ارائه یک مدل ترکیبی برای اولویت‌دهی احداث نیروگاه با منابع تجدیدپذیر با در نظر گرفتن اهداف توسعه پایدار (مطالعه موردی: کشور ایران)

محمدعلی بهشتی‌نیا،* میثم شاهجویی و آرمین عالی رضایی*****

تاریخ دریافت ۱۳۹۳/۱۱/۲۵	تاریخ پذیرش ۱۳۹۴/۴/۱۰

کمبود سوخت‌های فسیلی، بحران جهانی نفت و همچنین افزایش آگاهی‌های زیست‌محیطی، پذیرش عمومی از نیروگاه‌های سنتی را در کشورهای درحال‌توسعه کاهش داده است. در این تحقیق برای حمایت از تصمیم‌گیرندگان، جهت انتخاب بهترین جایگزین برای نیروگاه‌های سنتی با سوخت تجدیدپذیر روشی ارائه می‌شود که در آن به بررسی جنبه‌های اقتصادی، زیست‌محیطی، اجتماعی و فنی برای احداث نیروگاه‌های با سوخت‌های تجدیدپذیر می‌پردازد. روش مذکور رویکردی ترکیبی از ابزارهای روش منطق دیجیتال بهبودیافته و روش تاپسیس فازی است که به ارزیابی نیروگاه‌های مختلف و شناسایی بهترین نیروگاه با توجه به معیارهای فنی و اهداف توسعه پایدار می‌پردازد. برای درک بهتر روش پیشنهادی، یک مطالعه موردی در ایران که با وابستگی شدید اقتصادی به نفت دارد، مطرح می‌شود و در آن پنج نیروگاه تولید برق با توجه به ظرفیت‌های کشور، مورد بررسی و اولویت‌بندی قرار می‌گیرند که نیروگاه برق‌آبی بالاترین رتبه را با توجه به اهداف فنی و توسعه پایدار کسب می‌کند.

کلیدواژه‌ها: تاپسیس فازی؛ روش منطق دیجیتال بهبودیافته؛ انرژی تجدیدپذیر؛ توسعه پایدار؛ FMCDM

---

* استادیار دانشکده مهندسی صنایع، دانشگاه سمنان (نویسنده مسئول)؛

Email: beheshtinia@semnan.ac.ir

** کارشناسی ارشد مدیریت اجرایی، دانشکده مهندسی صنایع، دانشگاه سمنان؛

Email: shahjouei.meysam@gmail.com

*** کارشناسی ارشد مدیریت اجرایی، دانشکده مهندسی صنایع، دانشگاه سمنان؛

Email: armin.aalirezaie@gmail.com

مقدمه

در دهه‌های اخیر، جهانیان به‌طور روزافزون از ناتوانی محیط زیست برای حمایت از توسعه بدون قیدوبند بشریت و صنعت، آگاه شده‌اند. آلودگی آب، هوا، خاک و درعین‌حال تغییرات جوی، تأثیرات منفی قابل توجهی بر کیفیت زندگی مردم به‌خصوص در کشورهای با اقتصاد در حال توسعه گذاشته است (Kan, Chen and Tong, 2012). سوخت‌های فسیلی بخش عمده‌ای از این تأثیرات منفی بر محیط زیست را شامل می‌شوند از جمله انتشار گاز دی‌اکسید کربن که انتظار می‌رود در بلندمدت باعث افزایش ۳/۶ درجه سانتیگرادی دمای هوا شود (IEA, 2012). ولی تنها با محدود کردن گسترش بخش انرژی نمی‌توان به یک راه اساسی برای حفظ محیط زیست رسید همچنین اینکه اقتصاد بسیاری از کشورهای جهان شدیداً با تقاضای انرژی درهم‌آمیخته است. درعین‌حال پایان‌پذیری و تجدیدناپذیری سوخت‌های فسیلی نیز به‌عنوان بحران مطرح است. طبیعت میلیون‌ها سال، برای پدید آوردن آنها وقت گذارده و بشر در یک قرن یا بیشتر آن را مصرف می کند. به همین دلیل است که امکان استفاده از منابع انرژی جایگزین مورد توجه واقع شده است. بنابراین، ایجاد تعادل بین رشد اقتصادی، کیفیت زندگی و بهره‌برداری از منابع طبیعی ضرورت تلقی می‌شود. به‌منظور پاسخ به این نیاز، کمیسیون جهانی محیط زیست و توسعه در گزارش خود توسعه پایدار را توسعه‌ای که نیازهای مردم کنونی را بدون از بین بردن توانایی نسل‌های آینده دربرآوردن نیازهایشان برطرف می‌کند، تعریف کرده است (WCED, 1987).

در این راستا استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر،[1] مانند باد و انرژی خورشیدی یک امر حیاتی است زیرا، سریع‌ترین منبع انرژی در حال رشد هستند که تا ۱۱ درصد از منابع انرژی جهانی را پوشش می‌دهند (IEA, 2011). این‌گونه انرژی‌ها تکیه بر سوخت‌هایی دارند که تمیز و تقریباً پایان‌ناپذیرند (UNDP, 2000). ازسوی‌دیگر تنوع نیروگاه‌های تجدیدپذیر نیز زیاد است و انتخاب نوع این نیروگاه‌ها با توجه به شرایط اقلیمی هر کشور می‌تواند متفاوت باشد. پیش‌بینی می‌شود تولید انرژی تجدیدپذیر به‌ویژه در دهه‌های بعدی افزایش

1. Renewable

چشمگیری داشته باشد و به سهم ۵۰ درصد تولید برق تا سال ۲۰۴۰ برسد (Kralova and Sjöblom, 2010).

این مقاله به بررسی مسئله جنبه‌های اقتصادی، زیست‌محیطی، اجتماعی و فنی برای نیروگاه‌های طراحی شده با سوخت‌های تجدیدپذیر می‌پردازد و یک مدل ترکیبی با ادغام روش منطق دیجیتال بهبودیافته[1] و روش تاپسیس فازی[2] برای وزن‌دهی و رتبه‌بندی نیروگاه‌های تولید برق ارائه می‌دهد که قابلیت به‌کارگیری هم‌زمان معیارهای کیفی و کمی را دارد. برای درک بهتر روش پیشنهادی، یک مطالعه موردی در مورد تأمین‌کنندگان انرژی‌های تجدیدپذیر در ایران با در نظر گرفتن دو معیار جدید قابلیت توسعه و سهولت دسترسی به فناوری، مورد بررسی و اولویت‌بندی قرار می‌گیرند.

موضوع این تحقیق، ارائه مدلی ترکیبی از روش‌های منطق دیجیتال بهبودیافته و تاپسیس فازی، به‌منظور رتبه‌بندی نیروگاه‌های با سوخت تجدیدپذیر با در نظر گرفتن معیارهای فنی و توسعه پایدار است. هدف از ارائه این مدل، کسب راهکاری برای انتخاب بهترین سوخت تجدیدپذیر جایگزین برای سوخت‌های فسیلی پایان‌پذیر است.

همواره به کمک هر پژوهش، می‌توان به پرسش‌های متعددی پاسخ داد که این پرسش‌ها را می‌توان به دو دسته کلی تقسیم کرد که شامل سؤالات اصلی و فرعی است. سؤالات این تحقیق عبارت‌اند از:

سؤال اصلی تحقیق: رتبه‌بندی نیروگاه‌های با فناوری استفاده از سوخت‌های تجدیدپذیر به چه صورتی است؟

سؤالات فرعی: چه معیارهایی در ارزیابی و انتخاب بهترین نیروگاه تجدیدپذیر بیشترین تأثیر را دارند؟

نوآوری‌های این مقاله به‌شرح زیر است:

۱. رتبه‌بندی نیروگاه‌های تولید برق با سوخت‌های تجدیدپذیر با توجه به جنبه‌های اقتصادی، زیست‌محیطی، اجتماعی و فنی با ارائه یک مدل ترکیبی براساس روش‌های منطق دیجیتال بهبودیافته و روش تاپسیس فازی؛

---

1. Modified Digital Logic Method (MDL)
2. Fuzzy-Topsis (FTOPSIS)

۲. در نظر گرفتن دو معیار کیفی جدید قابلیت توسعه و سهولت دسترسی به فناوری؛

۳. مطالعه موردی برای کشور ایران که در آن تأمین‌کنندگان انرژی در ایران با توجه به ظرفیت‌های این کشور، مورد بررسی و اولویت‌بندی قرار می‌گیرند.

در ادامه این تحقیق، به بررسی پژوهش‌های پیشین و روش انجام این تحقیق پرداخته می‌شود. سپس به اعتبارسنجی و کاربرد روش مقاله در مطالعه موردی در کشور ایران و بحث و تحلیل نتایج به‌دست‌آمده از آن اختصاص‌یافته است و در نهایت جمع‌بندی، نتیجه‌گیری کلی و پیشنهادهایی را برای مطالعات آینده در این زمینه ارائه می‌دهد.

۱. ادبیات پژوهش

توسعه پایدار سیستم‌های انرژی، برای سیاستگذاران و تصمیم‌گیران در سراسر جهان، روزبه‌روز بااهمیت‌تر می‌شود. اهداف اصلی سیاست جهانی، در این زمینه شامل رشد اقتصادی، امنیت تأمین انرژی و کاهش اثرات تغییرات آب و هوایی است (IEA and OECD, 2008, 2010). برای رسیدن به این اهداف نیاز به در نظر گرفتن و ادغام همه جنبه‌های پایداری سیستم‌های انرژی: (زیست‌محیطی، اقتصادی و اجتماعی) و فنی است که به‌تدریج توسط تصمیم‌گیرندگان و سیاستگذاران به رسمیت شناخته شده (Ness and et al., 2007; Jeswani and et al., 2010; UNEP and SETAC, 2011) و در تعدادی از مطالعات در مورد پایداری سیستم‌های انرژی، منعکس شده است. جدول ۱ جزئیات این تحقیقات را نشان می‌دهد. اگرچه تمرکز بیشتر مطالعات انجام شده در تولید برق است، اما آنها تا حد زیادی در حوزه و روش متفاوت‌اند. این تحقیقات با توجه به نوع و تعداد جنبه‌های فنی و پایداری (زیست‌محیطی، اقتصادی و اجتماعی) و تعداد شاخص در نظر گرفته شده، روش ارزیابی (ارزیابی چرخه عمر، هزینه چرخه عمر و ...) و روش یکپارچه‌سازی ملاحظات پایداری (به‌عنوان مثال رویکرد ذهنی،[1] تجزیه و تحلیل تصمیم‌گیری چندمعیاره[2] و ...) با یکدیگر تفاوت دارند.

1. Subjective Approach
2. Multi Criteria Decision Making (MCDM)

جدول ۱. مطالعات پیشین

روش یکپارچگی شاخص‌ها	تعداد شاخص توسعه پایدار در نظر گرفته شده	هدف و حوزه	تحقیق
اعمال نشده	مجموع: ۲۱؛ محیط زیست: ۱۲؛ اقتصادی: ۵؛ اجتماعی: ۴	ارزیابی پایداری تولید برق از سوخت‌های فسیلی استرالیا: زغال‌سنگ و گاز طبیعی	May and Brennan (2006)
تئوری ارزش چندگانه[1]	مجموع: ۴	چارچوب تصمیم‌گیری برای رتبه‌بندی و انتخاب جایگزین انرژی برای اهداف چندگانه تحت عدم قطعیت	Heinrich and et al. (2007)
فرایند تحلیل سلسله‌مراتبی	مجموع: ۹	ارزیابی پایداری ده نوع نیروگاه	Chatzimouratidis and Pilavachi (2009)
مجموع وزنی	مجموع: ۷	بررسی شاخص‌های توسعه پایدار برای فناوری‌های انرژی تجدیدپذیر (PV خورشیدی، آبی، باد و زمین‌گرمایی)	Evans, Strezov and Evans (2009)
تئوری ارزش چندگانه	مجموع: ۱۱	بررسی و رتبه‌بندی فناوری‌های قدرت که می‌تواند راه‌حلی برای گرم شدن کره زمین، آلودگی هوا و امنیت انرژی ارائه دهد	Jacobson (2009)
SIMOS and PROMETHEE[2]	مجموع: ۱۷؛ محیط زیست: ۴؛ اقتصادی: ۱؛ اجتماعی: ۱۲	بررسی سناریوهای برق پایدار برای اتریش (در سطح ملی و محلی)	Kowalski and et al. (2009)
تئوری ارزش چندگانه	مجموع: ۷۵؛ محیط زیست: ۱۱؛ اقتصادی: ۳۱؛ اجتماعی: ۳۳	ارزیابی پایداری نمونه کارهای تکنولوژی تأمین برق (بهترین گزینه‌های تجاری در دسترس)	Roth and et al. (2009)
الگوریتم جایگزین - غالب[3]	مجموع: ۳۶؛ محیط زیست: ۱۱؛ اقتصادی: ۹؛ اجتماعی: ۱۶	ارزیابی پایداری فناوری برق فعلی و آینده (نقشه راه تکنولوژی)	Schenler and et al. (2009)

روش یکپارچگی شاخص‌ها	تعداد شاخص توسعه پایدار در نظر گرفته شده	هدف و حوزه	تحقیق
اعمال نشده	معیارهای اجتماعی: ۴	ارزیابی پایداری فناوری تولید برق از طریق شاخص‌های اجتماعی	Gallego-Carrera and Mack (2010)
اعمال نشده	مجموع: ۱۳؛ محیط زیست: ۱۰؛ اقتصادی: ۳	ارزیابی زیست‌محیطی و اقتصادی تولید برق در نیجریه	Gujba, Mulugetta and Azapagic (2011)
مجموع وزنی[۴]	مجموع: ۸	شاخص‌های توسعه پایدار در سیستم‌های تولید برق	Onat and Bayar (2010)
تحلیل پوششی داده‌ها[۵]	مجموع: ۱۵؛ محیط زیست: ۵؛ اقتصادی: ۳؛ اجتماعی: ۳؛ فناوری: ۴	روش تجزیه‌وتحلیل پایداری در گسترش برق	La Rovere and et al. (2010)
برنامه‌ریزی توافقی[۶]	مجموع: ۲۲؛ محیط زیست: ۱۳؛ اجتماعی و اقتصادی: ۹	مقایسه پایداری از دو گزینه برای تولید برق: زغال‌سنگ در برابر زیست‌توده	Dorini, Kapelan and Azapagic (2010)
اعمال نشده	مجموع: ۴۳؛ محیط زیست: ۱۱؛ تکنو ـ اقتصادی: ۱۳؛ اجتماعی: ۱۹	ارزیابی پایداری تولید برق	Stamford and Azapagic (2012)
نوسانی[۷]	مجموع: ۱۰؛ محیط زیست: ۲؛ تکنو ـ اقتصادی: ۴؛ اجتماعی: ۴	ارزیابی پایداری فناوری تولید برق	Maxim (2014)
AHP	مجموع: ۱۲؛ محیط زیست: ۳؛ فنی: ۳؛ اقتصادی: ۴؛ اجتماعی: ۲	انتخاب منابع انرژی تجدیدپذیر برای توسعه پایدار برق سیستم تولید با استفاده از فرایند تحلیل سلسله‌مراتبی: مورد مالزی	Ahmad and Taher (2014)
اعمال نشده	مجموع: ۲۰	مقایسه سیستم‌های تولید برق انرژی گرمایی، بادی و خورشیدی	Li and et al. (2015)

تحقیق	هدف و حوزه	تعداد شاخص توسعه پایدار در نظر گرفته شده	روش یکپارچگی شاخص‌ها
Sengül and et al. (2015)	روش TOPSIS فازی برای رتبه‌بندی سیستم‌های تأمین انرژی تجدیدپذیر در ترکیه	مجموع: ۹؛ محیط زیست: ۲؛ تکنو: ۳؛ اقتصادی: ۳؛ اجتماعی: ۱	تاپسیس فازی

1. Multi Attribute Value Theory
2. PROMETHEE :Preference Ranking Organization Method for Enrichment Evaluation
3. Dominating-alternative Algorithm
4. Weighted Sum
5. Data Envelopment Analysis
8. Compromise Programming
9. Swing

می‌توان دریافت که در بیشتر تحقیقات صورت گرفته، جنبه اقتصادی پررنگ بوده و کمتر به جنبه‌های فنی و زیست‌محیطی توجه شده است. تحقیقات کمی ارزیابی نیروگاه‌ها را با در نظر گرفتن هر چهار معیار اصلی انجام داده‌اند که آنها نیز فقط از معیارهای کمی استفاده شده‌اند.

در این مقاله برای اولین بار سیستم ارزیابی یکپارچه برای سنجش پایداری برای نیروگاه‌های تجدیدپذیر تولید برق با قابلیت در نظر گرفتن معیارهای کمی و کیفی به‌طور هم‌زمان ارائه شده است. این سیستم به ارائه مدلی برای تصمیم‌گیری درزمینه اولویت‌بندی جهت احداث نیروگاه‌های مختلف با توجه یکپارچه به جنبه‌های اقتصادی، زیست‌محیطی، اجتماعی و فنی منجر می‌شود.

۲. روش تحقیق

۲-۱. روش گردآوری اطلاعات

همان‌گونه که اشاره شد، این مقاله به بررسی نیروگاه‌های تجدیدپذیر با توجه به اهداف توسعه پایدار می‌پردازد. بدین منظور برای تعیین معیارها با استفاده از مرور ادبیات و پرسش از خبرگان، معیارها و زیرمعیارهایی که تأثیر مستقیم بر تصمیم‌گیری دارند، انتخاب می‌شوند. سپس برای جمع‌آوری اطلاعات از دو پرسش‌نامه استفاده شده است که پرسش‌نامه اول به‌منظور شناسایی وزن و اهمیت معیارهای تصمیم‌گیری به روش منطق

دیجیتال بهبودیافته و پرسش‌نامه دوم برای رتبه‌بندی نیروگاه‌ها با روش تاپسیس فازی به‌کار می‌رود. پرسش‌نامه‌ها توسط هشت خبره درزمینه صنعت نیروگاه تکمیل شده است. مشخصات پرسش‌شوندگان به‌شرح جدول ۲ است. در انتها نیز روش ترکیبی جدیدی به‌منظور رتبه‌بندی نیروگاه‌ها برمبنای شاخص‌های تعیین شده ارائه می‌شود.

جدول ۲. مشخصات پرسش‌شوندگان

ردیف	تحصیلات	تخصص	میزان سابقه کار در صنعت (سال)	سطح آشنایی با مفاهیم توسعه پایدار
۱	دکتری	سیستم‌های تولید هم‌زمان گرمایش و سرمایش و نیروگاه	۱۵	خوب
۲	دکتری	انرژی‌های نو	۲۵	خوب
۳	دکتری	انرژی خورشیدی	۱۸	خوب
۴	دکتری	کار در صنایع نیروگاهی	۱۰	خوب
۵	دکتری	کار در نیروگاه	۱۴	خوب
۶	کارشناسی ارشد	توسعه پایدار	۱۵	بالا
۷	کارشناسی ارشد	کار در شرکت توزیع برق	۱۷	خوب
۸	کارشناسی ارشد	کار در نیروگاه	۱۸	خوب

۲-۲. روش پیشنهادی

همان‌طور که پیش از این عنوان شده است در این مقاله ابتدا به شناسایی معیارهای مورد نیاز برای اولویت‌بندی نیروگاه‌ها خواهیم پرداخت. با استفاده از روش منطق دیجیتال بهبودیافته وزن معیارهای مورد نظر تعیین می‌شوند. سپس با کمک روش تاپسیس فازی نیروگاه‌ها اولویت‌بندی می‌گردند. بدین‌صورت از مزایای هر دو روش استفاده می‌شود.

۲-۲-۱. روش منطق دیجیتال بهبودیافته

برای برنامه‌های کاربردی که در آن تعداد ویژگی‌های طراحی نسبتاً زیاد است، تعیین وزن برای معیارهای چندگانه به‌طور هم‌زمان ممکن است برای تصمیم‌گیرنده بسیار دشوار باشد. برای حل این مشکل، روش منطق دیجیتال بهبودیافته با پیشنهاد مقایسه دو به دو معیارها توسعه داده

شد. روش منطق دیجیتال ثابت کرده است درحالی‌که یک روش ساده شهودی برای پیاده‌سازی ارائه می‌دهد، قابلیت اطمینان نتایج تصمیم‌گیری را تا حد زیادی بالا می‌برد. در این روش، دو معیار در یک زمان با هم مقایسه می‌شوند و نمره باینری صفر یا ۱ بسته به اولویت تصمیم‌گیرنده دریافت می‌کنند (۱ برای معیار مهم‌تر و صفر برای معیار با اهمیت کمتر). دهقان- منشادی و همکاران روش اصلاح شده منطق دیجیتال را ارائه کردند که در آن تغییر امتیازدهی از {۰ و ۱} به یک طرح امتیازدهی {۳ و ۱، ۲} تغییر پیدا کرده است (Dehghan-Manshadi and et al., 2007). به این صورت که برای معیار با اهمیت کمتر عدد (۱)، با اهمیت برابر عدد (۲) و برای اهمیت بیشتر عدد (۳) در نظر گرفته شد. مزیت این امتیازدهی این است که به تصمیم‌گیرنده امکان می‌دهد برای دو ویژگی، وزن‌های یکسانی را در نظر بگیرند. به‌علاوه موجب عدم حذف معیار با کمترین اهمیت، از ماتریس تصمیم‌گیری می‌شود.

پس از آنکه همه مقایسه‌های دو به دو انجام شد، وزن‌های این روش به صورت رابطه (۱) قابل محاسبه است:

$$W_j = \frac{\sum_{k=1}^{n} C_{jk}}{\sum_{j=1}^{n}\sum_{k=1}^{n} C_{jk}}, \text{ j and k} = \{1, \ldots, \text{n}\} \text{ and j} \neq \text{k} \qquad (۱)$$

که n تعداد معیارها و Wj وزن معیار j است. همچنین اگر دو معیار j و k به یک اندازه مهم باشند، آنگاه ۲= $Cjk = Ckj$، در غیر این صورت اگر معیار k از معیار j مهم‌تر باشد ۳ = Cjk و ۱ = Ckj و اگر معیار k از معیار j از اهمیت کمتری برخوردار باشد آنگاه ۱ = Cjk و ۳= Ckj.

۲-۲-۲. روش تاپسیس فازی

تکنیک تاپسیس را هوانگ و یون در سال ۱۹۸۱ مطرح کردند (Hwang and Yoon,1981). منطق زیربنایی تاپسیس، تعریف راه‌حل‌های ایدئال مثبت[1] و منفی[2] است. راه‌حل ایدئال مثبت، معیارهایی از نوع سود را حداکثر و معیارهای از نوع هزینه را حداقل می‌کند. راه‌حل ایدئال منفی، معیارهای از نوع هزینه را حداکثر و معیارهای از نوع سود را

1. Fuzzy Positive Ideal Solution (FPIS)
2. Fuzzy Negative Ideal Solution (FNIS)

حداقل می‌کند. بهترین گزینه، نزدیک‌ترین گزینه به راه‌حل ایدئال مثبت و دورترین گزینه از راه‌حل ایدئال منفی است. به‌طور خلاصه، راه‌حل ایدئال مثبت، ترکیبی از بهترین ارزش‌های قابل دسترس معیارهاست، درحالی‌که راه‌حل ایدئال منفی، شامل بدترین ارزش‌های قابل دسترس معیارهاست. در این روش ارزیابی همه گزینه‌ها نسبت به همه معیارها، صورت می‌پذیرد و به کمک محاسبه فاصله میان جواب‌های ایدئال مثبت و منفی و استفاده از شاخصی به نام شاخص نزدیکی[1] گزینه‌ها را اولویت‌بندی می‌کند. در این تحقیق از روش تاپسیس فازی برای تعیین امتیاز گزینه‌ها استفاده شده است. برای بیان وضعیت گزینه‌ها از عبارت کلامی[2] یا علامت اختصاری آمده در جدول ۳ استفاده کنید.

جدول ۳. متغیرهای کلامی در تاپسیس فازی

عبارت کلامی	عدد فازی	علامت اختصاری
خیلی ضعیف	(۱ و ۰ و ۰)	VP
ضعیف	(۳ و ۱ و ۰)	P
تا حدودی ضعیف	(۵ و ۳ و ۱)	MP
بی‌تفاوت	(۷ و ۵ و ۳)	F
تا حدودی خوب	(۹ و ۷ و ۵)	MG
خوب	(۱۰ و ۹ و ۷)	G
خیلی خوب	(۱۰ و ۱۰ و ۹)	VG

۳. مطالعه موردی

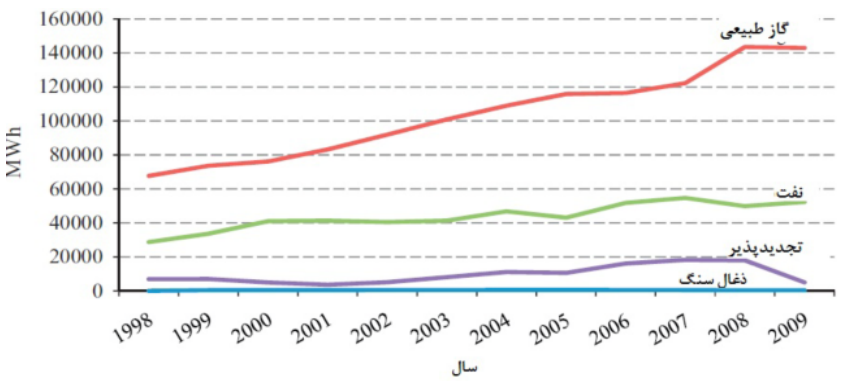
کشور ایران دارای منابع فراوان سوخت‌های فسیلی است. ذخایر اثبات شده نفتی، شامل مایعات گازی بیش از ۱۳۷ میلیارد بشکه یا ۱۱ درصد از منابع کل جهان است. این در حالی است که منابع گاز طبیعی بیش از ۲۶/۷ تریلیون مترمکعب یا ۱۵ درصد کل منابع جهان در سال ۱۳۸۳ بوده است (Bp., 2006) ؛ بنابراین این یک حقیقت آشکار است که منابع سوخت‌های فسیلی در ایران ستون اصلی اقتصاد کشور هستند. بااین‌حال، مصرف سوخت‌های فسیلی در ایران به‌دلیل افزایش جمعیت و رشد تولید ناخالص داخلی، غیر بهینه است و

1. Closeness Coefficient
2. Linguistic Variables

قیمت‌های یارانه‌ای سوخت افزایش یافته است. سیاستگذاران انرژی مدت‌هاست در تلاش هستند تا مصرف انرژی را تنوع بخشند و انرژی‌های هسته‌ای و تجدیدپذیر را وارد سبد انرژی کنند. امنیت انرژی از دید سیاستگذاران انرژی ایران بسیار حیاتی است (شعربافیان، ۱۳۸۷).

انواع منابع انرژی تجدیدپذیر، از جمله انرژی باد، خورشیدی، زمین‌گرمایی، زیست‌توده و برق‌آبی در حال حاضر در ایران وجود دارند. نمودار ۱ تولید برق از منابع تجدیدناپذیر و تجدیدپذیر در ایران را نشان می‌دهد. در این نمودار تولید برق از منابع تجدیدپذیر، شامل برق‌آبی، زمین‌گرمایی، انرژی خورشیدی، باد و زیست‌توده است که نشان از ظرفیت‌های بالفعل ایران برای تولید برق از سوخت‌های تجدیدپذیر است (Bahrami and Abbaszadeh, 2013).

نمودار ۱. تولید برق از منابع تجدیدپذیر و تجدیدناپذیر در ایران



بهرامی و عباس‌زاده (۲۰۱۳) در تحقیق خود نشان دادند که کشور ایران دارای منابع و ظرفیت لازم و کافی برای ساخت ۵ نیروگاه با سوخت تجدیدپذیر را دارد (.Ibid). جدول ۴ این گزینه‌ها را نشان می‌دهد. در این تحقیق ما از گزینه‌های به‌دست آمده از تحقیق آنها استفاده می‌کنیم. معیارهای مورد استفاده نیز با مرور ادبیات و پرسش از خبرگان شناسایی شده‌اند (Wang and et al., 2009). زیرمعیارهایی نظیر بهره‌وری، هزینه سرمایه‌گذاری، هزینه نگهداری و تعمیرات، عمر سرویس، میزان انتشار گازهای NOX و CO2، میزان استفاده از زمین، ایجاد اشتغال، توسعه محلی و در نهایت ایمنی از یک مطالعه مروری

استخراج گردیده و زیرمعیارهای قابلیت توسعه و سهولت دسترسی به فناوری با نظر خبرگان انتخاب شده‌اند. تعداد معیارهای شناسایی شده به‌طور کلی، شامل چهار معیار اصلی و دوازده زیرمعیار است که در جدول ۵ ارائه شده است.

جدول ۴. مشخصات نیروگاه‌های قابل احداث در ایران با سوخت تجدیدپذیر

گزینه	نوع نیروگاه	محل قابل احداث
A۱	نیروگاه برق‌آبی	در اطراف سدها و رودخانه‌های پرآب
A۲	نیروگاه بادی	رودبار، تبریز، زابل، شیراز، ماهشهر
A۳	نیروگاه فتوولتاییک	یزد، سمنان، تهران، طالقان، خراسان
A۴	زیست‌توده	فارس، شیراز، خراسان
A۵	نیروگاه زمین‌گرمایی	مشکین‌شهر، سبلان، سرعین، دماوند، سهند، خوی ـ ماکو

Source: Bahrami and Abbaszadeh, 2013.

جدول ۵. معیارها و زیرمعیارهای شناسایی شده برای ارزیابی نیروگاه‌ها با سوخت تجدیدپذیر در ایران

معیار اصلی	شرح معیار اصلی	زیرمعیار	شرح زیرمعیار
C۱	فنی	C۱.۱	بهره‌وری
		C۱.۲	قابلیت توسعه (خبرگان)
		C۱.۳	سهولت دسترسی به فناوری (خبرگان)
C۲	اقتصادی	C۲.۱	هزینه سرمایه‌گذاری
		C۲.۲	هزینه نگهداری و تعمیرات
		C۲.۳	عمر سرویس
C۳	محیطی	C۳.۱	انتشار NOX
		C۳.۲	میزان استفاده از زمین
		C۳.۳	انتشار CO2
C۴	اجتماعی	C۴.۱	ایمنی
		C۴.۲	ایجاد اشتغال
		C۴.۳	توسعه محلی و مزایای اجتماعی

Source: Wang and et al., 2009.

۱-۳. تعیین وزن هر معیار

پس از شناسایی معیارهای ارزیابی، به‌منظور استفاده ازنظر همه تصمیم‌گیرندگان، از روش منطق دیجیتال بهبودیافته بهره گرفته شده است. اطلاعات مورد نیاز برای حل مسئله به کمک این روش از پرسش‌نامه استخراج می‌شود. این پرسش‌نامه شامل پنج ماتریس مقایسه زوجی (یکی برای معیارهای اصلی و چهار ماتریس برای زیرمعیارها) است. ابتدا وزن معیارهای اصلی محاسبه شده است. سپس وزن زیرمعیارهای مرتبط با هر معیار محاسبه می‌شود. وزن نهایی هر زیرمعیار از حاصل‌ضرب وزن هر معیار اصلی در وزن محاسبه شده برای هر زیرمعیار به‌دست می‌آید. این رویکرد در مقاله زنگنه و همکاران (۲۰۰۹) نیز استفاده شده است، با این تفاوت که آنها از روش فرایند تحلیل سلسله‌مراتبی[1] برای تعیین اوزان استفاده کرده‌اند. به‌منظور تبیین بیشتر، جواب به‌دست آمده از یک خبره برای معیارهای اصلی و زیرمعیارهای اقتصادی در جداول ۶ و۷ آورده شده است.

جدول ۶. نمونه پرسش‌نامه پر شده و وزن هر یک از معیارهای چهارگانه اصلی

شماره مقایسه / معیارها	۱	۲	۳	۴	۵	۶	مجموع	وزن نرمالایز شده
فنی	۱	۳	۳				۷	۰/۲۹۱۹۹۷
اقتصادی	۳			۳	۳		۹	۰/۳۷۵
زیست‌محیطی		۱		۱		۳	۵	۰/۲۰۸۳۳۳
اجتماعی			۱		۱	۱	۳	۰/۱۲۵

جدول ۷. نمونه پرسش‌نامه پر شده و وزن هر یک از زیرمعیارهای اقتصادی

شماره مقایسه / معیارها	هزینه سرمایه‌گذاری	هزینه عملیاتی و تعمیرات	عمر	مجموع	وزن نرمالایز شده	وزن نهایی (وزن نرمالایز شده ۰/۳۷۵)
هزینه سرمایه‌گذاری	۳	۳		۶	۰/۵	۰/۱۸۷۵
هزینه عملیاتی و تعمیرات	۱		۳	۴	۰/۳۳	۰/۱۲۵
عمر		۱	۱	۲	۰/۱۶۷	۰/۰۶۲۵

1. Analytical Hierarchy Process (AHP)

فرد پاسخگو با توجه به معیارهای مطرح شده، آنها را دو به دو با یکدیگر مقایسه می‌کند و از این دو معیار به معیاری که ارزش بالاتری دارد، عدد ۳ و به معیار دیگر عدد ۱ را اختصاص می‌دهد و درصورتی‌که هر دو معیار دارای ارزش یکسان باشند، به هر دو عدد، امتیاز ۲ داده می‌شود. پس از دریافت پاسخنامه، از جمع اعدادی که در سطر مورد نظر آن معیار آورده شده است، امتیاز برای معیار مورد نظر به‌دست می‌آید. مجموع امتیازهای معیارها، امتیاز کل آن معیار را نشان می‌دهد. جدول ۸ وزن نرمال شده معیارهای این مسئله را با کمک روش منطق دیجیتال اصلاح شده نشان می‌دهد.

جدول ۸. وزن نرمال شده معیارها

معیار	وزن معیار (وزن (۱))	زیرمعیار	وزن نسبت به معیار (وزن (۲))	وزن نسبت به هدف (وزن (۱))× (وزن (۲))
فنی	۰/۲۹۱	C۱.۱	۰/۴۵۴	۰/۱۳۲
		C۱.۲	۰/۱۸۱	۰/۱۰۶
		C۱.۳	۰/۳۶۳	۰/۰۵۳
اقتصادی	۰/۳۷۵	C۲.۱	۰/۵	۰/۱۸۷
		C۲.۲	۰/۳۳۳	۰/۱۲۵
		C۲.۳	۰/۱۶۶	۰/۰۶۲
زیست‌محیطی	۰/۲۰۸	C۳.۱	۰/۳۳۳	۰/۰۶۹
		C۳.۲	۰/۱۶۶	۰/۰۳۴
		C۳.۳	۰/۵	۰/۱۰۴
اجتماعی	۰/۱۲۵	C۴.۱	۰/۵	۰/۰۶۲
		C۴.۲	۰/۳۳۳	۰/۰۴۱
		C۴.۳	۰/۱۶۶	۰/۰۲۰

۲-۳. تشکیل ماتریس تصمیم‌گیری

برای ارزیابی گزینه‌ها، ابتدا یک مسئله FMCDM[1] را فرمول‌بندی می‌کنیم که شامل مجموعه‌ای

1. Fuzzy Multi Criteria Decision Making (FMCDM)

از m گزینه است و در n شاخص و وزن‌های مربوطه ارزیابی می‌شوند. مسئله می‌تواند به صورت زیر مدل‌سازی شود.

$$x = [x_{ij}]_{m*n} = \begin{array}{c} \\ A_1 \\ A_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ A_m \end{array} \begin{array}{c} \begin{array}{cccccc} C_1 & C_2 & . & . & . & C_n \end{array} \\ \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & . & . & . & x_{1n} \\ x_{21} & x_{22} & . & . & . & x_{2n} \\ . & . & . & . & . & . \\ . & . & . & . & . & . \\ . & . & . & . & . & . \\ x_{m1} & x_{m2} & . & . & . & x_{mn} \end{bmatrix} \end{array} \quad (۲)$$

و $W=[w1,w2,...,wn]$.

در اینجا $A1,A2,...,Am$ گزینه‌های ممکن و $C1,C2,...,Cn$ معیارهایی هستند که به‌منظور ارزیابی گزینه‌ها در نظر گرفته شده‌اند. x_{ij} رتبه گزینه Ai ازمنظر معیار Cj و Wj وزن Cj می‌باشدکه توسط روش منطق دیجیتالی اصلاح شده، به‌دست آمده‌اند. جدول ۹ ماتریس تصمیم‌گیری فازی یکپارچه برای مسئله مورد بررسی را نشان می‌دهد. مرحله بعد، مرحله نرمالایزسازی یا بی‌مقیاس‌سازی ماتریس تصمیم است. روش مورد استفاده در این پژوهش، به مانند روش چن و هانگ، روش نرمال‌سازی خطی است (Chen and Hwang, 1992). بدین منظور باید مقدارِ حداکثرِ هر ستون x_j^+ و مقدار حداقلِ هر ستون x_j^- را مشخص و با استفاده از روابط ذیل، مقادیر r_{ij} را که مقدار بی‌مقیاس شده x_{ij} می‌باشند، محاسبه کرد. زمانی که x_{ij} فازی باشد، r_{ij} نیز فازی خواهد بود.

با فرض $x_{ij} = (a_{ij}, b_{ij}, c_{ij})$ و $x_j^+ = (a_j^+, b_j^+, c_j^+)$ و $x_j^- = (a_j^-, b_j^-, c_j^-)$

روابط زیر برای r_{ij} برقرار است:

اگر x_{ij} جنبه مثبت داشته باشد (مثل سود) آنگاه:

$$r_{ij} = \frac{x_{ij}}{x_j^+} = \left(\frac{a_{ij}}{c_j^+}, \frac{b_{ij}}{b_j^+}, \frac{c_{ij}}{a_j^+}\right) \quad (۳)$$

اگر x_{ij} جنبه منفی داشته باشد (مثل هزینه) آنگاه:

$$r_{ij} = \frac{x_j^-}{x_{ij}} = \left(\frac{a_j^-}{c_{ij}}, \frac{b_j^-}{b_{ij}}, \frac{c_j^-}{a_{ij}}\right) \quad (۴)$$

گام بعد، محاسبه ماتریس نرمالایز شده وزنی است. در این حالت وزن‌های به‌دست آمده از روش منطق دیجیتالی اصلاح شده در عناصر ماتریس نرمالایز شده ضرب می‌شوند (جدول ۱۰).

عناصر ماتریس نرمالایز شده وزنی ($\tilde{v}_{ij}$) برای اعداد فازی مثلثی با استفاده از رابطه ذیل قابل محاسبه است که اگر x_{ij} جنبه مثبت داشته باشد (مثل سود) آنگاه:

$$\tilde{v}_{ij} = r_{ij} \otimes w_j = \left(\frac{a_{ij}}{c_j^+}, \frac{b_{ij}}{b_j^+}, \frac{c_{ij}}{c_j^+}\right) \otimes (\alpha_j, \beta_j, \chi_j)$$
$$= \left(\frac{a_{ij}}{c_j^+} \otimes \alpha_j, \frac{b_{ij}}{b_j^+} \otimes \beta_j, \frac{c_{ij}}{c_j^+} \otimes \chi_j\right) \quad (۵)$$

و اگر x_{ij} جنبه منفی داشته باشد (مثل هزینه) آنگاه :

$$\tilde{v}_{ij} = r_{ij} \otimes w_j = \left(\frac{c_j^-}{a_{ij}}, \frac{b_j^-}{b_{ij}}, \frac{c_j^-}{c_{ij}}\right) \otimes (\alpha_j, \beta_j, \chi_j)$$
$$= \left(\frac{c_j^-}{a_{ij}} \otimes \alpha_j, \frac{b_j^-}{b_{ij}} \otimes \beta_j, \frac{c_j^-}{c_{ij}} \otimes \chi_j\right) \quad (۶)$$

علامت $\otimes$ نشان‌دهنده ضرب فازی است.

نتایج این محاسبات در ماتریسی تحت عنوان V به صورت زیر وارد می‌شود:

$$\tilde{V} = \left[\tilde{v}_{ij}\right]_{m*n} = \begin{matrix} A_1 \\ A_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ A_m \end{matrix} \begin{bmatrix} \tilde{v}_{11} & \tilde{v}_{12} & \cdot & \cdot & \cdot & \tilde{v}_{1n} \\ \tilde{v}_{21} & \tilde{v}_{22} & \cdot & \cdot & \cdot & \tilde{v}_{2n} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \tilde{v}_{m1} & \tilde{v}_{m2} & \cdot & \cdot & \cdot & \tilde{v}_{mn} \end{bmatrix} \quad (۷)$$

۳-۳. ارزیابی و اولویت‌بندی نیروگاه‌ها در روش منطق دیجیتال اصلاح شده ـ تاپسیس

حال نوبت به اولویت‌دهی نیروگاه‌هاست. بدین منظور شاخص نزدیکی را برای هر یک از گزینه‌ها به کمک FPIS و FNIS به‌دست می‌آوریم. بدین منظور ابتدا به کمک رابطه (۸) و (۹)، به‌ترتیب جواب ایدئال مثبت فازی و جواب ایدئال منفی فازی را محاسبه می‌کنیم (جدول ۱۱).

$$FPIS: A^{+} = \{(\tilde{V}_j^{+} = \max \tilde{V}_{ij} \mid j \in J), (\tilde{V}_j^{+} = \min \tilde{V}_{ij} \mid j \in J')\} \quad j = 1, 2, 3, \ldots, n \quad (۸)$$

$$FNIS: A^{-} = \{(\tilde{V}_j^{-} = \min \tilde{V}_{ij} \mid j \in J), (\tilde{V}_j^{-} = \max \tilde{V}_{ij} \mid j \in J')\} \quad j = 1, 2, 3, \ldots, n \quad (۹)$$

در این روابط $\tilde{V}_{ij}$، عناصر ماتریس تصمیم‌گیری وزن‌دار است همچنین J نشان‌دهنده معیارهای ارزش مثبت نظیر سود و J' نشان‌دهنده عناصر ارزش منفی یا به‌عبارت‌دیگر هزینه‌هاست. $\tilde{V}_j^{+}$ و $\tilde{V}_j^{-}$ به‌ترتیب جواب ایدئال مثبت و منفی برای ستون j ام می‌باشد. به‌عبارت‌دیگر برای معیارهای منفی برای محاسبه جواب ایدئال مثبت فازی و جواب ایدئال منفی فازی، به‌ترتیب مقادیر کمینه و بیشینه در نظر گرفته می‌شود.

در حالت فازی جهت مقایسه اعداد فازی و تعیین $\tilde{V}_j^{-}$ و $\tilde{V}_j^{+}$ از فرایندهای رتبه‌بندی اعداد فازی استفاده می‌شود. براساس این روش، رتبه عدد فازی $(\tilde{v}_{ij})$ که با $(M(\tilde{v}_{ij}))$ نشان داده می‌شود، به این صورت تعریف می‌شود:

$$M(\tilde{v}_{ij}) = \frac{-a_{ij} - a_{ij}.b_{ij} + b_{ij}.c_{ij} + c_{ij}^{2}}{3(c_{ij} - a_{ij})} \quad (۱۰)$$

پس از محاسبه $M(\tilde{v}_{ij})$ها، به ازای هر ستون j، آن$(\tilde{v}_{ij})$ که دارای بیشترین میزان $M(\tilde{v}_{ij})$ است، به‌عنوان $\tilde{v}_j^{+}$ و کمترین مقدار آن به‌عنوان $\tilde{v}_j^{-}$ تعیین می‌شود.

عناصر FPIS را با $\tilde{v}_j^{+}$ و عناصر FINS را با $\tilde{v}_j^{-}$ نشان می‌دهیم. حال نیاز به محاسبه مجموع فواصل هر گزینه از FPIS و FNIS است. بدین منظور به‌ترتیب از رابطه (۱۱) و (۱۲) استفاده می‌کنیم که نتایج حاصل از آن را می‌توان در جدول ۱۲ مشاهده کرد.

$$S_i^{+} = \sum_{j=1}^{n} d(\tilde{v}_{ij}, \tilde{v}_j^{+}) \quad I = 1, 2, 3\ldots., m \quad (۱۱)$$

$$S_i^{-} = \sum_{j=1}^{n} d(\tilde{v}_{ij}, \tilde{v}_j^{-}) \quad I = 1, 2, 3\ldots., m \quad (۱۲)$$

در این رابطه S_i^{+} و S_i^{-} به‌ترتیب به مجموع فاصله گزینه‌ها از جواب ایدئال مثبت و منفی می‌باشد و منظور از $d(a, b)$ فاصله دو عدد فازی a و b است که با استفاده از فرمول (۱۳) محاسبه می‌شوند.

$$d(a,b) = \sqrt{\frac{1}{3}[(a_1 - b_1)^2 + (a_2 - b_2)^2 + (a_3 - b_3)^2} \quad (۱۳)$$

جدول ۹. ماتریس تصمیم‌گیری فازی یکپارچه

	A1	A2	A3	A4	A5	Min	Max
C۱و'۱	G	MG	MP	MG	F		(۷و۹و۱۰)
C۱،۲	G	G	F	MG	MG		(۷و۹و۱۰)
C۱،۳	(۸۰و۸۰و۸۰)	(۳۵و۳۵و۲۵)	(۹/۴و۹/۴و۹/۴)	(۲۸و۲۸و۲۸)	(۶و۶و۶)		(۸۰و۸۰و۸۰)
C۲،۱	(۱۷۵۰و۱۷۵۰و۱۷۵۰)	(۱۱۰۰و۱۱۰۰و۱۱۰۰)	(۵۰۰۰و۵۰۰۰و۵۰۰۰)	(۱۴۸۸و۱۴۸۸و۱۴۸۸)	(۲۰۰۰و۲۰۰۰و۲۰۰۰)	(۱۱۰۰و۱۱۰۰و۱۱۰۰)	
C۲،۲	(۰/۳و۰/۳و۰/۳)	(۴/۵و۴/۵و۴/۵)	(۴و۴و۴)	(۱/۲و۱/۲و۱/۲)	(۰/۳و۰/۳و۰/۳)	(۰/۳و۰/۳و۰/۳)	
C۲،۳	(۵۰و۵۰و۵۰)	(۳۰و۳۰و۳۰)	(۲۰و۲۰و۲۰)	(۳۰و۳۰و۳۰)	(۳۰و۳۰و۳۰)		(۵۰و۵۰و۵۰)
C۳،۱	(۲۳و۲۳و۲۳)	(۳۲و۳۲و۳۲)	(۱۷۸و۱۷۸و۱۷۸)	(۱۳۲۵و۱۳۲۵و۱۳۲۵)	(۲۸۰و۲۸۰و۲۸۰)	(۲۳و۲۳و۲۳)	
C۳،۲	(۷۵۰و۷۵۰و۷۵۰)	(۱۰۰و۱۰۰و۱۰۰)	(۳۵و۳۵و۳۵)	(۵۰۰۰و۵۰۰۰و۵۰۰۰)	(۱۸و۱۸و۱۸)	(۱۸و۱۸و۱۸)	
C۳،۳	(۲۲۶۹۶و۲۲۶۹۶و۲۲۶۹۶)	(۱۷۶۵۲و۱۷۶۵۲و۱۷۶۵۲)	(۴۹۱۷۴و۴۹۱۷۴و۴۹۱۷۴)	(۵۸۰۰۰و۵۸۰۰۰و۵۸۰۰۰)	(۱۸۹۱۳و۱۸۹۱۳و۱۸۹۱۳)	(۱۷۶۵۲و۱۷۶۵۲و۱۷۶۵۲)	
C۴،۱	VP	MP	G	VG	VG		(۹و۱۰و۱۰)
C۴،۲	(۵و۵و۵)	(۱۱و۱۱و۱۱)	(۱۰و۱۰و۱۰)	(۷۲و۷۲و۷۲)	(۵۴و۵۴و۵۴)	(۷۲و۷۲و۷۲)	
C۴،۳	MP	VG	G	MP	MP		(۹و۱۰و۱۰)

جدول ۱۰. ماتریس تصمیم‌گیری فازی یکپارچه وزن‌دار

	A1	A2	A3	A4	A5
C1,1	(۰/۰۷و۰/۱و۰/۱۵)	(۰/۰۵و۰/۰۸و۰/۱۳)	(۰/۰۱و۰/۰۳و۰/۰۷)	(۰/۰۵و۰/۰۸و۰/۱۳)	(۰و۰/۰۳و۰/۰۵)
C1,2	(۰/۰۳و۰/۰۵و۰/۰۷)	(۰/۰۲و۰/۰۴و۰/۰۶)	(۰/۰۱/۰/۰۲و۰/۰۵)	(۰/۰۲و۰/۰۴و۰/۰۶)	(۰/۰۲و۰/۰۴و۰/۰۶)
C1,3	(۰/۱۳و۰/۱۳و۰/۱۳)	(۰/۰۵و۰/۰۵و۰/۰۵)	(۰/۰۱/۰/۱و۰/۰۱)	(۰/۰۴/۰۴و۰/۰۴)	(۰/۰۰۹و۰/۰۰۹و۰/۰۰۹)
C2,1	(۰/۱۱و۰/۱۱و۰/۱۱)	(۰/۱۸و۰/۱۸و۰/۱۸)	(۰/۰۴/۰۴و۰/۰۴)	(۰/۱۳و۰/۱۳و۰/۱۳)	(۰/۱و۰/۱و۰/۱)
C2,2	(۰/۱۲و۰/۱۲و۰/۱۲)	(۰/۰۰۸و۰/۰۰۸و۰/۰۰۸)	(۰/۰۰۹و۰/۰۰۹و۰/۰۰۹)	(۰/۰۲و۰/۰۳و۰/۰۳)	(۰/۱۲و۰/۱۲و۰/۱۲)
C2,3	(۰/۰۶۲و۰/۰۶۲و۰/۰۶۲)	(۰/۰۳۷و۰/۰۳۷و۰/۰۳۷)	(۰/۰۲۵و۰/۰۲۵و۰/۰۲۵)	(۰/۰۳۷و۰/۰۳۷و۰/۰۳۷)	(۰/۰۳۷و۰/۰۳۷و۰/۰۳۷)
C3,1	(۰/۰۶و۰/۰۶و۰/۰۶)	(۰/۰۴/۰۴و۰/۰۴)	(۰/۰۰۸و۰/۰۰۸و۰/۰۰۸)	(۰/۰۰۱و۰/۰۰۱و۰/۰۰۱)	(۰/۰۰۵و۰/۰۰۵و۰/۰۰۵)
C3,2	(۰/۰۰۰۸و۰/۰۰۰۸و۰/۰۰۰۸)	(۰/۰۰۶و۰/۰۰۶و۰/۰۰۶)	(۰/۰۱/۰/۱و۰/۰۱)	(۰/۰۰۰۱و۰/۰۰۰۱و۰/۰۰۰۱)	(۰/۰۳و۰/۰۳و۰/۰۳)
C3,3	(۰/۰۸و۰/۰۸و۰/۰۸)	(۰/۱و۰/۱و۰/۱)	(۰/۰۳و۰/۰۳و۰/۰۳)	(۰/۰۳و۰/۰۳و۰/۰۳)	(۰/۰۹و۰/۰۹و۰/۰۹)
C4,1	(۰و۰و۰/۰۰۶)	(۰/۰۰۶و۰/۰۱و۰/۰۳)	(۰/۰۴و۰/۰۵و۰/۰۶)	(۰/۰۵و۰/۰۶و۰/۰۶)	(۰/۰۵و۰/۰۶و۰/۰۶)
C4,2	(۰/۰۰۲و۰/۰۰۲و۰/۰۰۲)	(۰/۰۰۶و۰/۰۰۶و۰/۰۰۶)	(۰/۰۰۵و۰/۰۰۵و۰/۰۰۵)	(۰/۰۴و۰/۰۴و۰/۰۴)	(۰/۰۳و۰/۰۳و۰/۰۳)
C4,3	(۰/۰۰۲و۰/۰۰۶و۰/۰۱)	(۰/۰۱و۰/۰۲و۰/۰۲)	(۰/۰۱و۰/۰۱و۰/۰۲)	(۰/۰۰۲و۰/۰۰۶و۰/۰۱۱)	(۰/۰۰۲و۰/۰۰۶و۰/۰۱۱)

جدول ۱۱. جواب ایدئال مثبت و منفی فازی

معیار	FPIS	FNIS
C1,1	(۰/۱و۰/۱و۰/۰۷)	(۰/۰۷و۰/۰۳و۰/۰۱)
C1,2	(۰/۰۷و۰/۰۵و۰/۰۳)	(۰/۰۵و۰/۰۲و۰/۰۱)
C1,3	(۰/۱۳و۰/۱۳و۰/۱۳)	(۰/۰۰۹و۰/۰۰۹و۰/۰۰۹)
C2,1	(۰/۱۸و۰/۱۸و۰/۱۸)	(۰/۰۴و۰/۰۴و۰/۰۴)
C2,2	(۰/۱۲و۰/۱۲و۰/۱۲)	(۰/۰۰۸و۰/۰۰۸و۰/۰۰۸)
C2,3	(۰/۰۶و۰/۰۶و۰/۰۶)	(۰/۰۲و۰/۰۲و۰/۰۲)
C3,1	(۰/۰۶و۰/۰۶و۰/۰۶)	(۰/۰۰۱و۰/۰۰۱و۰/۰۰۱)
C3,2	(۰/۰۳و۰/۰۳و۰/۰۳)	(۰/۰۰۰۱و۰/۰۰۰۱و۰/۰۰۰۱)
C3,3	(۰/۱و۰/۱و۰/۱)	(۰/۰۳و۰/۰۳و۰/۰۳)
C4,1	(۰/۰۶و۰/۰۶و۰/۰۵)	(۰و۰و۰/۰۰۶)
C4,2	(۰/۰۴و۰/۰۴و۰/۰۴)	(۰/۰۰۲و۰/۰۰۲و۰/۰۰۲)
C4,3	(۰/۰۲و۰/۰۲و۰/۰۱)	(۰/۰۱و۰/۰۰۶و۰/۰۰۲)

جدول ۱۲. فاصله گزینه‌ها از جواب ایدئال مثبت و منفی

گزینه	فاصله گزینه‌ها از حل ایدئال	فاصله گزینه‌ها از حل ضدایدئال
S1	۰/۲۴۰	۰/۵۶۴
S2	۰/۳۷۳	۰/۴۳۵
S3	۰/۷	۰/۱۰۸
S4	۰/۴۷۴	۰/۳۳۲
S5	۰/۳۸۳	۰/۴۲۲

در گام بعد، شاخص نزدیکی گزینه Ai که با *CCi نشان داده می‌شود، با استفاده از رابطه (۱۴) محاسبه می‌شود.

$$CC_i^* = \frac{S_i^-}{S_i^- + S_i^+} \quad i = 1, 2, ..., m . \qquad (۱۴)$$

مرحله نهایی تکنیک تاپسیس فازی، رتبه‌بندی گزینه‌ها براساس ترتیب صعودی (*CCi) خواهد بود.

واضح است که $0 \le CC_i^* \le 1$ است. اگر $CC_i^* = 1$ باشد، گزینه Ai راه‌حل ایدئال

مثبت و درصورتی‌که $CC_i^* = 0$، گزینه Ai راه‌حل ایدئال منفی خواهد بود؛ لذا می‌توان رتبه‌بندی گزینه‌های مختلف را با توجه به میزان نزدیکی به راه‌حل ایدئال مثبت و دوری از راه‌حل ایدئال منفی انجام داد. جدول ۱۳ نتایج حاصل از محاسبه شاخص نزدیکی را برای نیروگاه‌ها نشان می‌دهد. براساس روش تاپسیس فازی، در این مرحله با توجه به مقدار شاخص نزدیکی، هر چه این عدد برای هر گزینه بالاتر باشد، آن گزینه رتبه بالاتری را به خود اختصاص می‌دهد. نتیجه رتبه‌بندی گزینه‌ها نیز در این جدول آمده است.

جدول۱۳. شاخص نزدیکی برای نیروگاه‌های با سوخت تجدیدپذیر در ایران با روش MDL-FTOPSIS

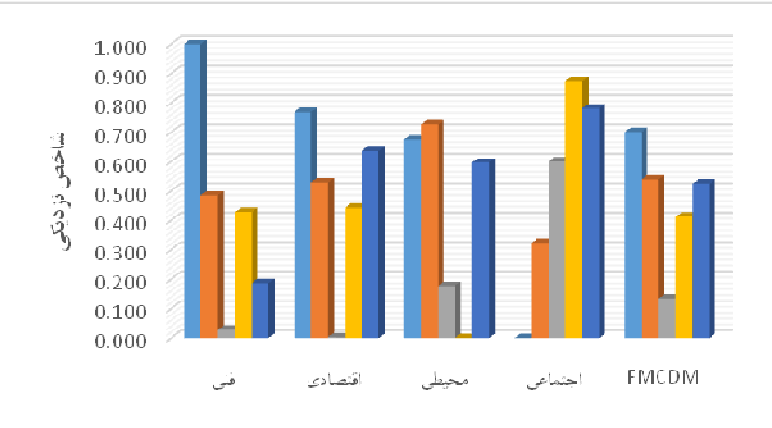
رتبه	مقدار شاخص نزدیکی	نیروگاه
۱	۰/۷۰۱	۱A
۲	۰/۵۳۸	۲A
۵	۰/۱۳۳	۳A
۴	۰/۴۱۲	۴A
۳	۰/۵۲۵	۵A

۴. تحلیل نتایج

یافته‌های تحقیق از دید چهار معیار اصلی بیانگر این مطلب است که معیار اقتصادی از اهمیت بیشتری نسبت به بقیه معیارها در احداث نیروگاه با سوخت پایان‌ناپذیر در ایران، برخوردار است. بررسی زیرمعیارها نشان می‌دهد که در احداث نیروگاه با سوخت تجدیدپذیر در این کشور، فاکتورهای میزان سرمایه‌گذاری، بهره‌وری، هزینه نگهداری و تعمیرات، قابلیت توسعه و میزان انتشار گاز CO2، به‌ترتیب دارای بیشترین اولویت هستند.

همچنین با بررسی نتایج حاصل از شاخص نزدیکی و رتبه‌بندی نیروگاه‌ها می‌توان در مورد این نتایج برای هر معیار به‌صورت جداگانه و به‌صورت یکپارچه بحث کرد. مطابق با یافته‌های مسئله، نیروگاه برق‌آبی، دارای بالاترین رتبه ازنظر سازگاری با همه اهداف توسعه پایدار به‌طور هم‌زمان داراست. سیاستگذاران انرژی در ایران می‌توانند برنامه‌ها و چشم‌اندازهای مصرف انرژی پاک و بهینه را براساس این رتبه‌بندی که در جدول ۱۲ ارائه شده است، بنا کنند.

نمودار ۲. رتبه‌بندی نیروگاه‌های با سوخت تجدیدپذیر در ایران از جنبه‌های مختلف توسعه پایدار



به‌منظور بررسی بیشتر و ارائه راهکارهای بهتر برای تصمیم‌گیران، این رتبه‌بندی‌ها ازمنظر هر یک از جنبه‌های پایداری نیز به‌طور جداگانه در این تحقیق مورد نظر قرار گرفت که در نمودار ۲ نشان داده شده‌اند. نیروگاه برق‌آبی بالاترین رتبه را از جنبه فنی را در کشور ایران داراست که دلیل آن میزان بازدهی بالاتر و قابلیت اطمینان بالای این نیروگاه نسبت به سایر گزینه‌هاست. همچنین نیروگاه فتوولتاییک از دیدگاه فنی و اقتصادی غیرمطلوب‌ترین گزینه است که دلیل این موضوع ناشی از عدم رسیدن به بلوغ کامل، بازدهی پایین و هزینه بالای سرمایه‌گذاری این فناوری باشد. از دید زیست‌محیطی زیست توده بدترین گزینه است زیرا بالاترین میزان انتشار آلایندگی را در بین این پنج گزینه دارد. ازمنظر اجتماعی نیروگاه برق‌آبی به‌دلیل ایمنی پایین برای مردم و خطر غرق شدن افراد در سدها و رودخانه‌ها و بالاتر بودن میزان مرگ‌ومیر ناشی از آن و نیز کمترین میزان اشتغال در میان نیروگاه‌های تجدیدپذیر بدترین گزینه است.

نتایج نشان می‌دهد کارشناسان اولویت بیشتر را به فناوری با ایمنی بالا، کم‌هزینه، کم‌خطر برای محیط زیست و اشتغال‌زا می‌دهند. همچنین فناوری تولید برق از انرژی‌های زمین‌گرمایی و برق‌آبی، بیشترین اولویت را با توجه به ظرفیت‌های کشور ایران برای جایگزینی سوخت‌های فسیلی، دارا هستند. استفاده از انرژی زمین‌گرمایی و برق‌آبی در مقیاس بزرگ می‌تواند

وابستگی به سوخت فسیلی در کشور را کاهش دهد و باعث افزایش امنیت انرژی، ایجاد فرصت‌های شغلی در روستاها، کاهش وابستگی به سوخت‌های فسیلی و همچنین نقش مهمی در غلبه بر کمبود انرژی برق در کشور ایفا کنند. روستاهای زیادی در ایران وجود دارد که بدون برق هستند و همه این گزینه‌های تکنولوژی می‌توانند برای تولید انرژی در این مناطق مورد استفاده قرار گیرند و با توجه به نزدیکی این مناطق به محل‌های قابل احداث نیروگاه‌های با سوخت تجدیدپذیر، می‌توان صرفه‌جویی زیادی در هزینه و مصرف انرژی و افت ولتاژ در توزیع برق انجام داد. ازاین‌رو گفتنی است یک فناوری جایگزین برای کل کشور مناسب نیست و در هر منطقه از کشور با توجه به ظرفیت جغرافیایی آن منطقه می‌توان از جایگزین دیگر بهره جست. به‌عنوان مثال در بخش‌های کویری ایران، انرژی خورشیدی منبعی قابل‌ملاحظه و بسیار بهینه برای تولید برق در این مناطق است و انرژی برق‌آبی بهره‌وری کمتری دارد؛ اما ترکیب مناسبی از این فناوری‌های جایگزین در کل کشور، سبب تنوع، فراوانی و خودکفایی در انرژی می‌شود و نیز در بلندمدت باعث توسعه پایدار انرژی می‌گردد. استفاده از این فناوری‌ها به‌طور قابل‌توجهی می‌تواند کشور را برای کمک به غلبه بر کمبود برق، بهبود استانداردهای زندگی جامعه، کمک به رشد اقتصادی کشور، بهبود اقتصاد روستایی، کاهش لایحه واردات بنزین و تضمین پایداری محیط زیست، یاری رساند.

۵. جمع‌بندی، نتیجه‌گیری و پیشنهاد

مهم‌ترین مسئله در مورد سوخت‌های فسیلی رایج، پایان‌پذیری و تجدیدناپذیری آنهاست. در کنار این مسئله، مصرف گسترده و کلان انرژی حاصل از سوخت‌های فسیلی باعث انتشار مواد آلاینده حاصل از احتراق و افزایش دی‌اکسیدکربن در جو و پیامدهایی از قبیل افزایش دمای زمین، تغییرات آب و هوایی، بالا آمدن سطح آب دریاها و در نهایت تشدید منازعات بین‌المللی شده است. ازسوی‌دیگر استفاده سوخت‌های پاک و تجدیدپذیر، شدت افزایش و انباشته شدن دی‌اکسیدکربن که موجب گرم شدن زمین می‌شود را کاهش می‌دهد و همچنین دارای تأثیرات مثبت اقتصادی، اجتماعی و فنی فراوانی در راستای اهداف توسعه پایدار انرژی است. ازاین‌رو مجموعه انرژی‌های تجدیدپذیر روز به روز سهم بیشتری را در سیستم تأمین

انرژی جهان به‌عهده می‌گیرد؛ بنابراین در برنامه‌ها و سیاست‌های بین‌المللی، نقش مهمی به منابع تجدیدپذیر انرژی محول شده است. ازسوی‌دیگر تنوع نیروگاه‌های تجدیدپذیر نیز زیاد است و انتخاب این نوع نیروگاه‌ها با توجه به شرایط اقلیمی هر کشور می‌تواند متفاوت باشد.

این مقاله به بررسی جنبه‌های اقتصادی، زیست‌محیطی، اجتماعی و فنی برای نیروگاه‌های تجدیدپذیر در کشور ایران می‌پردازد و یک ابزار تحلیلی برای پشتیبانی از تصمیم‌گیرندگان به‌منظور انتخاب بهترین گزینه برای این نیروگاه‌ها در یک مسئله تصمیم‌گیری چندمعیاره ارائه می‌دهد. در این راستا، مدلی جدید از ترکیب روش‌های MDL و FTOPSIS برای رتبه‌بندی گزینه‌ها با استفاده از زیرمعیارهای کیفی و کمی به‌طور هم‌زمان ارائه شده است. روش ارائه شده در این مقاله دارای سه مزیت است: ۱. کاهش میزان پیچیدگی و سردرگمی برای کارشناسان به‌منظور تعیین اوزان معیارها نسبت به روش‌های پرکاربرد مانند AHP می‌باشد. ۲. پوشش عدم قطعیت اطلاعات با استفاده از روش تاپسیس فازی است. ۳. مزیت نهایی این روش قابلیت کاربرد آن برای هر دو نوع شاخص کمی و کیفی است.

چهار معیار اصلی برای مسئله شناسایی شد که هر یک از این معیارها دارای سه زیرمعیار نیز هستند. این معیارها با مطالعه ادبیات موضوع و با نظر خبرگان تهیه شده‌اند. همچنین پنج نیروگاه تجدیدپذیر برای کشور ایران به‌عنوان گزینه‌های مسئله با مطالعه ادبیات موضوع شناسایی شد و مشخص گردید فناوری تولید برق از انرژی‌های برق‌آبی، بادی و زمین گرمایی، بیشترین اولویت را با توجه به ظرفیت‌های کشور ایران برای جایگزینی سوخت‌های فسیلی، دارا هستند.

ترکیب روش‌های دیگر تصمیم‌گیری چندمعیاره با تکنیک منطق دیجیتالی اصلاح شده می‌تواند به‌عنوان زمینه‌ای برای تحقیقات آتی در نظر گرفته شود. ارائه شاخص‌های جدید در انتخاب نیروگاه‌های تجدیدپذیر می‌تواند به‌عنوان زمینه‌ای دیگر برای تحقیقات آتی در نظر گرفته شود. استفاده از روش پیشنهادی در این تحقیق برای سایر مسائل تصمیم‌گیری در حوزه انرژی می‌تواند به‌عنوان حوزه دیگری از تحقیقات آتی در نظر گرفته شود.

منابع و مآخذ

۱. شعربافیان، نیلوفر (۱۳۸۷). «برآورد پتانسیل فنی و اقتصادی انرژی خورشیدی حرارتی در ایران: راهکاری برای توسعه پایدار انرژی خورشیدی»، *فصلنامه مطالعات اقتصاد انرژی*، دوره ۴، ش ۱۵.

2. Ahmad, S. and R. M. Tahar (2014). "Selection of Renewable Energy Sources for Sustainable Development of Electricity Generation System Using Analytic Hierarchy Process: A Case of Malaysia", *Renewable Energy*, *63*.

3. Bahrami, M. and P. Abbaszadeh (2013). "An Overview of Renewable Energies in Iran", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 24.

4. BP (British Petroleum Report) (2006). *Statistical Review of world Energy*.

5. Chatzimouratidis, A. I. and P. A. Pilavachi (2009). "Technological, Economic and Sustainability Evaluation of Power Plants Using the Analytic Hierarchy Process", *Energy Policy*, 37 (3).

6. Chen, S. and C. Hwang (1992). "Fuzzy Multiple Attribute Decision Making: Methods and Applications", *Springer Verlag Inc*.

7. Dehghan-Manshadi, B., H. Mahmudi, A. Abedian and R. Mahmudi (2007). "A Novel Method for Materials Selection and Mechanical Design: Combination of non-linear Normalization and a Modified Digital Logic Method", *Material and Design*, 28.

8. Dorini, G., Z. Kapelan and A. Azapagic (2010). "Managing Uncertainty in Multiple-criteria Decision Making Related to Sustainability Assessment", *Clean Technologies and Environmental Policy*, 13(1).

9. Evans, A., V. Strezov and T. J. Evans (2009). "Assessment of Sustainability Indicators for Renewable Energy Technologies", Renew, *Sustainable Energy Review*, 13 (5).

10. Gallego-Carrera, D. and A. Mack (2010). "Sustainability Assessment of Energy Technologies via Social Indicators: Results of a Survey Among European Energy Experts", *Energy Policy*, 38 (2).

11. Gujba, H., Y. Mulugetta and A. Azapagic (2011). "Power Generation Scenarios for Nigeria: an Environmental and Cost Assessment", *Energy Policy*, 39 (2).

12. Heinrich, G., L. Basson, B. Cohen, M. Howells and J. Petrie (2007). "Ranking and Selection of Power Expansion Alternatives for Multiple Objectives Under Uncertainty", *Energy* 32.

13. Hwang, C. L. and K. Yoon (1981). *Multiple Attribute Decision Making: Methods and Applications*, Springer-Verlag, New York.

14. IEA (International Energy Agency) (2012). *World Energy Outlook 2012*— Fact Sheets, Paris.

15. _____ (2011*). International Energy Outlook*.

16. IEA and OECD (2008). "Energy Technology Perspectives: Scenarios and Strategies to 2050", *International Energy Agency and Organization for*

Economic Co-operation and Development, Paris, France.

17. _____ (2010). World Energy Outlook, *International Energy Agency and organization for Economic Co-operation and Development*, Paris, France.
18. Jacobson, M. Z. (2009). "Review of Solutions to Global Warming, air Pollution, and Energy Security", *Energy and Environmental Science*, 2 (2).
19. Jeswani, H. K., A. Azapagic, P. Schepelmann and M. Ritthoff (2010). "Options for Broadening and Deepening the LCA Approaches", *Journal of Cleaner Production*, 18(2).
20. Kan, H., R. Chen and S. Tong (2012). "Ambient air Pollution, Climate Change and Population Health in China", *Environment International*, 42.
21. Kowalski, K., S. Stagl, R. Madlener and I. Omann (2009). "Sustainable Energy Futures: Methodological Challenges in Combining Scenarios and Participatory Multi-criteria Analysis", *European Journal of Operational Research*, 197(3).
22. Kralova, I. and J. Sjöblom (2010). "Biofuels–renewable Energy Sources: a Review", *Journal of Dispersion Science and Technology*, 31(3).
23. La Rovere, E. L., J. B. Soares, L. B. Oliveira and T. Lauria (2010). "Sustainable Expansion of Electricity Sector: Sustainability Indicators as an Instrument to Support Decision Making", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14(1).
24. Li, K., H. Bian, C. Liu, D. Zhang and Y. Yang (2015). "Comparison of Geothermal with Solar and Wind Power Generation Systems", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 42.
25. Maxim, A. (2014). "Sustainability Assessment of Electricity Generation Technologies Using Weighted Multi-criteria Decision Analysis", *Energy Policy*, 65.
26. May, J. R. and D. J. Brennan (2006). Sustainability Assessment of Australian Electricity Generation, *Process Safety and Environmental Protection*, 84(2).
27. Ness, B., E. Urbel-Piirsalu, S. Anderberg and L. Olsson (2007). Categorising Tools for Sustainability Assessment, *Ecological Economics*, 60 (3).
28. Onat, N. and H. Bayar (2010). "The Sustainability Indicators of Power Production Systems, Renew", *Sustainable Energy Review*, 14 (9).
29. Roth, S., S. Hirschberg, C. Bauer, P. Burgherr, R. Dones, T. Heck and W. Schenler (2009). "Sustainability of Electricity Supply Technology Portfolio", *Annals of Nuclear Energy*, 36(3).
30. Schenler, W., S. Hirschberg, P. Burgherr, M. Makowski and J. Granat (2009). "Final Report on Sustainability Assessment of Advanced Electricity Supply Options", New Energy Externalities Developments for Sustainability (NEEDS). Project no 502687, European Commission.
31. Şengül, Ü, M. Eren, S. E. Shiraz, V. Gezder and A. B. Şengül (2015). "Fuzzy TOPSIS Method for Ranking Renewable Energy Supply Systems in Turkey", *Renewable Energy*, *75*.

32. Stamford, L. and A. Azapagic (2012). "Life Cycle Sustainability Assessment of Electricity Options for the UK", *International Journal of Energy Research*, *36*(14).

33. UNDP (2000). World Energy Assessment 2000. *Energy and the Challenge of Sustainability*, New York. ISBN 9211261260.

34. UNEP and SETAC (2011). Towards a Life Cycle Sustainability Assessment, Making Informed Choices on Products.

35. Wang, J. J., Y. Y. Jing, C. F. Zhang and J. H. Zhao (2009). "Review on Multi-criteria Decision Analysis Aid in Sustainable Energy Decision-Making", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13(9).

36. WCED (World Commission on Environment and Development (1987). *Our Common Future*, Oxford University Press, Oxford.

37. Zangeneh, A., S. Jadid and A. Rahimi-Kian (2009). "A Hierarchical Decision Making Model for the Prioritization of Distributed Generation Technologies: A Case Study for Iran", *Energy Policy*, 37 (12).