



## آنالیز اقتصادی بهره‌گیری از پمپ‌های حرارتی زمین گرمایی در سال ۲۰۳۰ (مطالعه موردی: کشور ایران)

مریم پروین<sup>۱</sup>، حسین یوسفی<sup>۲\*</sup>، سهیل رومی<sup>۱</sup>

۱- کارشناسی ارشد، رشته مهندسی سیستم‌های انرژی، گروه انرژی‌های نو و محیط زیست، دانشکده علوم و فنون نوین، دانشگاه تهران

۲- دانشیار، گروه انرژی‌های نو و محیط زیست، دانشکده علوم و فنون نوین، دانشگاه تهران

\* صندوق پستی ۱۴۳۹۹۵۷۱۳۱، Hosseinyousefi@ut.ac.ir، تهران

### چکیده

بخش بزرگی از تقاضای جهانی انرژی جهت تامین انرژی سرمایش و گرمایش ساختمان‌ها استفاده می‌شود. برای جلوگیری از انتشار آلاینده‌های ناشی از استفاده از سوخت‌های فسیلی در بخش ساختمان، انرژی‌های تجدیدپذیر مورد توجه قرار گرفته‌اند. پمپ‌های حرارتی زمین گرمایی یکی از منابع تامین بار گرمایشی و سرمایشی در ساختمان‌ها هستند. در این مقاله ابتدا به بررسی میزان موردنیاز انرژی جهت سرمایش و گرمایش در سال ۲۰۳۰ پرداخته شده است سپس دو سناریو مختلف تامین تقاضای انرژی ساختمان را در سال ۲۰۳۰ بررسی می‌کند. در سناریو اول، انرژی مورد نیاز با توسط اسپیلت از برق تولید شده توسط نیروگاه‌های سوخت فسیلی تامین می‌شود. در سناریو دوم گرمایش و سرمایش ساختمان‌ها توسط پمپ‌های حرارتی زمین تامین می‌شود. در این مقاله با جایگزینی پمپ‌های حرارتی زمین گرمایی علاوه بر کاهش ۸۷۳۶/۷ میلیون متر مکعب گاز طبیعی و همچنین جلوگیری از انتشار ۵۹.۶ میلیون تن آلاینده در مقایسه با سناریو اول، کشور قادر به صادرات برق و گاز جمعاً به ارزش ۷۰۲۸ میلیون دلار می‌باشد که به طور کلی میزان ۴۹۹۹۴ میلیون دلار هزینه کشور در سناریو دوم نسبت به سناریو اول کاهش می‌یابد.

کلیدواژه‌گان: پمپ حرارتی، انرژی زمین گرمایی، گاز طبیعی، ایران

## Financial Analysis of Ground Source Heat Pump Utilization in 2030 (Case study: Iran)

Maryam Parvin<sup>1</sup>, Hossein Yousefi<sup>2,\*</sup>, Soheil Rumi<sup>1</sup>

1- M.Sc. Student, Faculty of New Science and Technologies, University of Tehran, Tehran, Iran

2- Associate Professor, Faculty of New Science and Technologies, University of Tehran, Tehran, Iran

\* P.O.B. 1439957131, Tehran, Iran, [Hosseinyousefi@ut.ac.ir](mailto:Hosseinyousefi@ut.ac.ir)

Received: 8 June 2019 Accepted: 26 August 2019

### Abstract

A great amount of global energy is consumed for building heating and cooling. Renewable energies are considered to prevent pollution made by fossil fuel in the building industry. Ground source heat pumps are known as a technology to supply heating and cooling demand in buildings. In this paper, the energy demand for residential cooling and heating is calculated in Iran in 2030. Then, two scenarios are discussed to supply the needed energy. In the first scenario, the energy is supplied by air source heat pumps (split units), and the second scenario considered ground source heat pumps. The result indicates that not only the second scenario can cause 8736.7 million cubic meters of natural gas and prevent 59.6 million tonnes of air pollutants, but also the country can export 7028 million \$ electricity to its neighbors. Also, the total cost for the country to supply the energy need is reduced by 49994 million dollars.



**Keywords:** Ground source heat pump, Electricity, Natural gas, Iran**۱- مقدمه**

عنوان منبع تامین گرما در زمستان استفاده می‌شود و یا در تابستان هوای گرم داخل ساختمان از طریق این پمپ به زمین منتقل شده و زمین به عنوان منبع گرمای دریا به کار می‌رود. [4-5].

اولین استفاده زمین به عنوان منبع گرما در پمپ های حرارتی در کشور سوئیس در سال ۱۹۱۲ صورت گرفت [۶]. سپس در امریکای شمالی و همچنین اروپا به محبوبیت رسید و فعالیت های گسترده بر روی سیستم های پمپ حرارتی زمین گرمایی در امریکای شمالی و اروپا در سال ۱۹۷۰ پس از اولین بحران نفتی آغاز شد [۷].

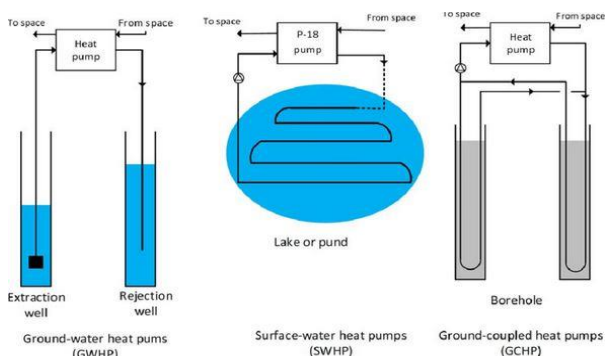
یوسفی و همکاران با مدل نمودن ساختمانهای درحال گرفتن پروانه ساخت در منطقه ۱۱ شهرتهران در سال ۲۰۱۴ به بررسی شرایط جایگزینی پمپ حرارتی به جای سیستم های معمول توسط دولت پرداخته اند با توجه به نتایج حاصل شده در صورت استفاده از پمپ های حرارتی زمین گرمایی سالانه از انتشار بیش از ۱۰۰۵۶۸ تن آلاینده جلوگیری می‌شود [8].

در این مقاله به بررسی تامین بار گرمایشی و سرمایشی به ۲ روش پرداخته می‌شود. در روش اول بار سرمایش و گرمایش توسط اسپیلت تامین می‌شود و در روش دوم این بار توسط پمپ‌های حرارتی زمین گرمایی تامین می‌گردد. هزینه ها و درآمدهای هر سناریو به تفکیک مورد بحث قرار گرفته و سناریوی برتر معرفی خواهد شد.

**۲- مواد و روش ها**

طبق استاندارد ASHRAE، سیستم پمپ های حرارتی به سه دسته تقسیم می‌شود (شکل ۲) [۹]:

- ۱- پمپ های حرارتی آب زیرزمینی (GWHP)
- ۲- پمپ های حرارتی آب سطحی (SWHP)
- ۳- پمپ های حرارتی متصل به زمین (GCHP)

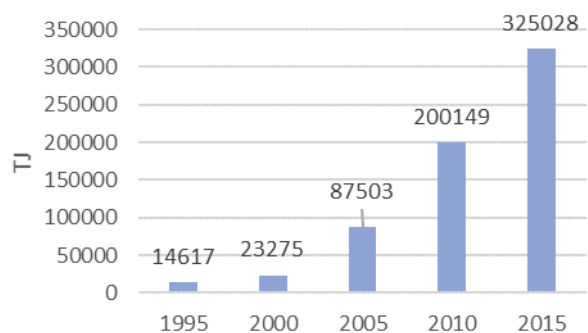


شکل ۲ انواع پمپ حرارتی

امروزه ذخایر متعارف منابع انرژی به دلیل رشد جمعیت و همچنین صنعتی شدن روش های برداشت، به میزان قابل توجهی کاهش یافته اند. طبق پیش بینی های انجام شده تخمین زده می شود که ذخایر منابع انرژی مانند نفت، زغال سنگ و گاز بیش از چند دهه وجود نخواهد داشت. این موضوع موجب توجه بیشتر به جایگزینی منابع فعلی انرژی با منابع دیگر مانند انرژی های تجدید پذیر می شود [1]. نحوه پاسخگویی به نیازهای مختلف انرژی همانند تامین انرژی الکتریکی و همچنین بار گرمایشی و سرمایشی هر کشور به وضعیت سیاسی فعلی آن کشور در جهان بسیار وابسته است. هر گونه اقدام حفاظت از محیط زیست با به کار بردن منابع انرژی تجدید پذیر به طور مستقیم ارتباط دارد. توسعه انرژی در اروپا با هدف استفاده پایدار از منابع انرژی تجدیدپذیر به منظور جایگزینی سوخت های فسیلی و کاهش انتشار گازهای آلاینده در جو زمین است [۲]. یکی از در دسترس ترین انرژی های تجدید پذیر، انرژی زمین گرمایی می‌باشد. حدود ۳۷٪ از کل انرژی زمین گرمایی در جهان برای گرمایش استفاده می‌شود. از این مقدار حدود ۷۵٪ برای گرمایش مرکزی ساختمان ها استفاده می‌شود، که موجب صرفه جویی ۴۴,۷۷۲ TJ انرژی در سال می‌شود [۳].

همچنین انرژی زمین گرمایی می‌تواند به عنوان منبع گرما در پمپ های حرارتی استفاده شود که این امر باعث صرفه جویی اقتصادی و کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای می‌گردد.

میزان انرژی تولیدی سالیانه توسط پمپ‌های حرارتی زمین گرمایی در جهان در بازه زمانی ۱۹۹۵-۲۰۱۵ در شکل ۱ نمایش داده شده است.



شکل ۱ میزان تولید انرژی توسط پمپ های حرارتی بین سال های ۱۹۹۵ تا ۲۰۱۵

سیستم های پمپ حرارتی زمین گرمایی به واسطه انرژی برق و با تبادل حرارت با زمین، گرمایش، سرمایش و تولید آب گرم خانگی را مهیا می‌سازند. در واقع از زمین به عنوان منبع گرما در زمستان و یا گرمای در تابستان بهره می‌شود. در این سیستم گرما توسط مبدل حرارتی زمینی سیال درون لوله به ساختمان منتقل شده و به



که این میزان معادل ۴۲۰۵۸ میلیون متر مکعب گاز طبیعی می‌باشد. در سناریو دوم تامین بار توسط هیت پمپ انجام می‌گردد. با در نظر گرفتن ضریب عملکرد میانگین هیت پمپ به میزان ۴/۹ میزان برق مصرفی توسط پمپ حرارتی زمین‌گرمایی برابر است با:

$$۱۳۳-۷ \times ۴.۹ = ۶۹۸۱۴۲.۵$$

سپس با در نظر گرفتن تلفات تلفات شبکه و متوسط راندمان نیروگاه‌ها همانند سناریو اول میزان کل توان مورد نیاز جهت تامین بار سرمایه‌ی و گرمایشی توسط هیت پمپ به میزان ۳۴۸۹۴۰.۶ میلیون کیلووات ساعت که معادل ۳۳۳۲۱ میلیون متر مکعب گاز طبیعی می‌باشد.

$$۱۳۳-۷ \times \frac{۱۰۰}{۸۴.۵} \times \frac{۱۰۰}{۴۱.۴} = ۳۴۸۹۴۰.۶$$

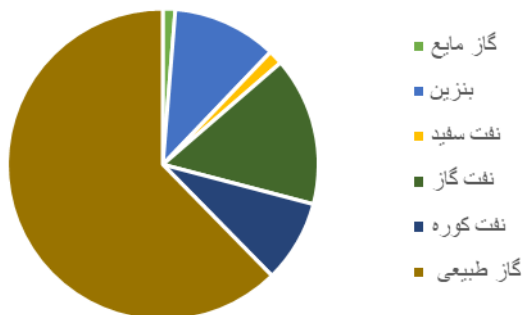
### ۳- نتایج

#### ۳-۱- تجزیه و تحلیل زیست محیطی

تولید گازهای آلاینده به خصوص کربن دی‌اکسید از عمده‌ترین مشکلات استفاده از سوخت‌های فسیلی است. شکل ۴ سهم سوخت‌های فسیلی در انتشار گاز کربن دی‌اکسید در سال ۹۴ را نشان می‌دهد.

با وجود پاک بودن گاز طبیعی نسبت به سایر سوخت‌های فسیلی، حدود ۶۱ درصد الودگی کشور ناشی از تولید کربن دی‌اکسید مربوط به گاز طبیعی می‌باشد [۱۱].

در جداول ۱ و ۲ هزینه انتشار ناشی از جلوگیری از انتشار گازهای آلاینده نشان داده شده است. مشاهده می‌شود هزینه ناشی از انتشار گازهای آلاینده در سناریو اول ۱۳۱۸/۲ میلیون دلار و در سناریو دوم ۱۰۴۳/۸ میلیون دلار می‌باشد.

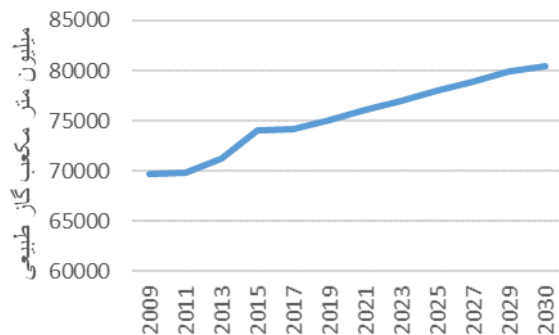


شکل ۴ سهم سوخت‌های فسیلی در انتشار کربن دی‌اکسید

#### ۳-۲- تجزیه و تحلیل اقتصادی

همان‌طور که مشاهده شد در سناریو اول میزان توان مورد نیاز برای تامین بار سرمایه‌ی و گرمایشی توسط اسپیلت برابر با ۴۴۰۶۷۲/۴۸ میلیون کیلووات ساعت می‌باشد. با در نظر گرفتن متوسط میانگین

ایران به دلیل دارا بودن منابع انرژی همچون نفت و گاز طبیعی و همچنین پایین بودن قیمت آن مصرف سوخت فسیلی بالایی دارد. در این میان بیشترین مصرف سوخت متعلق به گاز طبیعی می‌باشد که در بخش‌های مختلف مصرف می‌شود. ۵۶ درصد از گاز طبیعی مصرفی سال ۲۰۱۵ کشور در بخش خانگی، تجاری و عمومی مصرف می‌شود. با توجه به شکل ۳ پیش‌بینی‌ها نشان می‌دهد که میزان گاز طبیعی مصرفی در سال ۲۰۳۰ ایران ۸۰۴۰۲,۱۲ میلیون متر مکعب در این بخش خواهد رسید که میزان ۰,۷۱ درصد آن برای تامین بار سرمایه‌ی و گرمایشی مورد استفاده قرار می‌گیرد [۱۰-۱۱].



شکل ۳ پیش‌بینی میزان گاز مصرفی از ۲۰۰۹ تا ۲۰۳۰

با توجه به روند افزایش توان مورد نیاز جهت تامین بار سرمایه‌ی و گرمایشی در این مقاله به بررسی تامین بار گرمایشی و سرمایه‌ی به ۲ سناریو پرداخته می‌شود. در سناریو اول بار سرمایه‌ی و گرمایشی توسط اسپیلت تامین می‌شود و در سناریو دوم این بار توسط پمپ‌های حرارتی زمین‌گرمایی تامین می‌گردد. با توجه به روند افزایش توان مورد نیاز جهت تامین بار سرمایه‌ی و گرمایشی در طول ۱۰ سال گذشته میزان بار سرمایه‌ی و گرمایشی مورد نیاز در سال ۲۰۳۰، ۵۴۸۱۹۲/۵ میلیون کیلووات ساعت پیش‌بینی شده است.

در سناریو اول این بار توسط اسپیلت تامین می‌گردد با در نظر گرفتن مقدار ۳/۸۸ برای میانگین بازده سرمایه‌ی و گرمایشی (COP) اسپیلت، میزان برق مصرفی توسط این دستگاه برابر است با:

$$۵۹۸۱۴۲.۵ \times ۳.۸۸ = ۱۵۴۱۶۰.۴$$

با توجه به تلفات ۱۵/۵ درصدی شبکه‌ی انتقال و همچنین متوسط راندمان ۴۱/۴ کل نیروگاه‌های کشور (تراز نامه انرژی) میزان توان کلی مورد نیاز جهت تامین بار سرمایه‌ی و گرمایشی به صورت زیر می‌باشد:

$$۱۵۴۱۶۰.۴ \times \frac{۱۰۰}{۸۴.۵} \times \frac{۱۰۰}{۴۱.۴} = ۴۴۰۶۷۲.۴۸$$

می‌شود و علاوه بر آن کشور قادر به صادر کردن میزان ۶۷۹۸/۴ مگاوات برق به کشورهای همسایه می‌باشد.

در صورتی که در ساعات مورد بررسی توان اضافی به کشورهای همسایه صادر گردد و درآمد کشور به ازای صادرات هر کیلو وات ساعت برابر با ۱۰ سنت باشد، میزان درآمد کشور ناشی از صادرات برق در سال ۲۰۳۰ برابر می‌شود با:

$$\text{میلیون دلار } ۳۹۷۰.۲۶ = ۰.۱ \times ۳۹۷۰.۲۶$$

همچنین با توجه به این که در سناریو دوم به میزان ۹۱۷۳۱/۴ میلیون کیلو وات ساعت معادل ۸۷۳۶/۷ میلیون متر مکعب گاز طبیعی کمتر از سناریو اول مورد نیاز است. بنابراین در صورت صادرات گاز مازاد به کشورهای همسایه (به قیمت ۳۵ سنت به ازای هر متر مکعب) درآمد ایران در سال ۲۰۳۰ حاصل از صادرات گاز برابر خواهد بود با:

$$\text{میلیون دلار } ۳۰۵۷.۸ = ۰.۳۵ \times ۸۷۳۶.۷۸$$

هزینه نصب پمپ حرارتی زمین گرمایی به ازای هر تن تبرید به طور متوسط برابر با ۳۹۰۰ دلار می‌باشد بنابراین هزینه نصب پمپ های حرارتی برای کل کشور برابر است با:

$$\text{میلیون دلار } ۶۶۲۶۱ = ۱۶.۹۹ \times ۳۹۰۰$$

۱۶ ساعت نیاز کشور به تامین بار سرمایشی و گرمایشی به نیروگاه های با ظرفیت کلی ۷۶۵۰۵/۶۴ مگاوات نیاز است که معادل ۲۶۱۰۴۷ میلیون btu/h می‌باشد. با توجه به این که ظرفیت نیروگاه های موجود در سال ۲۰۱۵ به میزان ۶۶۵۴۸/۴ مگاوات می‌باشد، بنابراین به میزان ۹۹۶۷/۲۴ مگاوات ظرفیت نیروگاه جدید مورد نیاز است تا توان ۵۸۱۵۰/۳ میلیون کیلووات ساعت را تامین نماید.

با توجه به جدول ۳ میانگین هزینه تاسیس نیروگاه در ایران برابر ۶ سنت بر کیلو وات ساعت در نظر گرفته می‌شود. بنابراین هزینه کلی تاسیس نیروگاه برای تامین بار مورد نیاز برابر (۳۴۸۹ میلیون دلار) می‌باشد.

در سوی دیگر هزینه اسپیلت به ازای هر btu/h برابر ۰/۴۰۴ دلار می‌باشد. بنابراین هزینه کلی تامین دستگاه اسپیلت برای کل کشور برابر می‌شود با:

$$\text{میلیون دلار } ۱۰۵۴۶۳ = ۰.۴۰۴ \times ۲۶۱۰۴۷$$

بنابراین هزینه کلی کشور ناشی از تاسیس نیروگاه و عدم تولید الاینده و همچنین تامین دستگاه اسپیلت در سناریو اول برابر است با:

$$\text{میلیون دلار } ۱۱۰۲۷۰.۲ = ۳۴۸۹ + ۱۳۱۸.۲ + ۱۰۵۴۶۳$$

در سناریو دوم میزان توان مورد نیاز برای تامین بار مورد نظر توسط پمپ حرارتی زمین گرمایی ۳۴۸۹۴۰/۶ میلیون کیلووات ساعت می‌باشد. با در نظر گرفتن میانگین نیاز کشور به بار گرمایشی و سرمایشی به نیروگاه هایی با ظرفیت کلی ۵۹۷۵۰ مگاوات (۲۰۳۸۷۴/۷ میلیون btu/h) نیاز است که برابر با ۱۷ میلیون تن تبرید می‌باشد. با توجه به ظرفیت نیروگاه در حال حاضر کشور، برق مورد نیاز هیت پمپ جهت تامین بار با ظرفیت فعلی نیروگاه ها تامین

جدول ۱ میزان انتشار گاز های الاینده و هزینه های زیست محیطی در سناریو اول

میزان هزینه های زیست محیطی (میلیون دلار)	هزینه خارجی الاینده معادل تخریب زیست محیطی (\$/تن)	مقدار انتشار گاز های الاینده به واسطه استفاده از پمپ های حرارتی (میلیون تن)	شاخص انتشار گازهای آلاینده (گرم به ازای کیلو وات ساعت)	گاز الاینده
۸۱۴،۱۵	۲،۸۶	۲۸۴،۶۶۷۸	۶۴۵،۹۸۵	CO <sub>2</sub>
۵۱،۴۳	۱۲۲۸،۵۷	۰،۰۴۱۸۶۴	۰،۰۹۵	SPM
۱۴،۲۶	۵۳،۵۷	۰،۲۶۶۱۶۶	۰،۶۰۴	CO
۲۵۵،۷۵	۵۲۱،۴۳	۰،۴۹۰۴۶۸	۱،۱۱۳	SO <sub>2</sub>



۰.۳۷	۶۰	۰.۰۰۶۱۶۹	۰.۰۱۴	CH <sub>4</sub>
۱۸۲,۲۹	۱۷۱,۴۳	۱.۰۶۳۳۴۳	۲.۴۱۳	NO <sub>x</sub>
<hr/>				
۱۳۱۸,۲				

جدول ۲ میزان انتشار گاز های آلاینده و هزینه های زیست محیطی در سناریو دوم

میزان هزینه های زیست محیطی (میلیون دلار)	هزینه خارجی آلاینده معادل تخریب زیست محیطی (ت\$/تن)	مقدار انتشار گاز های آلاینده به واسطه استفاده از پمپ های حرارتی (میلیون تن)	شاخص انتشار گازهای آلاینده (گرم به ازای کیلو وات ساعت)	گاز آلاینده
۶۴۴,۶۷	۲,۸۶	۲۲۵,۴۱۰۴	۶۴۵,۹۸۵	CO <sub>2</sub>
۴۰,۷۲	۱۲۲۸,۵۷	۰,۰۳۳۱۴۹	۰,۰۹۵	SPM
۱۱,۲۹	۵۳,۵۷	۰,۲۱۰۷۶	۰,۶۰۴	CO
۲۰۲,۵۱	۵۲۱,۴۳	۰,۳۸۸۳۷۱	۱,۱۱۳	SO <sub>2</sub>
۰,۲۹	۶۰	۰,۰۰۴۸۸۵	۰,۰۱۴	CH <sub>4</sub>
۱۴۴,۳۴	۱۷۱,۴۳	۰,۸۴۱۹۹۴	۲,۴۱۳	NO <sub>x</sub>
<hr/>				
۱۰۴۳,۸				

ارزش ۷۰۲۸ میلیون دلار می‌باشد که به طور کلی میزان ۴۹۹۹۴/۲ میلیون دلار هزینه کشور در سناریو دوم نسبت به سناریو اول کاهش می‌یابد.

#### ۴- نتیجه گیری

از آن جا که کشور ایران پتانسیل مناسبی جهت استفاده از انرژی های تجدید پذیر همچون زمین گرمایی دارد، بنابراین می‌تواند مقدار قابل توجهی از بار مورد نظر از این طریق تامین گردد.

هدف این مقاله پیش بینی و مقایسه ۲ روش تامین بار سرمایشی و گرمایشی کشور ایران در سال ۲۰۳۰ می‌باشد. در سناریو اول این بار توسط اسپیلت تامین می‌گردد و در سناریو دوم، بار مورد نظر توسط پمپ حرارتی زمین گرمایی تامین می‌گردد.

جدول ۳ هزینه ساخت و نگهداری انواع نیروگاه ها

نوع نیروگاه	هزینه (سنت بر kwh)	هزینه تعمیر و نگهداری (سنت بر kwh)	هزینه سوخت	هزینه کلی
گازی	۱,۲	۰,۰۵	۵,۹	۷,۲
سیکل ترکیبی	۱,۱	۰,۱	۳,۵	۴,۷

با توجه به محاسبات انجام شده در این مقاله با جایگزینی پمپ های حرارتی زمین گرمایی علاوه بر کاهش ۸۷۳۶/۷ میلیون متر مکعب گاز طبیعی و همچنین جلوگیری از انتشار ۵۹/۶ میلیون تن آلاینده در مقایسه با سناریو اول، کشور قادر به صادرات برق و گاز جمعا به

#### ۵- مراجع

- [1] A. Allen, D. Milenic, P. Thomas Sikora, Shallow groundwater aquifers and the urban 'heat island' effect: a source of low enthalpy geothermal energy, *Geothermics Journal*, *Geothermics* Vol. 32, pp. 569-578, 2003.
- [2] D. Milenić, P. Vasiljević, A. Vranješ, Criteria for use of groundwater as renewable energy source in geothermal heat pump systems for building heating/cooling purposes, *Energy and Buildings*, Vol. 42, No. 5, pp. 649-657, 2010.
- [3] J.W. Lund, D.H. Freeston, T.L. Boyd, Direct application of geothermal energy: Worldwide review, *Geothermics*, Vol. 34, pp. 691-727, 2005.
- [4] I. Sarbu, C. Sebarchievici, Using Ground-Source Heat Pump Systems for Heating/Cooling of Buildings, *Advances in Geothermal Energy*, 2016. DOI: 10.5772/61372
- [5] G. Watzlaf, T. Ackman, Underground Mine Water for Heating and Cooling using Geothermal Heat Pump Systems. *Mine Water and the Environment*. Vol. 25, No. 1, pp. 1-14
- [6] DA. Ball, RD. Fischer, DL. Hodgett, Design methods for ground-source heat pumps. *ASHRAE Trans*, Vol. 89, No. 2B, pp. 416-40, 1983.
- [7] R. Bloomquist, Geothermal heat pumps: four plus decades of experience. *GHC Bulletin*, Vol. 20, No. 4, pp. 13-18, 1999.



[۸] ح. یوسفی، س. رومی، س. طبسی، م. حمله دار، آنالیز اقتصادی و زیست محیطی جایگزینی سیستم گرمایشی گاز طبیعی با پمپ زمین گرمایی در منطقه ۱۱ تهران. دو فصلنامه انرژی های تجدیدپذیر و نو، سال سوم، شماره اول، بهار ۱۳۹۵

[9] ASHRAE Handbook, HVAC Applications. Atlanta, USA: American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, 2015

[۱۰] ترازنامه انرژی سال ۱۳۹۵ ایران، دفتر برنامه ریزی و اقتصاد کلان برق و انرژی، ۱۳۹۷

