیل حساسیت نسبت به روش تجمیع

در شکل 4 شاخص ترکیبی امنیت انرژی با سه روش وزن دهی یکسان، تجمیع به روش تاپسیس (شرایط پایه و اصلی)، تجمیع با وزن یکسان و تجمیع با روش ترکیبی شانون تاپسیس که در بخش های پیشین اشاره شد، نشان داده شده است. در هر سه روش، شیوه نرمال سازی مشابه و با روش بیشینه-کمینه صورت گرفته و ماتریس تصمیم گیری نرمال ساخته می شود. در روش وزن دهی یکسان، وزن تمامی شاخص های امنیت انرژی یکسان (0/05) است که در بین مطالعات امنیت انرژی، این شیوه متداول ترین روش وزن دهی شاخص های امنیت انرژی می باشد [19].

نمودار شکل 4 نشان می دهد که نتایج شاخص امنیت انرژی تحت تأثیر مستقیم نوع روش تجمیع داده ها قرار دارد. روش وزن دهی یکسان، که فاقد اولویت بندی بین شاخص هاست، روندی نسبتاً یکنواخت را ارائه می دهد؛ اما از حساسیت پایین تری نسبت به تغییرات در داده های واقعی برخوردار است. در مقابل، روش تاپسیس و به ویژه شانون-تاپسیس ترکیبی به دلیل استفاده از اطلاعات درون داده ای (مانند آنتروپی برای وزن دهی)، نوسانات بیشتری در شاخص نهایی نشان می دهند که بیانگر واکنش پذیری بالاتر این روش ها نسبت به تغییرات ساختاری در متغیرهای ورودی است. این تفاوت ها بر اهمیت انتخاب روش مناسب تجمیع برای تحلیل دقیق تر و تصمیم گیری های سیاستی مؤثر در حوزه امنیت انرژی تأکید می کند.



شکل 4 تحلیل حساسیت نسبت به روش تجمیع داده ها

6-2- تحلیل حساسیت به روش نرمال سازی داده های اصلی

در شکل 5 نتایج شاخص ترکیبی امنیت انرژی با سه روش مختلف بیشینه-کمینه، وزن نسبی در مجذور جمع مربعات و وزن نسبی ساده نمایش داده شده است.

- [2] *The role of critical minerals in clean energy transitions*, Accessed 10 March 2025; <https://www.iea.org/reports/the-role-of-critical-minerals-in-clean-energy-transitions>.
- [3] *Mineral commodity by U.S geological survey*, Accessed 1 March 2025; <https://doi.org/10.3133/mcs2024>.
- [4] *Top five manganese reserves by countries*, Accessed 1 March 2025; <https://investingnews.com/daily/resource-investing/battery-metals-investing/manganese-investing/manganese-reserves/>.
- [5] L. T. Peiró, N. Martin, G. V. Méndez, C. Madrid-López, Integration of raw materials indicators of energy technologies into energy system models, *Applied Energy*, Vol. 307, pp. 118150, 2022.
- [6] C. Axon and R. Darton, Sustainability and risk—a review of energy security, *Sustainable Production and Consumption*, Vol. 27, pp. 1195-1204, 2021.
- [7] J. Bielecki, Energy security: is the wolf at the door?, *The quarterly review of economics and finance*, Vol. 42, pp. 235-250, 2002.
- [8] B. K. Sovacool and M. A. Brown, Competing dimensions of energy security: an international perspective, *Annual Review of Environment and Resources*, Vol. 35, pp. 77-108, 2010.
- [9] M. Bazilian, B. Sovacool, and M. Miller, Linking energy independence to energy security, *International Association for Energy Economics*, USA, 2013.
- [10] *Asia pacific energy research center: A quest for energy security the 21st century*, Accessed 13 February 2025; https://aperc.or.jp/file/2010/9/26/APERC_2007_A_Quest_for_Energy_Security.pdf.
- [11] B. K. Sovacool, *The Routledge handbook of energy security*, London: Routledge, 2011.
- [12] A. Azzuni and C. Breyer, Definitions and dimensions of energy security: a literature review, *Wiley interdisciplinary reviews: Energy and environment*, Vol. 7, pp. 268, 2018.
- [13] A. Maleki, *Energy security*, Tehran: World Economy, 2017. (in Persian)
- [14] S. Abbas, Climate change and major crop production: evidence from Pakistan, *Environmental Science and Pollution Research*, Vol. 29, pp. 5406-5414, 2022.
- [15] K. van der Wiel and R. Bintanja, Contribution of climatic changes in mean and variability to monthly temperature and precipitation extremes, *Communications Earth & Environment*, Vol. 2, pp. 1, 2021.
- [16] B. N. Iyke, Climate change, energy security risk, and clean energy investment, *Energy Economics*, Vol. 129, pp. 107225, 2024.
- [17] X. Wang, M. G. Stewart, and M. Nguyen, Impact of climate change on corrosion and damage to concrete infrastructure in Australia, *Climatic change*, Vol. 110, pp. 941-957, 2012.
- [18] B. Krut, D. P. Van Vuuren, H. J. de Vries, and H. Groenenberg, Indicators for energy security, *Energy policy*, Vol. 37, pp. 2166-2181, 2009.
- [19] B. W. Ang, W. L. Choong, and T. S. Ng, Energy security: Definitions, dimensions and indexes, *Renewable and sustainable energy reviews*, Vol. 42, pp. 1077-1093, 2015.
- [20] M. Radovanović, S. Filipović, and D. Pavlović, Energy security measurement—A sustainable approach, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 68, pp. 1020-1032, 2017.
- [21] H. Esmaili, M. Almassi, and M. Ghahderijani, DPSIR modeling to evaluate and analyze Iran's energy security, *Discov Appl Sci*, Vol. 6, No. 25, 2023.
- [22] B. K. Sovacool, I. Mukherjee, I. M. Drupady, A. L. D'Agostino, Evaluating energy security performance from 1990 to 2010 for eighteen countries, *Energy*, Vol. 36, pp. 5846-5853, 2011.
- [23] B. K. Sovacool, Assessing energy security performance in the Asia Pacific, 1990–2010, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 17, pp. 228-247, 2013.
- [24] L. Zhang, J. Yu, B. K. Sovacool, J. Ren, Measuring energy security performance within China: Toward an inter-provincial prospective, *Energy*, Vol. 125, pp. 825-836, 2017.
- [25] *International index of energy security risk-assessing risk in a global energy market*, Accessed 1 March 2025; https://www.globalenergyinstitute.org/sites/default/files/IESRI-Report_2020_4_20_20.pdf, 2020.
- [26] *World energy transitions outlook 2025: 1.5° C pathway*, Accessed 27 January 2025; <https://www.irena.org/>

همان‌گونه که در شکل‌های 4 الی 6 نشان داده شده، شاخص ترکیبی امنیت انرژی در وهله اول نسبت به شیوه نرمال‌سازی و جمع‌شخص‌ها حساس بوده و در خصوص دسته‌بندی نسبت به دو مساله قبل حساسیت کمتری دارد.

7- جمع‌بندی

پژوهش حاضر با تکیه بر چند وجهی بودن امنیت انرژی و نگرش سیستمی به انرژی سعی در ارزیابی وضعیت کلی امنیت انرژی کشور ایران داشته است. این ارزیابی با استفاده از 21 شاخص اصلی در 5 دسته بندی کلی برای محاسبه شاخص ترکیبی امنیت انرژی در سال‌های 1384 الی 1400 صورت پذیرفته است. نتایج این پژوهش همگام با نتایج پژوهش‌های قبلی، نشان‌دهنده روند نزولی شاخص ترکیبی امنیت انرژی ایران در طول سال‌های مورد بررسی می‌باشد.

وضعیت امنیت انرژی در هر 5 دسته با نوسان مواجه است. لازم به ذکر است که در دسته محدودیت‌های اقتصادی و امنیتی و دسته محدودیت‌های زیست‌محیطی وضعیت نزولی بیشتری حکمفرما بوده است. تاثیر مؤلفه‌های اقتصادی مانند تحریم، تورم، هدفمندی یارانه‌ها، کرونا و شیوه قیمت‌گذاری در تمامی دسته‌ها قابل بررسی است. این موضوع نشان می‌دهد که با دورنمای مطلوب و یا نامطلوب از شرایط اقتصادی کشور، وضعیت امنیت انرژی نیز تحت تاثیر قرار خواهد گرفت.

شاخص انتشار گازهای گلخانه‌ای و آلاینده بصورت دائمی نزولی است. همچنین در شاخص تنوع سبد انرژی با گسترش نفوذ گاز طبیعی به سلطه منابع پایان‌پذیر افزوده شده است. توسعه انرژی‌های تجدیدپذیر می‌تواند به افزایش تنوع سبد انرژی و همچنین کاهش انتشار کلی کشور بیانجامد، که نهایتاً می‌تواند به بهبود شاخص‌های ترکیبی امنیت انرژی منجر شود. توجه به کمبایی مواد معدنی حیاتی انرژی‌های تجدیدپذیر برای توسعه و گسترش آن ضروری بوده و دارای الزامات زیرساختی خود می‌باشد که برای جلوگیری از وابستگی دائم به کشورهای تولیدکننده آن مواد، باید بدان توجه شود.

یافته‌های این پژوهش بار دیگر بر ماهیت چندوجهی امنیت انرژی در ایران تأکید دارد؛ موضوعی که در تقاطع مؤلفه‌های اقتصادی، زیست‌محیطی، فنی و نهادی شکل گرفته و با روندهای درونی و بیرونی سیستم انرژی پیوند خورده است. تحلیل روند شاخص ترکیبی امنیت انرژی طی سال‌های 1384 تا 1400 نشان می‌دهد که هیچ یک از ابعاد پنج‌گانه به ثبات نرسیده و آسیب‌پذیری برخی مؤلفه‌ها، به‌ویژه در بخش‌های زیست‌محیطی و محدودیت‌های اقتصادی-امنیتی در حال تعمیق است. این دو دسته‌بندی می‌توانند مورد توجه سیاست‌گذار جهت کنترل و مدیریت امنیت انرژی کشور قرار گیرند. لازم به ذکر است که در هر پیشنهاد سیاستی می‌بایست همبست‌های اقتصادی، ایمنی، فنی و محیط زیستی در یک مدل یکپارچه ارزیابی امنیت انرژی جهت مورد بررسی و مطالعه قرار گیرند.

8- مراجع

- [1] Y. Shang, S. Sang, A. K. Tiwari, S. Khan, X. Zhao, Impacts of renewable energy on climate risk: A global perspective for energy transition in a climate adaptation framework, *Applied Energy*, Vol. 362, pp. 122994, 2024.

- [51] E. Torkamani and M. H. Fotros, Introducing a Composite Index for Measuring and Evaluating Energy Security in Iran, *Iranian Energy Economics*, Vol. 12, pp. 47-78, 2023. (in Persian)
- [52] A. M. S. Karimi, Assessing energy vulnerability in Iran using a quantitative composite index of energy vulnerability, *Protective and Security Research*, Vol. 3, 2011. (in Persian)
- [53] B. K. Sovacool, An international assessment of energy security performance, *Ecological Economics*, Vol. 88, pp. 148-158, 2013.
- /media/Files/IRENA/Agency/Publication/2024/Nov/IRENA_World_energy_transitions_outlook_2024.pdf.
- [27] M. Keersemaeker and M. Keersemaeker, Critical raw materials, *Suriname revisited: Economic potential of its mineral resources*, pp. 69-82, 2020.
- [28] P. Ferro and F. Bonollo, Materials selection in a critical raw materials perspective, *Materials & Design*, Vol. 177, pp. 107848, 2019.
- [29] R. De Oliveira, J. Benvenuti, and D. Espinosa, A review of the current progress in recycling technologies for gallium and rare earth elements from light-emitting diodes, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 145, pp. 111090, 2021.
- [30] A. Cherp and J. Jewell, The concept of energy security: Beyond the four As, *Energy policy*, Vol. 75, pp. 415-421, 2014.
- [31] k. Sovacool and I. Mukherjee, Conceptualizing and measuring energy security: A synthesized approach, *Energy*, Vol. 36, pp. 5343-5355, 2011.
- [32] A. Reimers, W. Cole, and B. Frew, The impact of planning reserve margins in long-term planning models of the electricity sector, *Energy policy*, Vol. 125, pp. 1-8, 2019.
- [33] H. Nyga-Lukaszewska and E. Chilimoniuk-Przeździecka, Modelling Energy Security and International Competitiveness: The Export Perspective, *Entrepreneurial Business & Economics Review*, Vol. 5, 2017.
- [34] *International Monetary Fund. Research Dept.*, Accessed 3 March 2025; <https://www.elibrary.imf.org/view/journals/026/2003/004/026.2003.issue-004-en.xml>.
- [35] M. E. Bildirici and F. O. Sonustun, The effects of oil and gold prices on oil-exporting countries, *Energy strategy reviews*, Vol. 22, pp. 290-302, 2018.
- [36] B. Dalal-Clayton and B. Sadler, *Sustainability appraisal: A sourcebook and reference guide to international experience*, London: Routledge, 2014.
- [37] P. Gasser, A review on energy security indices to compare country performances, *Energy Policy*, Vol. 139, pp. 111339, 2020.
- [38] M. Milligan, B. A. Frew, A. Bloom, E. Ela, A. Botterud, A. Townsend, Wholesale electricity market design with increasing levels of renewable generation: Revenue sufficiency and long-term reliability, *The Electricity Journal*, Vol. 29, pp. 26-38, 2016.
- [39] M. T. Ayaz, T. Prodromou, T. Le, R. Nepal, Energy security dimensions and economic growth in Non-OECD Asia: an analysis on the role of institutional quality with energy policy implications, *Energy Policy*, Vol. 188, pp. 114090, 2024.
- [40] *Statistical center of Iran*, Accessed 13 July 2025; <https://amar.org.ir/industry-statistics#app3090>.
- [41] L. Chester, Conceptualising energy security and making explicit its polysemic nature, *Energy policy*, Vol. 38, pp. 887-895, 2010.
- [42] P. Noël, Is energy security a political, military or market problem, *Financial Times*, Vol. 10, 2008.
- [43] *The World Energy Investment*, Accessed 22 March 2025; <https://www.iea.org/reports/world-energy-investment-2021/executive-summary>.
- [44] *Annual Statistical Bulletin*, Accessed 22 March 2025; <https://www.iea.org/reports/the-role-of-critical-minerals-in-clean-energy-transitions>.
- [45] E. K. Zavadskas and Z. Turskis, Multiple criteria decision making (MCDM) methods in economics: an overview, *Technological and economic development of economy*, Vol. 17, pp. 397-427, 2011.
- [46] G.H. Tzeng and J.J. Huang, *Multiple attribute decision making: methods and applications*, New York: Taylor & Francis Group, 2011.
- [47] S.-J. Chen and C.-L. Hwang, *Fuzzy multiple attribute decision making: Methods and applications*, Springer Nature, pp. 289-486, 1992.
- [48] M. Zeleny, Multiple criteria decision making: Eight concepts of optimality, *Human Systems Management*, Vol. 17, pp. 97-107, 1998.
- [49] E. Triantaphyllou, *Multi-criteria decision making methods: A comparative study*, New york: Springer, pp. 5-21, 2000.
- [50] M. Behzadian, S. K. Otaghsara, M. Yazdani, and J. Ignatius, A state-of-the-art survey of TOPSIS applications, *Expert Systems with applications*, Vol. 39, pp. 13051-13069, 2012.