DOR: 20.1001.1.24234931.1399.7.1.7.4

سال هفتم، شماره اول، تابستان ۱۳۹۹، ص ص ۵۷- ۶۴

**فصل‌نامه علمی – ترویجی انرژی‌های تجدیدپذیر و نو**

**jrenew.ir**

**مقاله**

تاریخ دریافت: ۹۷/۱۲/۱۴

تاریخ پذیرش: ۹۸/۰۶/۱۲

# مروری بر مسیر دستیابی به سیستم انرژی ۱۰۰٪ تجدیدپذیر تا سال ۲۰۵۰ – مطالعه موردی ایران و پاکستان

**مهشید گلستانه**

استادیار شیمی دانشگاه فرهنگیان، تهران، ایران

تهران، صندوق پستی ۱۹۳۹۶۱۴۴۶۴، m.golestaneh@cfu.ac.ir

**چکیده**

هدف از این مقاله مروری بررسی و مقایسه چگونگی انتقال سیستم انرژی دو کشور ایران و پاکستان به سمت یک سیستم انرژی ۱۰۰٪ تجدیدپذیر تا سال ۲۰۵۰ است. ایران و پاکستان در همسایگی هم قرار دارند و منبع عمده تامین انرژی در هر دو کشور، سوخت‌های فسیلی است. اما ایران عمده‌ترین منابع فسیلی را در اختیار دارد، در حالی که پاکستان وارد کننده سوخت‌های فسیلی است. بنابراین در این مقاله با مرور پژوهش‌های انجام شده بر روی طراحی یک مدل انرژی ۱۰۰٪ تجدیدپذیر برای ایران و پاکستان، سعی شده است تا مسیر انتقال انرژی در این دو کشور بررسی و مقایسه شود. برای شبیه‌سازی یک سیستم انرژی ۱۰۰٪ تجدیدپذیر از یک مدل تقریبی ساعت به ساعت از سال ۲۰۱۵ تا سال ۲۰۵۰ استفاده شده است که شامل بخش‌های تقاضای برق، شیرین کردن آب دریا و تولید گاز صنعتی سنتزی بدون انرژی است. براورد هزینه برق تولیدی نشان می‌دهد که منابع تجدیدپذیر بهترین کارایی و کمترین هزینه را در میان تمام گزینه‌ها برای دستیابی به یک سیستم انرژی با نشر گازهای گلخانه‌ای صفر دارا هستند. تجزیه و تحلیل‌ها نشان می‌دهد که انجام این انتقال از منظر فنی و اقتصادی شدنی است و دستیابی به آن در یک روش مقرون به صرفه امکان‌پذیر است.

**کلید واژگان**: انتقال انرژی، سیستم انرژی ۱۰۰٪ تجدیدپذیر، ایران، پاکستان

# A review on the path to achieving 100% Renewable Energy System by 2050 - Case Study of Iran and Pakistan

**Mahshid Golestaneh**

Department of Chemistry, Farhangian University, Tehran, Iran

P.O. Box 19396-14464, Tehran, Iran, m.golestaneh@cfu.ac.ir

Received: 5 March 2019 Accepted: 3 September 2019

**Abstract**

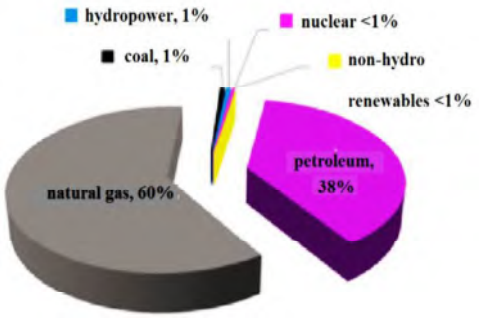
The main purpose of this review article is to review and compare how Iran's and Pakistan's energy systems will be transferred to a 100% renewable energy system by 2050. Iran and Pakistan are neighbors and the main source of energy in both countries is fossil fuels. But, Iran has major fossil resources, while Pakistan is an importer of fossil fuels. Therefore, in this article, by reviewing the literature on designing a 100% renewable energy model for Iran and Pakistan, has been attempted to compare the energy transfer paths in these two countries. To simulate a fully sustainable energy system, an approximate hour-by-hour model for both Iran and Pakistan has been used between 2015 and 2050, which includes demand for electricity, seawater desalination and non-energetic industrial gas sectors. The levelised cost of electricity estimating show that renewable resources have the best efficiency and lowest cost among all options for achieving an energy system with a zero-emission of greenhouse gas. The analysis demonstrates that it is possible to carry out this transition from a technical and economic perspective with some measures being vital for achieving this ambition in a cost-effective manner.

**Keywords**: Energy transition, 100% Renewable energy system, Iran, Pakistan

## ۱- مقدمه

امروزه انتقال به یک سیستم انرژی مبتنی بر ۱۰۰٪ انرژی تجدیدپذیر[۱] (RE) نه تنها امکان پذیر است، بلکه با بحران آب و هوایی فعلی و تقاضای رو به رشد انرژی، ضروری به نظر می‌رسد. صنعتی شدن، استفاده زیاد از سوخت‌های فسیلی و کودهای نیتروژنی، گازهای گلخانه‌ای بیشتری را به اتمسفر زمین وارد می‌کند. میزان گازهای گلخانه‌ای ۴۵۰ ppm تخمین زده می‌شود که به معنای افزایش جهانی دمای زمین به میزان ۲ درجه سانتی‌گراد است [۱]. با این حال، متغیر بودن منابع تجدیدپذیر (به ویژه انرژی خورشیدی و باد) و نگرانی در مورد قابل اطمینان بودن این منابع از یک سو و هزینه مورد نیاز یک سیستم انرژی که بخش بزرگی از انرژی آن از منابع تجدیدپذیر تامین می‌شود، از سوی دیگر، از بزرگ‌ترین چالش‌های پیش رو در مسیر این انتقال است. همین مساله منجر به ظهور تکنولوژی‌های ذخیره انرژی به عنوان یک فناوری کلیدی در مدیریت استفاده از سهم بزرگ‌تر انرژی تولیدی از منابع تجدیدپذیر گردیده است. بررسی سناریوهای ممکن انرژی تجدیدپذیر در ایران و پاکستان به دلیل ویژگی‌های منحصر به فرد این دو کشور بسیار چالش برانگیز و جالب است که در زیر به دلایل آن اشاره شده است:

– ایران رتبه ۴ ذخایر نفتی و رتبه دوم ذخایر گاز طبیعی دنیا را داراست [۲]. بنابراین سیستم انرژی آن کاملا به سوخت‌های فسیلی وابسته است. مصرف کل انرژی اولیه ایران[۲](TPEC) در سال ۲۰۱۳ برابر با ۲۸۳۸ TWhth[۳] بوده است [۳]. سهم TPEC از انواع سوخت‌ها در شکل ۱ ارائه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، ۹۸٪ از TPEC کشور از گاز طبیعی و نفت بدست می‌آید. این وابستگی بزرگ به سوخت‌های فسیلی به شدت زیرساخت‌های انرژی و زندگی اجتماعی و اقتصادی در ایران را تحت تأثیر قرار داده است.



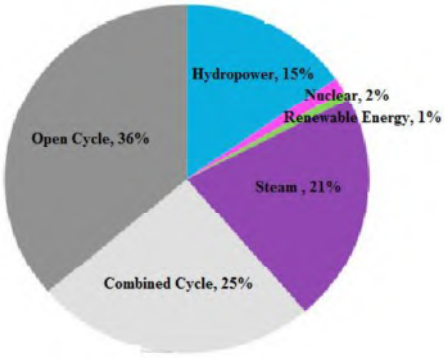

شکل ۱– سهم مصرف کل انرژی اولیه ایران با سوخت، ۲۰۱۳ [۳]

– مصرف کل انرژی ایران در سال ۲۰۱۴، معادل $TWh_{th}$ ۲۰۹۳ بوده است که در طول دهه گذشته بیش از ۶۰ درصد رشد داشته است. رشد سریع میزان مصرف انرژی موجب نگرانی در مورد توانایی کشور در برآوردن تقاضای انرژی در آینده شده است. اگر این روند هم‌چنان ادامه پیدا کند، ایران نه تنها درآمدهای نفت و گاز خود را از دست خواهد داد، بلکه در دهه‌های آتی به بزرگ‌ترین وارد کننده سوخت‌های فسیلی نیز تبدیل خواهد شد [۴].

– ایران با متوسط بارش سالانه کمتر از یک سوم میانگین جهانی جزو ۱۰ کشوری است که تحت تأثیر تنش‌های آبی قرار دارد [۵]. به همین دلیل شیرین‌سازی آب دریا با انرژی‌های تجدیدپذیر، می‌تواند یک رویکرد پایدار و مقرون به صرفه برای تامین تقاضای آب در آینده کشور باشد [۶].

– ایران بطور بالقوه یکی از بهترین مناطق برای استفاده از منابع RE مانند خورشید، باد، زمین گرمایی، جزر و مد و زیست توده است. میانگین سالانه بیش از ۲۸۰ روز آفتابی در بیش از ۹۰ درصد از مناطق ایران ثبت شده است که بطور متوسط ۱۷٪ بالاتر از میانگین جهانی است [۷]. اگر تنها ۱٪ بیابان‌های ایران با نیروگاه‌های خورشیدی تجهیز شوند، انرژی تولید شده ۱۲ برابر بیشتر از تولید سالانه برق کشور خواهد بود. این در حالی است که سهم انرژی خورشیدی در کل تولید برق کشور تنها کمتر از ۱٪ است.

– پتانسیل تکنیکی انرژی بادی در ایران بیش از ۱۴۰ گیگاوات است که تنها ۲۰ گیگاوات از این ظرفیت بطور اقتصادی در دسترس است. این در حالی است که ایران تنها ۱۵۱ مگاوات ظرفیت نصب شده بادی دارد. براساس چشم انداز "۲۰ ساله" ملی که در سال ۱۳۸۴ صادر شد، ایران باید سهم انرژی خورشیدی و انرژی بادی خود را در تولید برق کل کشور، به ۱۰ درصد افزایش دهد [۸]. ظرفیت و سهم نیروگاه‌های مختلف در ایران در شکل ۲ نشان داده شده است.

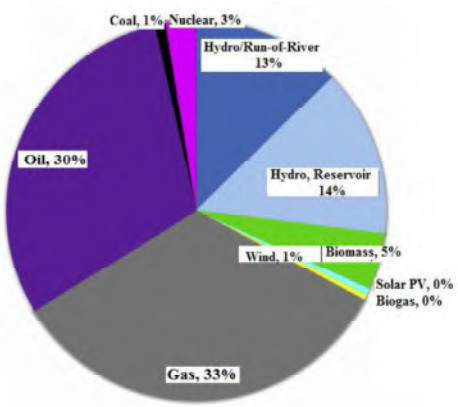



شکل ۲– ظرفیت انرژی نصب شده در ایران در سال ۲۰۱۵ [۹].

– در سوی دیگر پاکستان با بیش از ۱۹۰ میلیون نفر جمعیت در سال ۲۰۱۵، ششمین کشور پرجمعیت جهان است. مصرف برق پاکستان بین سال ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۵ به میزان ۴/۶ درصد رشد سالیانه داشته است [۱۰]. بخش عمده واردات (یعنی ~ ۸۸٪) نفت و محصولات نفتی است که سهم عمده آن برای تولید برق بکار می‌رود. از این رو هر تغییر قیمت نفت در بازار جهانی به شدت بر تولید انرژی پاکستان تأثیر می‌گذارد و امنیت انرژی کشور را تهدید می‌کند.

– در حال حاضر تولید و مصرف انرژی در پاکستان اساسا به سوخت‌های فسیلی وابسته است. کل ظرفیت نصب شده انرژی در پاکستان در سال ۲۰۱۴ در شکل ۳ نشان داده شده است. نفت و گاز ۶۳٪ (گاز ۳۳,۰٪ و نفت ۳۰,۰٪) از کل انرژی را تامین می‌کنند [۱۱]. با این حال، وابستگی بیشتر به گاز طبیعی به دلیل کاهش سریع ذخایر گاز کشور نمی‌تواند ادامه یابد. تخمین زده می‌شود که ۲۵ تا ۳۰ درصد از مجموع ذخایر گاز تا سال ۲۰۲۸-۲۰۲۷ باقی خواهد ماند [۱۰].

۱- Renewable energy
۲- Total primary energy consumption
۳-Tera watt hour heat




شکل ۳- ظرفیت انرژی نصب شده کل پاکستان در سال ۲۰۱۴ [۱۱].

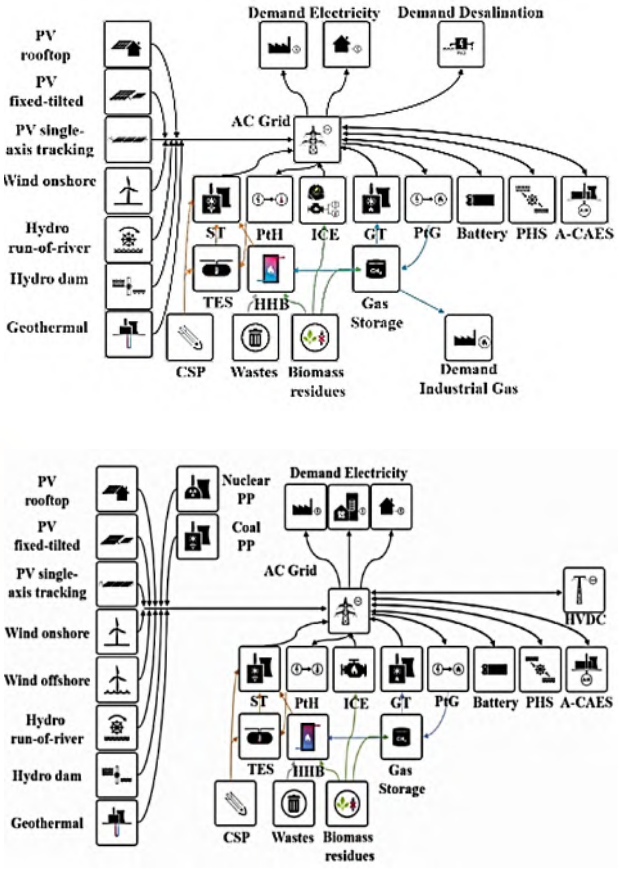
– ظرفیت نصب شده برق پاکستان ۲۵۰۰۰ مگاوات است و برای پاسخگویی به تقاضای برق موجود کافی نیست. تخمین زده می‌شود که میزان کمبود تقاضای برق حدود ۵۰۰۰ مگاوات باشد و انتظار می‌رود که این میزان تا سال ۲۰۲۰ به ۱۳۰۰۰ مگاوات برسد [۱۲]. یافته‌های اخیر بانک جهانی تاثیر کمبود برق بر جامعه و اقتصاد پاکستان را مورد تایید قرار داده است بطوری که ۶۶ درصد فعالیت‌های تجاری تحت تأثیر آن قرار می‌گیرند؛ یعنی اثر کمبود برق بر اقتصاد پاکستان از اثر تروریسم بیشتر است [۱۳].

– پتانسیل بالقوه تولید برق از منابع تجدیدپذیر مانند انرژی خورشیدی، باد، زیست توده، زمین گرمایی و جزر و مد در کشور در دسترس است. پتانسیل کل انرژی باد در مناطق ساحلی سند و بلوچستان حدود ۱۲۳ گیگاوات است [۱۴]. هم‌چنین پاکستان در کمربند خورشیدی قرار دارد و تعداد روزهای آفتابی با شدت زیاد در سراسر کشور زیاد است [۱۵].

با توجه به موارد ذکر شده در بالا و موقعیت خاص دو کشور ایران و پاکستان در این مقاله سعی شده است تا با مرور مقالات، مسیری برای انتقال به سمت یک سیستم انرژی کاملا پایدار برای دو کشور توصیف شود که منبع اصلی تامین انرژی برای هر دو، منابع فسیلی است. با توجه به مقالات، برای شبیه‌سازی سناریو ۱۰۰٪RE، یک مدل تقریبی ساعت به ساعت از سال ۲۰۱۵ تا سال ۲۰۵۰ در بازه‌های زمانی ۵ ساله انتخاب شده است، که شامل بخش‌های تقاضای برق، شیرین کردن آب دریا و تولید گاز صنعتی سنتزی بدون انرژی[1]است. براورد هزینه برق تولید شده[2](LCOE) نشان می‌دهد که گزینه‌های RE بهترین کارایی و کمترین هزینه را برای دستیابی به یک سیستم انرژی پایدار دارا هستند.

## ۱- بررسی مدل

مدل انتخاب شده برای انتقال سیستم انرژی ایران و پاکستان به یک سیستم ۱۰۰٪ RE با مدل سیستم انرژی LUT که در [۱۶] توصیف شده است، همخوانی دارد. مدل LUT، مدلی برای محاسبه هزینه‌های انرژی است که توسط دانشکده برق دانشگاه صنعتی لاپنرانتا-لاختی[3]در فنلاند توسعه یافته است و به مدل سیستم انرژی LUT مشهور است. این مدل یک مدل تفکیک ساعتی است و هدف اصلی آن این است که تولید انرژی و تقاضا را با حداقل هزینه برای هر ساعتی از سال هماهنگ کند. پیکربندی سیستم انرژی برای ایران و پاکستان در شکل ۴ ارائه شده است که متشکل از چندین فناوری و حالت‌های عملیاتی مختلف این فناوری‌هاست [۱۰ و ۹]. سه جزء اصلی مدل، فناوری‌های تبدیل انرژی به برق، منابع انرژی و اتصال بین بخش‌های مختلف انرژی است. این مدل بر اساس بهینه‌سازی خطی پارامترهای سیستم بر اساس مجموعه‌ای از محدودیت‌های کاربردی استوار است. برای رسیدن به یک سیستم انرژی کم هزینه، هدف اصلی بهینه‌سازی سیستم است تا هزینه کل سالانه فناوری‌های نصب شده، تولید انرژی و تغییرات انرژی را به حداقل برساند.




**شکل ۴- دیاگرام بلوک مدل سیستم انرژی LUT برای ایران (بالا) و پاکستان (پایین) [۹ و ۱۰]**

## ۲- پیش بینی‌های سناریو

در مقالات منتشر شده دو سناریو اصلی برای تجزیه و تحلیل سیستم انرژی ایران و پاکستان مورد مطالعه قرار گرفته است [۹ و ۱۰]:

– سناریو برق، که فقط تقاضای برق را پوشش می‌دهد. در مورد ایران رشد سالانه ۴٪ RE برای رسیدن به یک سیستم برق ۱۰۰٪ RE تا سال ۲۰۵۰ بررسی شده است.

– سناریو مجتمع، تلفیقی از سناریو برق بعلاوه شیرین کردن آب دریا و تولید گاز صنعتی بدون انرژی است. در این سناریو، علاوه بر گزینه

[1]-Non-energetic synthetic natural gas
[2]- Levelised cost of electricity
[3]- Lappeenranta-Lahti University of Technology

ذخیره‌سازی، تکنولوژی تبدیل انرژی به گاز[1](PtG) نیز برای پوشش تقاضای گاز صنعتی بدون انرژی مورد استفاده قرار می‌گیرد.

## ۳- نتایج و بحث

### ۴-۱- سناریو برق

مدل انرژی، کمترین هزینه تولید برق و ذخیره‌سازی آن را برای تمام مراحل سناریو محاسبه می‌کند. برآورد هزینه سناریو برق در مورد ایران یک حد رشد ۴٪ ظرفیت برق RE برای سناریوی برق و هم‌چنین سناریوی مجتمع را بهترین گزینه برای ایران گزارش کرده است [۹].

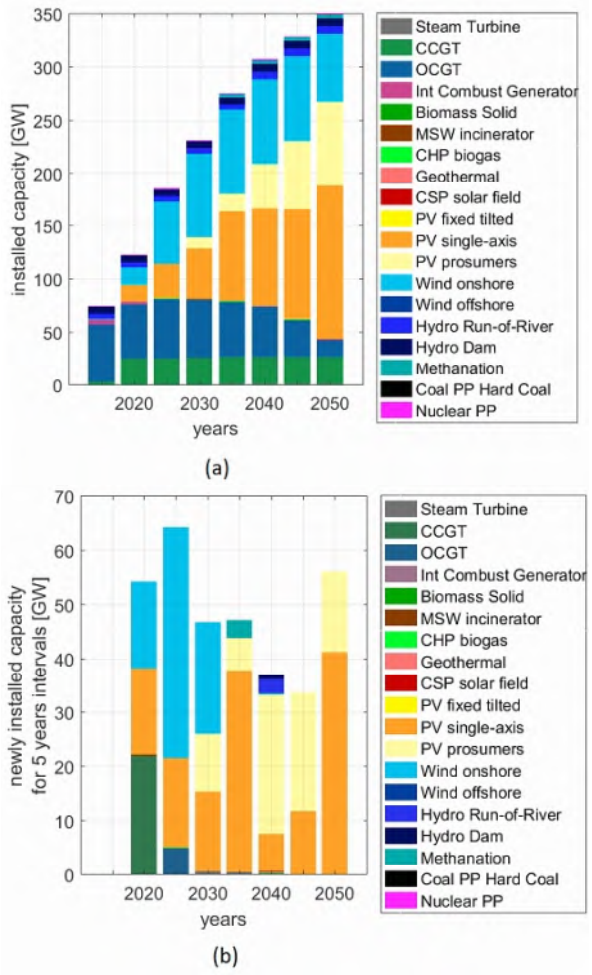
شکل ۵ (a) ظرفیت‌های نصب شده تمام فناوری‌های تولید برق که برای پوشش تقاضای برق بخش انرژی در ایران مورد نیاز است، را ارائه می‌دهد. پس از سال ۲۰۱۵ هیچ نیروگاه فسیلی مجاز به نصب نیست. با این حال، چون توربین‌های گازی را می‌توان از گازهای فسیلی به سوخت‌های گازی غیر فسیلی تغییر داد، مجاز به نصب هستند. استفاده از گازهای فسیلی پس از سال ۲۰۳۵ در سناریو برق و در سال ۲۰۴۰ در سناریوی مجتمع به صفر می‌رسد، زیرا استفاده از منابع RE از لحاظ مالی مؤثرتر خواهد شد. در سال ۲۰۱۵، توربین‌های گازی ۵۷ گیگاوات از مجموع ۷۵ گیگاوات ظرفیت برق را تولید می‌کنند. علاوه بر این، سهم نیروگاه‌های برقآبی (سد و رودخانه) و ژنراتورهای احتراق داخلی به ترتیب ۱۱،۵ و ۵/۷ گیگاوات از ظرفیت کلی برق برآورد شده است. در حالی که ظرفیت نیروگاه‌های برق آبی در طول دوره انتقال تقریبا ثابت باقی می‌ماند، استفاده از نیروگاه‌های نفتی به دلیل هزینه بالا تا سال ۲۰۳۵ (پس از گذراندن عمر فنی آن‌ها)، به پایان خواهد رسید. ظرفیت نصب شده در سال ۲۰۵۰ به ۳۴۳ گیگاوات خواهد رسید که PV خورشیدی با ۲۱۷ گیگاوات و انرژی باد با ۶۵ گیگاوات بیشترین سهم را دارند [۹].

شکل ۵ (b) ظرفیت نیروگاه‌های جدید را نشان می‌دهد، که در هر مرحله برای جایگزینی تولید برق فسیلی نصب می‌شود. همان‌طور که در شکل نشان داده شده است، توربین‌های گازی سیکل ترکیبی (CCGT) در سال ۲۰۲۰ بیش از سایر نیروگاه‌ها نصب می‌شوند و ظرفیت آن‌ها ۲۱ گیگاوات است. در سال ۲۰۲۵ انرژی باد در بیشتر ظرفیت‌های جدیدی که به سیستم انرژی افزوده شده، شرکت دارد و تا سال ۲۰۳۰ این رشد ادامه می‌یابد، اما نه به اندازه ۵ ساله قبل از آن. پس از آن، ظرفیت انرژی باد تقریبا ثابت می‌ماند و انرژی خورشیدی دارای بالاترین ظرفیت نصب شده پس از سال ۲۰۲۵ است که علت عمده هزینه پایین آن است. بنابراین، شکل ۵ نشان می‌دهد که PV خورشیدی در ظرفیت نصب شده بعد از ۲۰۳۰ نسبت به سایر منابع در سیستم بهینه هزینه، غالب است. در سال ۲۰۳۵ پس از حذف گاز طبیعی فسیلی برای پاسخگویی به تقاضای گازی سیستم برق از طریق SNG تولید گاز به روش methanation به سیستم اضافه می‌شود.

### ۴-۲- سناریوی مجتمع

برای دستیابی به میزان اضافی تقاضای برق مورد نیاز نیروگاه‌های آب شیرین کن و تولید گاز صنعتی بدون انرژی تا سال ۲۰۵۰ ظرفیت نصب شده PV خورشیدی تا ۴۷۲ گیگاوات و انرژی باد تا ۲۰ گیگاوات افزایش می‌یابد. ادغام بخش برق با بخش‌های نمک‌زدایی آب دریا و گاز صنعتی بدون انرژی تاثیر مثبتی بر کل LCOE دارد که در سال ۲۰۵۰ به میزان ۱۴ درصد کاهش می‌یابد [۹].

شکل ۶ LCOE را با تمام اجزای آن برای هر دو سناریو نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود LCOE در سناریوی مجتمع کمتر از سناریو برق است. علاوه بر این، برای هر دو سناریو، در طول انتقال بطور مداوم کاهشی در هزینه سوخت و LCOE مشاهده می‌شود. هزینه سوخت بخش عمده‌ای از LCOE در سال ۲۰۱۵ را تشکیل می‌دهد اما با گذشت زمان کاهش می‌یابد و در سال ۲۰۴۰ تقریبا از بین می‌رود [۹].



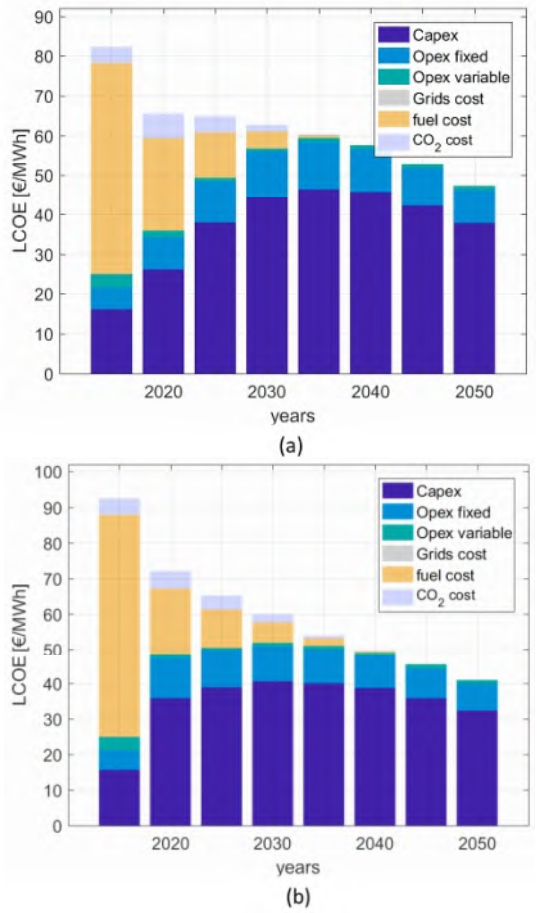

شکل ۵- ظرفیت نصب شده تمام فناوری‌های نیروگاه‌های برق ایران در مجموع ظرفیت نصب شده (a) و ظرفیت‌های نصب شده جدید در مراحل ۵ ساله (b)، مورد نیاز از ۲۰۱۵ تا ۲۰۵۰ [۹].

همانند ایران در کشور پاکستان نیز سیستم انرژی بطور عمده بر اساس سوخت‌های فسیلی است که باعث افزایش LCOE و سهم بالای انتشار گازهای گلخانه‌ای می‌شود (شکل ۷). در سال ۲۰۲۰ به دلیل کاهش سهم سوخت‌های فسیلی در تولید برق و جایگزینی آن با انرژی‌های تجدیدپذیر به ویژه انرژی خورشیدی، LCOE به میزان قابل توجهی کاهش می‌یابد. در سال ۲۰۲۵ برای هر دو سناریو، افزایش ناچیزی مشاهده شده است که علت آن سرمایه‌گذاری جدید در بخش انرژی‌های تجدیدپذیر و نیاز به نصب ظرفیت

[1] Power to gas

ذخیره‌سازی جهت ذخیره برق اضافی تولید شده توسط انرژی‌های تجدیدپذیر است [۹].

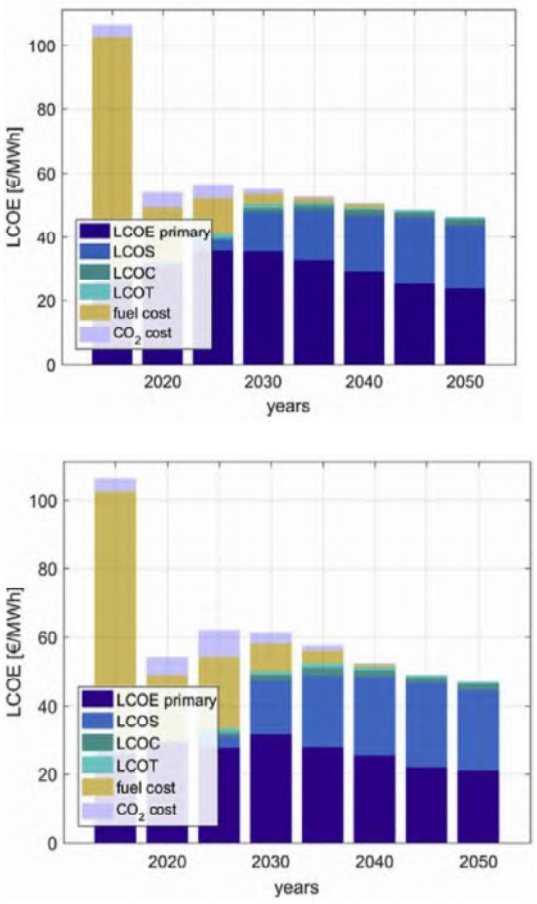
پس از سال ۲۰۲۵، به دلیل کاهش سهم سوخت‌های فسیلی، و نیز هزینه‌های مربوط به انتشار گازهای گلخانه‌ای و هزینه‌های سوخت، روند ثابت کاهش در LCOE تا سال ۲۰۵۰ مشاهده می‌شود. تجمیع بخش‌های آب شیرین کن و گاز صنعتی غیر انرژی نمی‌تواند تاثیر قابل توجهی در کاهش LCOE در مقایسه با سناریوی برق، داشته باشد که علت آن تقاضای زیاد ایجاد شده توسط بخش آب شیرین کن است.




شکل ۶– سهم اجزای مختلف در LCOE کل در سناریوی برق (a) و سناریوی مجتمع (b) از سال ۲۰۱۵ تا سال ۲۰۵۰ برای ایران [۹]

بعد از سال ۲۰۳۵، سهم SNG بطور قابل توجهی افزایش می‌یابد و تا سال ۲۰۴۵ تمام گاز صنعتی بدون انرژی در کشور توسط منابع RE ارائه خواهد شد. تا سال ۲۰۴۰ بخش عمده‌ای از سیستم انرژی برای گاز ورودی، گاز فسیلی است که بیشتر برای تولید برق در مراحل اولیه انتقال استفاده می‌شود. با این حال، از سال ۲۰۲۵ تا ۲۰۴۰ گاز فسیلی دیگر یک منبع ارزان قیمت برای تولید برق نیست و عمدتا به عنوان گاز صنعتی بدون انرژی مورد استفاده قرار می‌گیرد. پس از سال ۲۰۴۰، با حذف گازهای فسیلی از سیستم، تمام نیازهای گاز صنعتی بدون انرژی از طریق تکنولوژی تبدیل انرژی به گاز تامین می‌شود. بر اساس نتایج، هزینه گاز سنتزی در سال ۲۰۵۰، ۹۴/۵ €/ MWhth است. SNG می‌تواند نقش مهمی در سیستم انرژی آینده ایران ایفا کند چرا که زیرساخت‌های انرژی موجود در ایران بیشتر مبتنی بر گاز طبیعی است و به دلیل مسائل زیست محیطی، در آینده محدودیت‌های بیشتری بر روی هیدروکربن‌های فسیلی اعمال خواهد شد [۹].

نمک‌زدایی آب دریا به عنوان منبع تامین آب در ایران پس از سال ۲۰۳۰ نقش برجسته‌ای دارد و تقریبا ۷۰ درصد نیاز آب از طریق آب شیرین کن‌ها تامین می‌شود. هزینه تمام شده آب با منبع غیر فسیلی (LCOW) در سال ۲۰۵۰ برابر با ۰/۷۷ €/m است که کاملا مقرون به صرفه و قابل رقابت با هزینه تولید آب از کارخانه‌های آب شیرین کن اسمز معکوس که انرژی آن توسط سوخت‌های فسیلی تامین می‌شود، است که هزینه‌ای بین ۰/۶۰ €/m تا ۱/۹۰ €/m دارد.

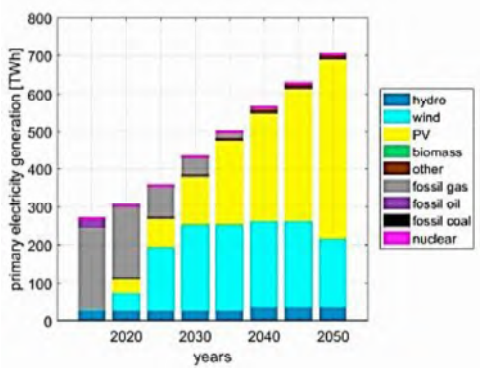



شکل ۷– سهم هزینه‌های تولید اولیه (LCOE اولیه)، ذخیره‌سازی (LCOS)، محدودیت (LCOC)، هزینه سوخت و هزینه انتشار کربن به کل LCOE ازسال ۲۰۱۵ تا ۲۰۵۰ در سناریو برق (بالا) و سناریو مجتمع (پایین) [۹]

### ۳-۴- سیستم‌های ذخیره‌سازی برای ایران و پاکستان

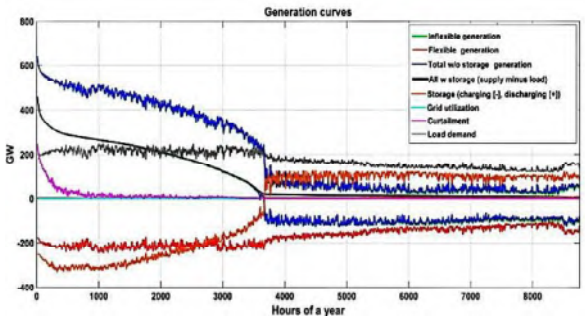
سیستم‌های ذخیره‌سازی پس از سال ۲۰۳۰ نقش کلیدی در سیستم انرژی ایفا می‌کنند. شکل ۸ سهم منابع مختلف ذخیره‌سازی مورد استفاده برای تولید برق در کل تولید برق را در ایران نشان می‌دهد. در سال ۲۰۵۰، زمانی که سیستم انرژی بطور کامل توسط منابع RE تامین می‌شود، نسبت

خروجی ذخیره‌سازی به تقاضای برق به ترتیب به ۳۲٪ و ۳۴٪ برای سناریوهای برق و مجتمع می‌رسد. از ۲۰۱۵ تا ۲۰۲۵، ظرفیت فعلی PHS برای تعادل سیستم کافی است. در سال ۲۰۳۰، ظرفیت باتری به سیستم اضافه می‌شود تا منبع توازن کوتاه مدت بین عرضه و تقاضا همراه با افزایش سهم RE در طول انتقال را فراهم کند. از سال ۲۰۳۵، ذخیره‌سازی گاز، با ظرفیت تقریبا ثابت، تقاضای ذخیره‌سازی فصلی را پوشش خواهد داد.




شکل ۸- سهم منابع مختلف برای تولید برق در سناریو برق در ایران [۹]

شکل ۹ نمای کلی منحنی تولید برق برای سناریو مجتمع را در ایران ارائه می‌دهد. همان‌طور که در شکل نشان داده شده است، برای ۳۶۰۰ ساعت در سال، تولید برق در سیستم بسیار بیشتر از تقاضای بار است و برق اضافی را برای استفاده از سیستم‌های ذخیره‌سازی مورد استفاده قرار می‌دهد. این ناشی از افزایش تابش خورشید در ایران در طول روز و سهم بالای PV در ترکیب انرژی است. از سوی دیگر، در ساعات دیگر سال، تولید برق در مقایسه با تقاضا بطور چشمگیری کاهش می‌یابد. در نتیجه، سیستم‌های ذخیره‌سازی برای تعادل کمبود عرضه مورد نیاز است.




شکل ۹- منحنی تولید برق برای تمام ۸۷۶۰ ساعت سال ۲۰۵۰ در سناریو مجتمع در ایران [۹]

افزایش تدریجی ظرفیت نصب شده در پاکستان برای دوره انتقال انرژی در شکل ۱۰ نشان داده شده است. ظرفیت کل نیروگاه‌ها در سال ۲۰۱۵ تحت تأثیر گاز و نفت فسیلی قرار دارد. با این حال، پس از سال ۲۰۱۵، انرژی‌های تجدیدپذیر، به ویژه انرژی خورشیدی، سهم بیشتری پیدا می‌کند و تولید برق عمدتا براساس تکنولوژی‌های PV است. در هر دو سناریو در دوره‌های تابش اندک خورشید از انرژی باد، آب و زیست توده جهت تامین انرژی استفاده می‌شود که راه حلی کم هزینه برای برآوردن تقاضای افزایش برق است (شکل ۱۱).

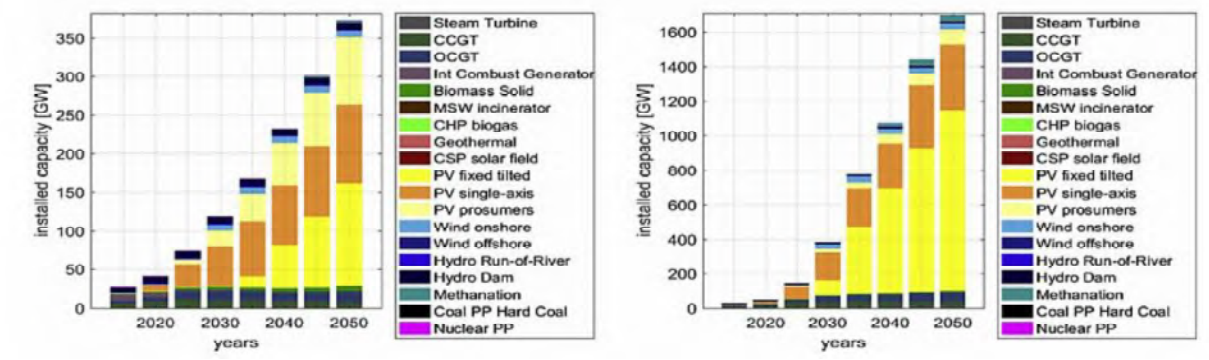
ظرفیت نصب شده بالاتر برای سناریوی مجتمع به دلیل تقاضای اضافی ناشی از گازهای صنعتی غیر انرژی و شیرین کردن آب دریا است. تقاضای اضافی بطور عمده توسط نصب نیروگاه‌های اضافی برق تامین می‌شود. در سال ۲۰۵۰، ۳۷۱ درصد بیشتر انرژی خورشیدی و ۳۷۰ درصد از ظرفیت باتری اضافی در سناریوی مجتمع در مقایسه با سناریوی برق نصب شده است. نیروگاه‌های PV خورشیدی به سرعت پس از ۲۰۲۰ توسعه می یابند و بعد از سال ۲۰۲۵ نیروی باد تولید می‌شود و تا سال ۲۰۵۰ تقریبا ثابت می‌ماند. انرژی‌های تجدیدپذیر به ویژه انرژی خورشیدی در طول سال‌ها با نرخ ثابت رشد می‌کنند.

چون هیچ ذخیره‌سازی PHS در پاکستان وجود ندارد، باتری برق را به صورت روزانه تامین می‌کند و ذخیره‌سازی گاز به عنوان گزینه‌ای برای ذخیره‌سازی درازمدت مورد استفاده قرار می‌گیرد. تا سال ۲۰۲۵، با توجه به افزایش نفوذ PV خورشیدی در سیستم، باتری‌های سیستمی و باتری‌های نصب شده توسط مشتریان باعث افزایش ذخیره انرژی خورشیدی می‌شود. باتری‌ها به سیستم، انعطاف‌پذیری مورد نیاز را ارائه می‌دهند و به عنوان گزینه‌ای ارزان‌تر از استفاده از نیروگاه‌های سوخت فسیلی برای تولید برق عمل می‌کنند. سهم فزاینده PV خورشیدی در شکل ۱۰ و ۱۱ به افزایش سهم خروجی باتری مربوط می‌شود.

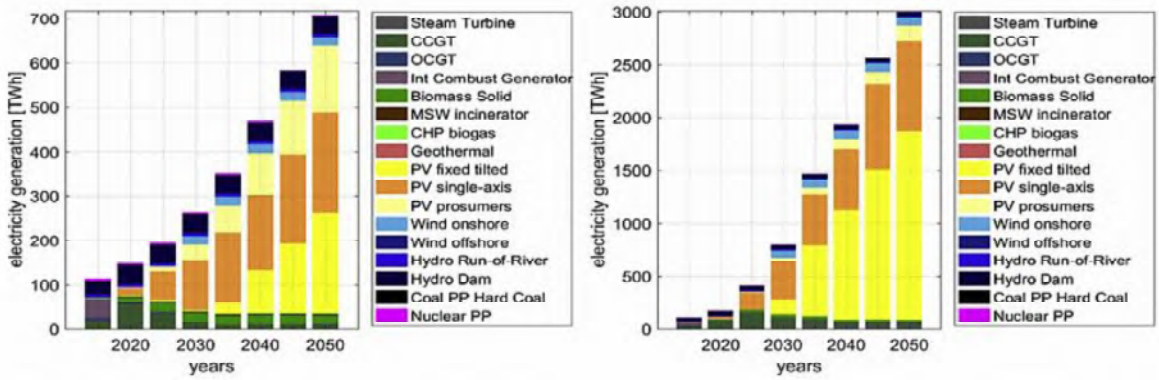
ذخیره‌سازی گاز از سال ۲۰۳۰ زمانی که سهم انرژی‌های تجدیدپذیر از ۸۰ درصد عبور می‌کند، مورد استفاده قرار می‌گیرد. با این حال ظرفیت زیاد ذخیره‌سازی گاز در سال ۲۰۴۵ و ۲۰۵۰ مشاهده می‌شود. ذخایر گاز حدود ۳ درصد از برق کل تقاضای برق را در سال ۲۰۵۰ برای یک سناریو برق و مجتمع فراهم می‌کند. ذخیره‌سازی گاز از سال ۲۰۴۰ به عنوان ذخیره فصلی مورد نیاز است و علت ظرفیت زیاد نصب شده در سال‌های ۲۰۴۵ و ۲۰۵۰ است.

### ۴-۴- بخش شیرین‌سازی آب دریا

در سال ۲۰۵۰ ، ظرفیت آب شیرین‌کن‌های نصب شده برابر با $۷/۸ \times ۱۰^{۸}$ مترمکعب در روز است در حالی که به $۱/۳ \times ۱۰^{۹}$ مترمکعب آب در روز نیاز است. تفاوت بین تقاضای کل آب و ظرفیت آب شیرین‌کن موجود توسط منابع آب تجدیدپذیر و منابع آب زیرزمینی غیر قابل تجدید تامین می‌شود. ظرفیت آب شیرین‌کن نصب شده پس از سال ۲۰۲۵ قابل توجه است و آمار نشان می‌دهد که نیاز آب شیرین کن برای پاکستان بسیار زیاد است.




شکل ۱۰- ظرفیت نصب شده تجمعی برای تمام فناوری‌های نسل آینده از سال ۲۰۱۵ تا سال ۲۰۵۰ برای سناریوی برق (چپ) و مجتمع (راست) در پاکستان




شکل ۱۱- کل تولید برق سالانه از تمام فناوری‌های ۲۰۱۵ تا ۲۰۵۰ برای سناریوی برق (چپ) و مجتمع (راست) در پاکستان [۱۰]

## ۴- نتیجه گیری

انتقال به سمت یک سیستم ۱۰۰٪ انرژی تجدیدپذیر ، هزینه کلی سیستم انرژی را کاهش می‌دهد، مصرف سوخت‌های فسیلی و انتشار گازهای گلخانه‌ای را کاهش داده و بر بحران کمبود آب غلبه می‌کند.

اگرچه ایران در حال حاضر دارای ذخایر بزرگ نفت و گاز فسیلی است، اما لازم است که انتقال به یک سیستم کاملا RE آغاز شود تا بتواند به تقاضای انرژی رو به رشد پاسخ دهد که طی دهه گذشته بیش از ۶۰ درصد افزایش یافته است. علاوه بر این، برای مقابله با بحران آب و هوایی، آلودگی هوا و خشکسالی‌های مکرر، ایران ناگزیر است این کار را انجام دهد. هم‌چنین ایران موافقتنامه پاریس COP21 را تصویب کرده و قول داده است تا انتشار گازهای گلخانه‌ای خود را تا سال ۲۰۳۰ به میزان ۴ تا ۱۲ درصد کاهش دهد. بنابراین یک راهبرد استراتژیک برای توسعه سیستم انرژی پایدار ضروری است. اگر چه موانعی مانند سوء مدیریت و یارانه‌های سوخت فسیلی وجود دارد که نمی‌تواند بطور کامل حذف شود، اما پتانسیل بسیار بالای انرژی‌های تجدیدپذیر در ایران می‌تواند بر این موانع برای ایجاد سیستم کاملا RE غلبه کند. سهم منابع تجدیدپذیر در کل تولید برق ایران صرف نظر از نیروی برقآبی ۰/۱ درصد است که با توجه به «چشم انداز ملی ۲۰ ساله» باید تا سال ۲۰۲۵، به ۱۰٪ و تولید کل برق RE باید تا سال ۲۰۲۵ به ۲۵ درصد برسد. یک سیستم برق مبتنی بر RE ٪ ۱۰۰ برای پاسخگویی به تقاضای برق ایران در سال ۲۰۵۰ به ترتیب نیاز به ۲۱۸ گیگاوات و ۶۹۰ گیگاوات برق انرژی PV خورشیدی و ۶۵ گیگابایت و ۸۵ گیگابایت انرژی باد برای سناریو برق و مجتمع دارد.

سیستم های ذخیره‌سازی بخش مهمی از سیستم RE ٪ ۱۰۰ هستند. بر اساس این مطالعه، در سال ۲۰۵۰ بخش برق ۱۰۰٪ در ایران نیاز به ۳۱۴۱ گیگاوات ساعت ذخیره‌سازی گاز و ۵۶۴ گیگابایت ساعت ظرفیت باتری دارد تا تقاضای برق کشور را تامین کند و تولید برق و تقاضا را برای هر ساعت سال متوازن نگه دارد.

پاکستان نیاز به تمرکز بر انرژی‌های تجدیدپذیر برای دستیابی به یک سیستم تامین برق امن، مقرون به صرفه و قابل اعتماد دارد. بهره برداری از منابع انرژی بومی باید گزینه سیاست واقعی برای افزایش امنیت انرژی کشور از طریق کاهش وابستگی به واردات انرژی باشد. PV خورشیدی تقریبا ۸۶٪ از کل تقاضای برق را فراهم می‌کند و توسط باد و بیوگاز در مناطق کمتر آفتابی تکمیل می‌شود. با وجودی که خروجی ذخیره‌سازی گاز نسبت به باتری بسیار پایین است، ذخیره‌سازی گاز در سال ۲۰۳۰ بسیار مهم است. نتایج نشان می‌دهد که RE قادر است نه تنها مشکل انرژی، بلکه بحران آب آشامیدنی را در کشور حل کند. با این حال، موانع متعددی برای توسعه انرژی تجدیدپذیر در کشور وجود دارد که باید مورد توجه قرار گیرد. رای استفاده از منابع تجدیدپذیر در دسترس جهت غلبه بر بحران فعلی انرژی، برنامه‌ریزی مناسب و پیاده‌سازی آن توسط دولت لازم است. نمونه‌هایی از برنامه‌های سرمایه گذاری نوآورانه که در سایز کشورها بطور موفقیت آمیز اجرا شده است را می‌توان با شرایط محلی سازگار کرد و بکار گرفت. تولید محلی سیستم‌های انرژی تجدیدپذیر می‌تواند هزینه‌های سرمایه گذاری و ایجاد اشتغال را برای مردم محلی کاهش دهد.

## ۶- مراجع


[1] H. Graßl, J. Kokott, M. Kulessa, J. Luther, F. Nuscheler, R. Sauerborn, *World in transition: towards sustainable energy systems. Germany: German Advisory Council on Global Change (WBGU)* 2004, Accessed 20 Febury 2019; https://www.wbgu.de/fileadmin/user_upload/wbgu.de/templates/dateien/veroeffentlichungen/hauptgutachten/jg2003/wbgu_jg2003_engl.pdf

[2] M. Yazdanpanah, N. Komendantova, R. Shafiei, Governance of energy transition in Iran: Investigating public acceptance and willin gness to use renewable energy sources through socio-psychological model. R*enewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 45, pp. 565–573, 2015.

[3] *Energy Information Administration. International energy data and analysis: Iran.* Accessed: 20-Febury 2019; https://www.eia.gov/beta/international/?fips=IR

[4] S. M. Sadegh Zade, The energy crisis and the opportunities ahead .*Energy Economics*, Vol. 120, 25–28, 2009.

[5] T. Luo, R. Young, P. Reig, *Aqueduct Projected Water Stress Country Rankings*, 2015. Accessed: 20-Febury 2019; www.wri.org/sites/default/files/aqueduct-water-stress-country-rankings-technical-note.pdf.

[6] S. Gorjian, B. Ghobadian, Solar desalination: A sustainable solution to water crisis in Iran. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* Vol. 48, pp. 571-584, 2015.

[7] C. Breyer, J. Schmid, Population Density and Area weighted Solar Irradiation: global Overview on Solar Resource Conditions for fixed tilted, 1-axis and 2-axes PV Systems, *The 25th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition / 5th World Conference on Photovoltaic Energy Conversion*, Valencia: 2010.

[8] S. K. Chaharsooghi, M. Rezaei, M. Lipour, Iran's energy scenarios on a 20-year vision, *International Journal of Environmental Science and Technology* Vol. 12, pp. 3701–3718, 2015.

[9] N. Ghorbani, A. Aghahosseini, C. Breyer, Transition towards a 100% Renewable Energy System and the Role of Storage Technologies: A Case Study of Iran, *Energy Procedia* Vol. 135, pp. 23–36. 2017.

[10] A. Sadiqa, A. Gulagi, C. Breyer, Energy transition roadmap towards 100% renewable energy and role of storage technologies for Pakistan by 2050, *Energy* Vol. 147, pp. 518-533, 2018.

[11] J. Farfan, C. Breyer, Structural changes of global power generation capacity towards sustainability and the risk of stranded investments supported by a sustainability indicato, *Journal of Cleaner Production*, Vol. 141, pp. 370-84, 2017.

[12] N. Jamal, *A renewable electricity supply system in Pakistan by 2050: assessment of generation capacity and transmission system requirements*, A Dissertation Presented, Europa-Universitat Flensburg, Flensburg, 2016.

[13] M.A. Uqaili, K. Harijan, M. Mirani, M. D. Memon, Renewable energy technologies for rural electrification in Pakistan: status and prospects, In: Proceedings of electric supply industry in transition: issues and prospects for Asia, *An international conference*, AIT, Thailand; p. 16, 2004.

[14] K. Harijan, M. A. Uqaili, Memon M, U. K. Mirza, Forecasting the diffusion of wind power in Pakistan, *Energy,* Vol. 36, pp. 6068-6073, 2011.

[15] M. Jabeen, M. Umar, M. Zahid, M.U. Rehaman, R. Batool, K. Zaman, Socio-economic prospects of solar technology utilization in Abbottabad, Pakistan. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* Vol. 39, pp. 1164-72, 2014.

[16] D. Bogdanov, C. Breyer, North-East Asian Super Grid for 100% renewable energy supply: Optimal mix of energy technologies for electricity, gas and heat supply options. *Energy Conversion and Management* ,Vol. 112, pp. 176-190, 2016.