مروری بر جنبه‌های محیط‌زیستی نیروگاه‌های زمین‌گرمایی

امینه باقری[۱]، اشکان عبدالی سوسن[۲*]

۱- دانشجوی دکتری، مهندسی سیستم‌های انرژی، گروه مهندسی انرژی و اقتصاد، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات، تهران
۲- استادیار، مهندسی سیستم‌های انرژی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات، تهران

دریافت: تابستان ۹۹ پذیرش:تابستان ۹۹

چکیده

فناوری انرژی‌های نوین در کنار حسن‌هایی که دارند هر یک به نوبه خود با مشکلات و چالش هایی نیز همراه است. انرژی زمین‌گرمایی نیز به عنوان یکی از انرژی‌های تجدید پذیر و پاک، در کنار مزایای زیست‌محیطی، آسیب هایی نیز از قبیل انتشار گازهای گلخانه‌ای، آلودگی صوتی، آلودگی آب‌های سطحی و زیرزمینی، نشست های سطحی، زمین لغزش های القایی و ارتعاشات القایی برای محیط زندگی انسان فراهم می‌کند. دراین مقاله مروری مختصر بر برخی تأثیرات توسعه زمین‌گرمایی بروی هوا، آب و خاک انجام می‌شود. هرچند استفاده از این انرژی منجر به جلوگیری از مسائل مربوط به باران‌های اسیدی می‌شود و انتشار گازهای گلخانه ای و آلودگی‌های جوی را به نحو چشم‌گیری کاهش می‌دهد اما در شورآب های زمین‌گرمایی، در عملیات حفاری، نصب و راه اندازی و در خطوط لوله انتقال، موادی است که پتانسیل آسیب زدن به محیط‌زیست را دارد. در ادامه پس از بحث در مورد آسیب های زمین‌گرمایی بخشی از اقدامات نظارتی، قوانین برای کاهش اثرات زیست‌محیطی درمناطق مختلف را شرح می دهیم.

* **عهده‌دار مکاتبات:** A.abdali@srbiau.ac.ir

کلیدواژگان: تداخل آب های سطحی و زیرزمینی، آلودگی صوتی، زمین لغزش‌های القایی

A Review on Environmental aspects of geothermal energy

Amineh Bagheri[1], Ashkan abdali[2*]

1- Department of Natural Resources and Environment, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran
2- Department of Natural Resources and Environment, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran
* P.O.B.14515775 Tehran, Iran, A.abdali@srbiau.ac.ir

Abstract

New energy technologies, along with the benefits, are associated with challenges and Difficulties. Geothermal energy as one of the renewable energies is a clean and sustainable energy source, yet its development still has some impact on the environment such as: greenhouse gas emissions, noise pollution, surface and groundwater contamination, subsidence, and seismicity. This paper provides a brief description of some effects of geothermal development on the air, water and soil. Although, the use of this energy leads to the prevention of acid rain problems and dramatically reduces greenhouse gas emissions and atmospheric pollution, in geothermal brine, drilling operations, Installation and Laying of pipelines, contain materials which have the potential to damage the environment. In the following some of the measures to monitor and reduce environmental impacts in different regions are described. In addition to discussing the risks associated with the geothermal development, the paper describes some of the environmental monitoring and mitigation measures that have been maintained by European regulation.

Keywords: Air Emissions, Water Interference, Noise, Induced Seismicity

[DOR: 20.1001.1.20089813.1399.7.2.3.2]

۱- مقدمه

استفاده از انرژی زمین‌گرمایی برای تولید برق به‌عنوان یک صنعت جدید شناخته‌شده است. ایتالیایی‌ها برای اولین بار[۱] در سال ۱۹۰۴ در منطقه لاردرلو یک توربین ژنراتور را با استفاده از بخار طبیعی از زیرزمین طراحی کردند.[۲] در سال ۱۹۶۰ اولین عملیات موفقیت‌آمیز نیروگاه تولید برق در مقیاس بزرگ در آمریکای شمالی انجام شد. بسیاری از نیروگاه‌های انرژی زمین‌گرمایی در اطراف کالیفرنیا قرار دارند درحالی‌که بقیه نیروگاه در هاوایی، نوادا، اتاوا، ایدیهو و مونتانا قرار دارند. تبدیل انرژی زمین‌گرمایی به انرژی الکتریکی در نیروگاه انجام می‌شود. در نیروگاه‌ها با استفاده از بخارآب داغ ناشی از انرژی زمین‌گرمایی برای به چرخش درآوردن توربین‌ها و تولید برق استفاده می‌شود[۳].

از منابع زمین‌گرمایی در سه کاربرد کم‌عمق (فن‌آوری پمپ حرارتی)[۴] با عمق متوسط (دما بیشتر از ۹۰ درجه سانتی‌گراد)[۵] و چاه‌های با عمق زیاد (دما بیشتر از ۱۵۰ درجه سانتی‌گراد و حدوداً ۳ تا ۴ کیلومتر) استفاده می‌شود. [۶]لازم به ذکر است از اطلاعات این مراجع این نتیجه حاصل می‌شود که هر چه به‌طرف مرکز کره زمین نزدیک‌تر شویم دما افزایش می‌یابد به‌گونه‌ای که به‌طور طبیعی درازای هر ۱۰۰ متر افزایش عمق، تقریباً ۳ درجه سانتی‌گراد به دمای طبیعی زمین افزوده می‌شود. به‌طورکلی مناطقی از زمین که دارای سه ویژگی مهم زیر باشند می‌توانند دارای پتانسیل خوب جهت بهره‌برداری از انرژی زمین‌گرمایی باشند:۱- منبع حرارتی، ۲-سیال حد واسط ۳- محیط متخلخل.

۱- مواد مذاب یا سنگ‌های داغ مجاور آن‌ها (به‌عنوان منبع حرارتی) به‌گونه‌ای نزدیک به سطح زمین قرارگرفته باشند که موجب گرم شدن آب‌های نفوذی شده و درنتیجه با حفاری چاه‌های تولیدی می‌توان با استخراج سیال گرم به حرارت مطلوب رسید.

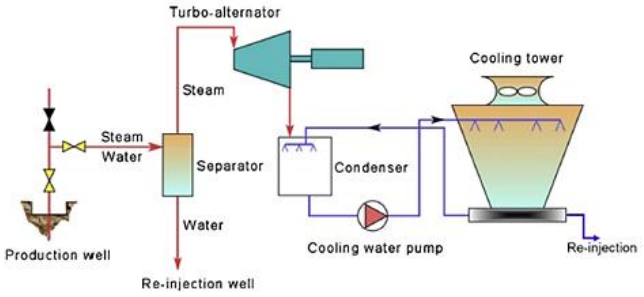
۲- وجود آب برای انتقال حرارت منبع حرارتی به سطح و زمین، آب‌های جوی، آب‌های ماگمایی و فسیل ازجمله سیالات انتقال‌دهنده حرارت در یک سیستم زمین‌گرمایی هستند.

۳- لایه‌های مختلف زمین دارای خلل و فرج‌های زیاد داخل باشند تا آب‌های سطحی و نزولات جوی به‌خوبی زمین نفوذ کند. آب‌های سطحی که براثر نیروی جاذبه زمین و از طریق خلل و فرج‌ها به داخل آن نفوذ می‌کنند پس از مدتی به لایه‌های گرم زمین نزدیک می‌شوند و حرارت آن‌ها را جذب می‌کنند براثر افزایش دما، چگالی خود را ازدست‌داده و نسبت به آب‌های سرد سبک‌تر شده و به‌صورت طبیعی از طریق خلل و فرج‌ها مجدداً رو به سطح زمین حرکت می‌کنند و موجب پیدایش مظاهر حرارتی از قبیل چشمه‌های آبگرم در نقاط مختلف زمین می‌شوند. در حالت طبیعی سیال گرم از خلال درزها، شکاف‌ها و گسل‌ها به سطح زمین می‌رسد و ظهورهای سطحی ایجاد می‌کند؛ اما برای بهره‌برداری اقتصادی از یک سیستم زمین‌گرمایی با حفاری چاه‌های متعدد سیال بیشتری استحصال می‌شود. بهره‌برداری از انرژی زمین‌گرمایی به دو روش کلی امکان‌پذیر است که عبارت‌اند از:

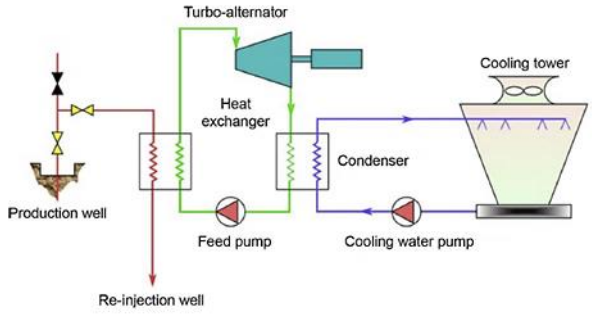
۱- استفاده غیرمستقیم یا نیروگاهی، نیروگاه زمین‌گرمایی با سیال دو فاز (بخار و مایع) و نیروگاه زمین‌گرمایی با سیال تک فاز (مایع)[۲].

۲- استفاده مستقیم یا غیر نیروگاهی (استخرهای آب گرم۳۲٪، مراکز گلخانه‌ای ۶٪، گرمایش منازل۱۰٪، حوضچه پرورش ماهی ۹٪، ذوب برف و پیشگیری از یخبندان معابر، پمپ حرارتی۴۲٪)[۷].

منابع زمین‌گرمایی امروزه به‌طور عمده برای تولید برق و تهویه مطبوع با استفاده از سیستم گرمایش مرکزی و سیستم‌های پمپ حرارتی زمین‌گرمایی استفاده می‌شود[۸]، ازجمله سیستم‌های گرمایش مرکز که عمدتاً در توسکانی واقع در مرکز ایتالیا هستند و استفاده مستقیم از آن‌ها معمول است ۱۰۵۰۰ تتراژول انرژی زمین‌گرمایی طریق استفاده مستقیم ۱۳۰۰ مگاوات گرما تولید می‌کند[۷]. همچنین انواع نیروگاه‌های زمین‌گرمایی به ترتیب زیر است: ۱. نیروگاه‌هایی که در آن سیال زمین‌گرمایی خارج‌شده از چاه‌های تولیدی مایع تک فاز با دمای پایین هستند و با انتقال حرارت سیال زمین‌گرمایی به سیال ثانویه می‌توان در دماهای کم سیال ثانویه را به بخار تبدیل و با عبور آن از توربین تولید برق نمود. ۲. نیروگاه‌هایی که سیال زمین‌گرمایی به‌صورت دو فاز مایع و بخار با دمای نسبتاً بالا از چاه‌های تولیدی خارج‌شده و سپس وارد یک جداکننده شده و بخار حاصل به سمت چاه‌های تزریقی و برج خنک‌کننده فرستاده می‌شود حال برحسب اینکه عمل جدایش آب از بخار در یک مرحله یا دو مرحله انجام می‌شود و برحسب وجود یا عدم وجود کندانسور به چند دسته تقسیم می‌شود. ۳. نیروگاه ترکیبی که از ترکیب دو نیروگاه به‌صورت سری و موازی تولید برق می‌کند. برای نمونه شکل ۱ و۲.



شکل ۱ شماتیک فنّاوری سیکل مستقیم[۲]



شکل ۲ شماتیک فنّاوری سیکل باینری[۲]

گرما به‌عنوان یکی از اشکال انرژی محسوب می‌شود انرژی زمین‌گرمایی در معنای تحت‌اللفظی خود شامل گرمای درونی زمین و نیروی مولّد طبیعی زمین خواهد بود، بعد از جنگ جهانی دوم توجه بیشتر کشورها معطوف به استفاده از انرژی زمین‌گرمایی شد نظر به آنکه این انرژی ازلحاظ اقتصادی به‌صرفه‌تر و قابل‌رقابت با دیگر اشکال انرژی مانند سوخت‌های فسیلی بود.[۹]

در اجلاس جهانی زمین‌گرمایی در سال ۱۹۹۲ هشدار داده شد که استفاده بی‌رویه از سوخت‌های فسیلی باعث صدمات جبران‌ناپذیری در محیط‌زیست می‌شود[۱۰] و برآورده شده است که به ازای هر کیلووات ساعت برق تولیدشده از سوخت زغال‌سنگ ۱.۲ گاز دی‌اکسید کربن ایجاد و به اتمسفر راه می‌یابد این مقدار گاز دی‌اکسید کربن با جایگزین کردن زغال‌سنگ توسط نفت به ۰.۹ توسط گاز طبیعی و ۰.۴ و توسط انرژی

[DOR: 20.1001.1.20089813.1399.7.2.3.2]

زمین‌گرمایی به ۰.۱۳ کیلوگرم تقلیل می‌یابد[۱۱]. همان‌طور که گفته شد پس از جنگ جهانی دوم توجه بسیاری از کشورها به انرژی را محدود با این پندار کرد که این نوع انرژی ازنظر اقتصادی قادر به رقابت با سایر حامل‌های انرژی است، این انرژی یک کالای وارداتی قلمداد نمی‌شد و در برخی موارد تنها منبع انرژی موجود در یک منطقه به‌حساب می‌آمد جدول ۱ و ۲ بیانگر این میزان است[۱].

۲- انرژی زمین گرمایی در ایران

رشد روز افزون جمعیت توسعه شهری و نیز اقتصاد انرژی در کشور ما تولید ۹۰ هزار بار در سال ۲۰۲۰ را اجتناب ناپذیر ساخته است است در حدود ۹۸ درصد ظرفیت تولید فعلی نیروگاه های برق کشور به کاربرد سوخت های فسیلی متکی است حال آنکه محدودیت منابع سوخت فسیلی رشد مصرف داخلی و نبود منابع کافی برای صادرات از یک سو موازین و معیارهای زیست محیطی و توسعه پایدار از سوی دیگر کاربرد انرژی های تجدیدپذیر در بستر تولید را اجتناب ناپذیر ساخته است

به رغم پتانسیل‌های بسیار مناسب به منظور کاربرد انرژی زمین گرمایی به دلیل نبود سیاست گذاری های کلان در زمینه به کارگیری انرژی تجدید پذیر و فقدان فناوری مناسب در خصوص حفاری عمیق مهندسی مخازن ساخت و بهره‌برداری از نیروگاه زمین گرمایی و بالاخره وجود رقیب سر سخت منابع ارزان سوخت های فسیلی بهره برداری از پتانسیل های مزبور کماکان جدی گرفته نشده است

کشور ما ایران از سال ۱۳۵۴ و به منظور شناسایی پتانسیل های منبع انرژی زمین گرمایی مطالعات گسترده‌ای توسط وزارت نیرو با همکاری مهندسین مشاور ایتالیایی انل گرین پاور در نواحی شمال و شمال غرب ایران در محدوده ای به وسعت ۲۶۰۰۰۰ کیلومتر مربع آغاز گردید نتیجه این تحقیقات مشخص نمود که مناطق سبلان دماوند خوی ماکو و سهند با مساحتی بالغ بر ۳۱ هزار کیلومتر مربع جهت انجام مطالعات تکمیلی و بهره برداری از انرژی زمین گرمایی مناسب می باشند در همین راستا برنامه اکتشاف مشتمل بر بررسی های زمین شناسی ژئوفیزیک ژئوشیمیایی برنامه‌ریزی شد در سال ۱۳۶۱ با پایان یافتن مطالعات اکتشاف مقدماتی در هر یک از مناطق ذکر شده نواحی مستعد با دقت بیشتری شناسایی شده و در نتیجه در منطقه سبلان: نواحی مشکین شهر سرعین و بوشلی در منطقه دماوند: ناحیه نونال در منطقه ماکو_خوی: نواحی سیاه چشمه و قطور و در منطقه سهند پنج ناحیه کوچکتر جهت تمرکز فعالیت های فاز اکتشاف تکمیلی انتخاب شدند

پس از یک وقفه نسبتاً طولانی و با هدف فعال نمودن مجدد طرح گزارش های موجود مجدداً در سال ۱۳۶۹ کارشناسان UNDPبازنگری شده منطقه زمین گرمایی مشکین شهر به عنوان اولین اولویت جهت ادامه مطالعات اکتشافی معرفی شد در اولویت اول به منظور ادامه مطالعات قبلی و تکمیل نمودن فاز اکتشاف در ناحیه مشکین شهر در سال ۱۳۷۴ کارشناسان معاونت امور انرژی وزارت نیرو با هدف نصب اولین نیروگاه زمین گرمایی در کشور برنامه فاز اکتشاف تکمیلی را تهیه و بخش مطالعات سطح الارضی شامل عملیات ژئوفیزیکی زمین شناسی و بررسی‌های ژئو شیمیایی و ماهواره‌ای آغاز گردید این مطالعات توسط مهندسین مشاور کینگستون موریسون از کشور نیوزلند و با مدیریت سازمان انرژی های نو ایران طی سال ۱۳۷۷ به انجام رسید که حاصل این مطالعات منجر به تخمین درجه حرارت احتمالی مخزن در حد ۲۴۰ درجه سانتیگراد و تعیین نقاط حفاری های اکتشافی در دامنه‌های شمالی سبلان مشرف به جنوب شهرستان مشکین شهر گردید.

در سال های اخیر سازمان انرژی های نو ایران با همکاری سازمان بهره وری انرژی ایران و تجهیز آزمایشگاه و ایستگاه پایش صحرایی مطالعات سیستماتیک و گسترده را جهت پایش محیط زیست منطقه و کنترل اثرات زیست محیطی منطقه و کنترل اثرات زیست محیطی ناشی از اجرای طرح انجام داد پس از پایان یافتن تست چاه ها اطلاعات مورد نیاز جهت انجام مدلسازی و مطالعات مهندسی مخزن و در نتیجه برآورد پتانسیل حرارتی مخزن زمین گرمایی در منطقه مشکین شهر فراهم شد و بعد از آن مطالعات امکان سنجی طرح ضمن ارائه طرح توسعه و بهره‌برداری از میدان زمین‌گرمایی سبلان ادامه یافت و نهایتاً نصب و راه اندازی فاز اول از اولین نیروگاه زمین گرمایی کشور در این منطقه با ظرفیت ۵ مگاوات در آینده نزدیک انجام و به بهره برداری می رسد.

جدول ۱ مجموع ظرفیت جهانی نیروگاه‌های زمین گرمایی نصب شده از سال ۱۹۹۵ تا پایان سال ۲۰۱۵ و پیش بینی کوتاه مدت برای هر قاره تا سال ۲۰۲۰[۱۲]

Continent	Installed in 1995	Energy in 1995	Installed in 2000	Energy in 2000	Installed in 2005	Energy in 2005	Installed in 2010	Energy in 2010	Installed in 2015	Energy in 2015	Forecasting for 2020
	MW	GWh	MW	GWh	MW	GWh	MW	GWh	MW	GWh	MW
EUROPE	722	3.881	1.019	5.864	1.124	7.209	1.643	11.371	2.133	14.821	3.385
AFRICA	45	366	52	397	136	1.088	209	1.440	601	2.858	1.601
AMERICA	3.800	21.303	3.390	23.342	3.911	25.717	4.565	26.803	5.089	26.353	8.305
ASIA	1.980	10.129	3.075	17.390	3.290	18.903	3.661	23.127	3.756	22.084	6.712
OCEANIA	286	2.353	437	2.269	441	2.792	818	4.506	1.056	7.433	1.440
TOTAL	6.832	38.032	7.973	49.261	8.903	55.709	10.897	67.246	12.635	73.549	21.443

[DOR: 20.1001.1.20089813.1399.7.2.3.2]

جدول ۲ ظرفیت نیروگاه‌های زمین گرمایی نصب شده در سال ۲۰۱۰و ۲۰۱۵ و پیش بینی کوتاه مدت برای کشورهایی که تا کنون از نیروگاه زمین گرمایی استفاده کرده اند در سال ۲۰۲۰[۱۲]

COUNTRY	Installed in 2010	Energy in 2010	Installed in 2015	Energy in 2015	Forecast for 2020	Increase since 2010			
	MWe	GWh	MWe	GWh	MWe	MWe	GWh	Capacity %	Energy %
ALGERIA					1				
ARGENTINA					30				
ARMENIA					25				
AUSTRALIA	0.1	0.5			20	1			
AUSTRIA	1.4	3.8			6				
BOLIVIA					40				
CANADA					20				
CHILE					150				
CHINA	24	150			100	3		12%	
COSTA RICA	166	1131			260	42	380	25%	34%
CZECH REPUBLIC					5				
DJIBUTI					50				
DOMINICA					10				
ECUADOR					40				
El SALVADOR	204	1,422	204	1,442	300		20		
ETHIOPIA	7.3	10	7.3	10	50				
FRANCE	16	95	16	115	40		20		21%
GERMANY	6.6	50	27	35	60	20	-15	280%	-30%
GREECE					40				
GUATEMALA	52	289	52	237	140				
HONDURAS					35				
HUNGARY					5				
ICELAND	575	4,597	665	5,245	1300	90	648	16%	14%
INDIA					10				
INDONESIA	1197	9,600	1,340	9,600	3500	143		12%	
IRAN					5				
ITALY	843	5,520	916	5,660	1000	74	140	9%	3%
JAPAN	536	3,064	519	2,687	570	-16	-377	-3%	-12%
KENYA	202	1,430	594	2,848	1500	392	1,418	194%	99%
LATVIA					5				
MEXICO	958	7,047	1,017	6,071	1400	59	-976	6%	-14%
MONTSERRAT					5				
NETHERLAND					5				
NEVIS					35				
NEW ZEALAND	762	4,055	1,005	7,000	1350	243	2,945	32%	73%
NICARAGUA	88	310	159	492	200	72	182	82%	59%
PAPUA-NEW GUINEA	56	450	50	432	70	-6	-18	-11%	-4%
PERU					40				
PHILIPPINES	1904	10,311	1,870	9,646	2500	-34	-665	-2%	-6%
POLAND					1				
PORTUGAL	29	175	29	196	60		21		12%
ROMANIA					5	0.1	0.4		
RUSSIA	82	441	82	441	190				
SLOVAKIA					5				
SPAIN					40				
SWITZERLAND					3				
TAIWAN			0.1		1	0.1			
THAILAND	0.3	2.0	0,3	1,2	1				
TURKEY	91	490	397	3127	600	306	2,637	336%	539%
UK					15				
USA	3098	16603	3450	16600	5600	352		11%	
TOTAL	**10,897**	**67,246**	**12,635**	**73,549**	**21443**				

[DOR: 20.1001.1.20089813.1399.7.2.3.2]

۳- تأثیرات محیط‌زیستی

بعدازاین معرفی مختصر از فناوری زمین‌گرمایی در ادامه مطالب به تأثیرات محیط‌زیستی آن می‌پردازیم. محیط‌زیست کره زمین در سال‌های ۱۹۶۰ میلادی نسبت به امروز بسیار سالم‌تر بود متأسفانه با پیشرفت سریع علوم و فنّاوری بشر توجهی به عواقب آلاینده‌های حاصل از پیشرفت صنایع به‌ویژه تولیدکننده‌های انرژی نکرده است. در این راستا می‌توان انرژی زمین‌گرمایی را نسبت به سایر انرژی‌ها کم آلاینده‌تر دانست.

توربین‌های که برای نیروگاه‌های زمین‌گرمایی ساخته می‌شوند باید از موادی که دارای مقاومت بالایی در برابر خوردگی و پوسیدگی هستند ساخت شود زیرا سولفید هیدروژن موجود در گازهای خروجی از زمین باعث خوردگی فولادهای معمولی می‌شود[۱۰].

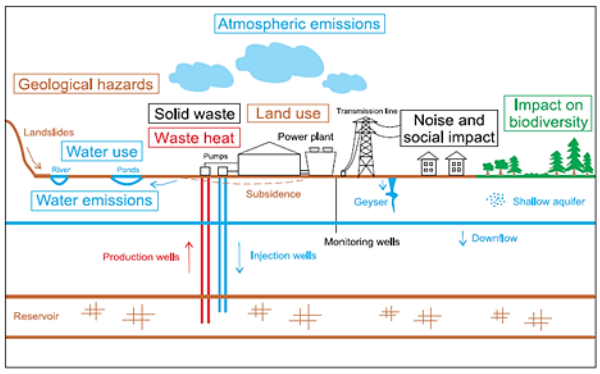
واحدهای نیروگاهی بر دو قسمت ۱. واحدهای نیروگاهی سر چاهی این واحدها در مجاورت یک یا چند واحد تولیدی راه‌اندازی شده معمولاً با آب داغ یا بخارآب خروجی از آن‌ها تغذیه می‌شوند این واحدها دارای ساختاری مودلار بوده و در مقیاس‌های معین ساخته می‌شود. ۲. نیروگاه‌های مرکزی شامل خطوط انتقال به‌هم‌پیوسته و طبیعی هستند که بخارآب را از مجموعه چاه‌های متعدد به واحد مرکزی منتقل می‌کند هر یک از این واحدها دارای مزایا و معایب خاص خود بوده که با توجه به میزان تقاضا عوامل محیطی و انتخاب می‌شود. انرژی زمین‌گرمایی امروزه یکی از تمیزترین انرژی‌های مورداستفاده در جهان است استفاده از این منبع انرژی با انتشار نسخه‌ی کم‌کربن اثرات سودمندی بر محیط‌زیست دارد. به حقیقت باید قبول کرد که تا به امروز انرژی شناخته‌نشده است که کاربرد مستقیم و غیرمستقیم آن به این میزان دارای آلودگی‌های زیست‌محیطی ناچیزی باشد. همان‌گونه که اشاره شد بهره‌برداری از انرژی زمین‌گرمایی نیز از آلودگی‌های زیست‌محیطی مبرا نیست ولی میزان این آلودگی‌ها نسبت به منابع انرژی دیگر بسیار ناچیز است.

میزان اثرات مخرب زیست‌محیطی تولید نیرو از انرژی زمین‌گرمایی وابسته به حجم و مقدار بهره‌برداری از سیال موجود در مخزن است و مقررات زیست‌محیطی بر اساس قوانین موجود در هر کشور مشخص می‌گردد. هدایت‌کنندگان نیروگاه‌های زمین‌گرمایی موظف به رعایت قوانین کشور خود است در برخی از کشورها دستورالعمل‌های زیست‌محیطی بسیار جدی مصوب شده است و تخفیفی برای سرمایه‌گذاران وجود ندارد.

سازمان‌های تولید انرژی قبل از هر اقدامی باید تغییرات زیست‌محیطی را به‌دقت موردنظر قرار دهند و قوانین مربوط به آن را به‌طور کامل رعایت نمایید به‌طوری‌که گفته شد در برخی کشورها بی‌توجهی به مسائل زیست‌محیطی موجب توقف کامل پروژه از سوی مسئولین شده است. در شکل ۳ برخی از انواع تأثیرات مستقیم ناشی از استفاده انرژی گرمایی نشان داده‌شده[۱۴]

نخستین اثر مشهود زیست‌محیطی واحدهای نیروگاهی یا غیر نیروگاهی زمین‌گرمایی ناشی از عملیات حفاری است و اساساً به‌محض اتمام عملیات حفاری تبعات مخرب زیست‌محیطی آن نیز به پایان می‌رسد مرحله بعدی یعنی نصب و راه‌اندازی خطوط لوله‌ای است که کار انتقال سیالات زمین‌گرمایی را به عهده خواهند داشت و ساخت واحدهای بهره‌برداری نیز بر حیات حیوانات و گیاهان و شکل ظاهری منطقه تأثیر خواهد گذاشت[۱۵] مسائل زیست‌محیطی در حین فعالیت واحد بهره‌برداری نیز به وجود می‌آیند سیالات زمین‌گرمایی معمولاً حاوی گازهای نظیر دی‌اکسید کربن سولفید هیدروژن، متان و مواد محلول است که باعث آلودگی محیط‌زیست می‌شوند.

آلودگی هوا به هنگام تولید برق در نیروگاه‌های متداول می‌تواند به‌عنوان یک معضل محیط‌زیستی عمده قلمداد شود، سولفید هیدروژن یکی از آلاینده‌های اصلی است بااین‌حال می‌توان با استفاده از فرایندهای گوناگون میزان انتشار این گاز را به حداقل رساند واحدهای نیروگاهی سیکل دو سیاله و همچنین واحدهای گرمایش منطقه‌ای نیز ممکن است باعث ایجاد معضلات کوچک شوند که با استفاده از سیستم‌های حلقه بسته که مانع از انتشار گازها می‌شوند می‌توان آن‌ها را برطرف نمود.



شکل ۳ چرخه زندگی تأثیرات مستقیم زیست‌محیطی تولید انرژی زمین‌گرمایی

پساب‌های خروجی نیز یکی از منابع پتانسیل آلودگی شیمیایی قلمداد می‌شوند استخراج مقادیر فراوانی از سیالات زمین‌گرمایی از منابع آبی زیرزمینی می‌تواند باعث وقوع پدیده نشست یا به عبارتی فرونشست تدریجی سطح زمین شود. آلودگی صوتی ناشی از فعالیت واحدهای زمین‌گرمایی را می‌توان در مواردی که واحد به تولید انرژی می‌پردازد هم به یک معضل زیست‌محیطی قلمداد نمود.

در هر پروژه زمین‌گرمایی حفاری‌های اکتشافی و توسعه‌ای از قبیل حفر چاه‌های کم‌عمق برای اندازه‌گیری شیب حرارتی و یا حفاری چاه‌های عمیق موجب اندکی آلودگی در محیط می‌گردد. نصب و برقراری دکل‌های حفاری و دسترسی به آن‌ها مستلزم تسطیح راه ساخت‌های سکوهای حفاری، انبار، محل سکونت کارکنان و غیره است و لازم است تسطیح راه‌ها جهت حمل تجهیزات سنگین با تریلرهای بزرگ را در نظر گرفت جهت نصب دکل‌های متحرک مستقر بر روی تراک‌های کوچک که قادر به حفاری چاه‌های ۳۰۰ تا ۷۰۰ متری است محلی در حدود ۳۰۰ تا ۵۰۰ مترمربع زمین موردنیاز است. برای حفاری‌های عمیق بالاتر از ۲ هزار متر نیاز به محلی با مساحت ۱۲۰۰ تا ۱۵۰۰ مترمربع است.

در عملیات تسطیح آماده‌سازی محل اصلاح پستی بلندی‌های توجه به حفظ طبیعت موجود در صنعت گیاهان و جانوران موجود الزامی است، در مواردی که حفاری چاه مواجه با سفرهای آبی شود، لازم است در آن لایه لوله جداری گذاشته شود تا از نفوذ مواد گل حفاری به آب‌های زیرزمینی جلوگیری شود و در صورت فوران چاه زمین‌گرمایی آلودگی آب‌های سطحی و زیرزمینی دور از انتظار نیست، لذا نصب فوران گیر در حفاری‌های زمین‌گرمایی الزامی است. در طول زمان حفاری و زمان آزمایش ممکن است گازهای ناخوشایند و بد بو به هوا پخش گردد که لازم است اقدامات لازم در خصوص کاهش میزان این گازها صورت گیرد مواد گل حفاری ترکیبی از بنتونیت و سایر مواد افزودنی زیان به برای محیط‌زیست می‌باشند و لذا پس از اتمام کار باید گل حفاری از سیال جداسازی شده و دوباره به مصرف برسد اما

[DOR: 20.1001.1.20089813.1399.7.2.3.2]

مواد جامد گل حفاری و خرده‌سنگ‌های خارج‌شده است را باید در چاله مخصوص جمع‌آوری کرد.

احداث خطوط لوله انتقال سیال زمین‌گرمایی ساخت نیروگاه‌ها و محل‌های مصرف با تغییراتی که در پستی‌وبلندی سطح زمین ایجاد می‌کند موجب از بین رفتن درختان و گیاهان طبیعی شده و به محیط وحش نیز آسیب می‌رساند. نیروگاه و تأسیسات زمین‌گرمایی باعث تغییر منظر محیط می‌شود، چنانچه در لاردرلو ایتالیا شبکه‌های لوله‌کشی از چاه‌ها به نیروگاه‌ها کاملاً در نمایی محل اثر کرده و بالاخره منظر نیروگاه و برج خنک‌کننده آن منظره‌ی ویژه‌ای به وجود آورده که بازدیدکنندگان و جهانگردان را به خود جلب می‌کند. در ادامه برخی از آسیب‌های محیطی زیست و راهکارهای مقابل با آن و برخی قوانین به‌اختصار توضیح داده می‌شود.

۳-۱- انتشار گازها و نظارت بر آن در اتمسفر

با آغاز کار نیروگاه مسائل زیست‌محیطی دیگری نیز ظاهر می‌شود به‌طورمعمول استخراج سیال زمین‌گرمایی حامل گازهایی از قبیل دی‌اکسید کربن سولفید هیدروژن متان و برخی مواد محلول هستند که معمولاً در دماهای بالا غلظت آن‌ها بیشتر می‌شود برای مثال آرسنیک و جیوه از مواد آلاینده هستند که به همراه سیال‌های زمین‌گرمایی به محیط‌زیست وارد می‌شود در عوض در برخی از آب‌های زمین‌گرمایی مانند سیالات زمین‌گرمایی مصرفی در گرمایش منازل کشور ایسلند غلظت مواد محلول آن‌قدر ناچیز است که هیچ‌گونه آلودگی زیست‌محیطی ایجاد نمی‌کند و به‌صورت مستقیم به مصرف می‌رسد[۱۶].

تخلیه آب‌های هرز زمین‌گرمایی به محیط نیز یکی از مسائل مهم آلودگی محیط‌زیست است سیال‌های زمین‌گرمایی حامل مواد شیمیایی مثل بر، فلوراید آرسنیک نیز باید تصفیه‌شده و دوباره به مخزن تزریق شود. سیال‌های کم‌دما برای مصارف مستقیم استفاده می‌شود اکثراً ازنظر زیست‌محیطی چندان آلاینده نبوده و تخلیه آن در محیط آلودگی چندانی ایجاد نمی‌کند[۱۷].

استخراج حجم زیادی از سیال ممکن است باعث فرونشستن زمین شود و پایین رفتن تدریجی حادثه ناگهان و خطرآفرین نیست بلکه یک عارض تدریجی و ملایم است که در یک محل به‌طور یکنواخت ظاهر می‌شود برای جلوگیری از این عارضه می‌توان سیال زمین‌گرمایی را پس از استفاده دوباره به مخزن مربوطه تزریق کرد تا میزان فرونشست به حداقل ممکن کاهش پیدا کند.

۳-۱-۱- کیفیت هوا در مناطق زمین‌گرمایی

سیالات زمین‌گرمایی دارای درجه حرارت بالا هستند و معمولاً حاوی گازهایی باکیفیت متغیر هستند، مقادیر با درصد وزنی بین ۲ تا ۱۰، شامل دی‌اکسید کربن، سولفید هیدروژن، متان، گاز هیدروژن، سایر عناصر کمیاب جیوه، آرسنیک، بور، رادون، آنتیموان، فلزات سنگین مانند سرب، آلومینیوم، آهن، روی، کادمیم و همچنین آمونیاک است[۱۵]. ذرات جامد یا گاز محلول در آب ممکن است در ذرات آئروسل (گردوغبار) منتشرشده از برج‌های خنک‌کننده، به خاک فرو رود و یا توسط باران شسته شوند. اکسیدهای نیتروژن، دی‌اکسید گوگرد و ذرات اولیه[۱] به‌طور مستقیم توسط نیروگاه زمین‌گرمایی ساطع نمی‌شود. ذرات ثانویه ممکن است از اکسیداسیون سولفید هیدروژن و آمونیاک تشکیل شوند.

برای نیروگاه زمین‌گرمایی معمولی که به سیستم کاهش، اکسیدهای نیتروژن و دی‌اکسید گوگرد مجهز نیست تخمین زده می‌شود که تولید گازهای گلخانه‌ای در آن ۱ درصد تولید گازهای گلخانه در یک نیروگاه سوخت فسیلی با توان یکسان است[۱۸].

غلظت گاز در سیال زمین‌گرمایی با توجه به ویژگی‌های مخزن متفاوت است. دی‌اکسید کربن و سولفید هیدروژن که فراوان‌ترین گازها هستند، به ترتیب به میزان ۹۵٪ و حداکثر ۱ تا ۲٪ از گازهای غیرقابل تراکم[۲] موجود در مایعات زمین‌گرمایی هستند. آمونیاک و اسید بوریک که بسیار محلول در آب هستند، عمدتاً در فاز آبی یافت می‌شوند و از برج‌های خنک‌کننده به اتمسفر منتقل می‌شوند.

پراکندگی انتشار گازها بستگی به شرایط آب‌وهوا از منظر کوه‌شناسی (ارتفاع نقاط و دمای گاز) دارد. اگر سیستم جمع‌آوری کارآمدی به‌منظور تغییر مسیر سیال زمین‌گرمایی به نیروگاه دیگر در دسترس نباشد، میزان قابل‌توجهی از رها شدن گازهای گلخانه‌ای در طول حفاری چاه (تخیله و گاز زدایی) و در طول خاموش کردن نیروگاه (تخیله بخار آزاد) رخ می‌دهد. کیفیت هوا در مناطق زمین‌گرمایی (بدون توجه به اینکه از نوع آتشفشانی هستند) بستگی به سیال زمین‌گرمایی دارد و همچنین با نیروگاه‌های زمین‌گرمایی و ابزارات طبیعی زمین مرتبط است.

سیلیس نیز یکی از مهم‌ترین محصولات مشکل‌ساز در میدان‌های زمین‌گرمایی مایع غالب است و اغلب در محلول‌های اشباع همراه با آب زمین‌گرمایی در عمق ایجاد می‌شود درنتیجه کاهش فشار خروج گاز، سیلیس یا بلافاصله رسوب می‌کند یا اینکه برای مدت‌زمان کوتاهی در محلول باقی می‌ماند، هرساله مقادیر زیادی سرمایه صرف پاک‌سازی سیلیس از کانال‌های روباز تخلیه آب در میدان زمین‌گرمایی وایراکی می‌گردد در تجهیزات گرم‌کننده‌ای که آب حاوی سیلیس برای مدت‌زمان زیادی در لوله‌ها گردش می‌کند رسوب‌گذاری درون لوله‌ها مشکلات جدی ایجاد می‌نماید ترس از رسوب‌گذاری زیرزمینی سیلیس همواره به‌عنوان یک عامل بازدارنده برای تزریق مجدد سیالات مطرح بوده است[۱۵].

۳-۱-۲- قوانین انتشار گازها و کیفیت هوا در اتحادیه اروپا

با توجه به مواد منتشرشده توسط نیروگاه زمین‌گرمایی، مقررات اتحادیه اروپا و ایتالیا در مورد استانداردهای کیفیت هوا فقط برای جیوه و آرسنیک است و ارزش‌های محدودکننده انتشار را به‌عنوان جریان جرمی یا به‌عنوان ترکیبی از جرم و غلظت جرمی تعریف می‌کنند. در غیاب استانداردهای نظارتی برای آلاینده‌های دیگر، مرجع ایجادشده توسط سازمان‌های بین‌المللی (مانند سازمان جهانی بهداشت[۳]) یا سایر مقامات در این زمینه (مانند کنفرانس بهداشت و درمان صنعتی دولتی آمریکا[۴]) می‌توان به‌عنوان عمل خوب توسط مقامات منطقه‌ای مورداستفاده قرار گیرد. جدول ۳ مقادیر مرجع که در توسکانی و ارجاعات اصلی بین‌المللی ترسیم‌شده است را نشان می‌دهد. به‌منظور کاهش انتشار آلاینده‌ها در جو، دولت منطقه‌ای در توسکانی اقدامات ذیل را انجام داده است[۲]:

۱. تعیین معیار انتشار مرجع، مطابق با نوآوری‌های تکنولوژیکی
۲. معرفی سیستم‌های جدید مانیتورینگ خطی و بهبود کیفیت موجود در هوا
۳. تحقیق و تدارکات فنّاوری‌های جدید جهت کاهش سایر آلاینده‌ها.

[۱] Particulate Matter(PM)

[۲] Non-Condensable Gases
[۳] World Health Organization (WHO)
[۴] ACGIH

[DOR: 20.1001.1.20089813.1399.7.2.3.2]

جدول ۳ مقادیر مرجع گازهای موجود در واحد زمین‌گرمایی[۲]

Parameter	Concentration	Reference
Hydrogen Sulphide (H2S)	150 µg/m3 daily average 100 µg/m3 for 1–14 days (average over the period) 20 µg/m3 up to 90 days (average over the period)	(1) (2)
Arsenic (As)	6 ng/m3 yearly average	
Mercury (Hg)	0.2 µg/m3	
Boron (B)	20 µg/m3 daily average	
Ammonia (NH3)	10 µg/m3>for 1–14 days (average over the period) 170 µg/m3 daily average 70 µg/m3>for 1–14 days (average over the period)	(3) December 2007 Confidence interval 100 with respect to TLV-TWA of 17 mg/m3 reported in (4) (ammonia) (3) Reference year 2004
Antimonium (Sb)	5 µg/m3 daily average	Confidence interval 100 with respect to TLV-TWA of 0.5 mg/m3 reported in (4) (antimonium)

TLV-TWA = Time Weighted Average.
Ref: (1) WHO (2000); (2) WHO – IPCS; (3) MRL Minimal Risk Level (ATSDR); (4) ACGIH, (2006).

۳-۱-۱- راهکارهای کاهش انتشار گازها

بهترین فنّاوری برای کاهش انتشار هوا بستگی به نوع و تخمین طول عمر نیروگاه و میزان غلظت آلاینده‌ها در سیال دارد. در ایتالیا به‌طور متداول از تزریق مجدد سیالات به‌استثنای گازهای غیرقابل چگالش[1] و پذیرش سیستم‌های مخرب استفاده می‌شود. به‌عنوان نمونه در نیروگاه‌های ایتالیا تولید توان از سیالات زمین‌گرمایی با محتوای بالای گازی سبب دست یافتن به فاکتورهای پایین انتشار آلایندگی در کنار استفاده از تکنولوژی‌های کاهش‌دهنده شده است. همچنین در حال حاضر در برخی مناطق ایسلند با تزریق مجدد گاز همان‌طور که در بعضی از پروژه‌های زمین‌گرمایی پیشنهادشده است انتشار گازها کنترل می‌شود شکل ۴[۱۹] البته در مواردی خطر استفاده از تزریق گاز وجود دارد زیرا افزایش فشار باعث افزایش انتشار سیالات ثانویه می‌شود (ازجمله هیدروکربن‌ها و نفت سنگین با ویژگی بالقوه افزایش حرارت جهانی زمین)[۱۴].

۳-۱- آلودگی صوتی

آلودگی صوتی ناشی از فعالیت واحدهای زمین‌گرمایی را می‌توان در مواردی که واحد به تولید انرژی می‌پردازد نیز به‌عنوان یک معضل زیست‌محیطی قلمداد نمود. آلودگی‌های صوتی در طول مراحل برپایی و کارکرد نیروگاه‌های زمین‌گرمایی شامل حفاری (۹۰ تا ۱۲۰ دسی‌بل) و خروج سیال از خطوط لوله (حدود ۱۲۰ دسی‌بل) می‌شود[۱۵].

۳-۱-۱- قوانین

تولید سروصدا به‌عنوان یک نوع آلودگی شامل قوانینی می‌شود که در آن حداکثر سطح سروصدا مجاز با توجه به منطقه محلی و ارزیابی منابع تولید سروصدا مطرح می‌شود. یا بر اساس ساعات مختلف کارکرد، شبانه (ساعت ۲۲:۰۰ تا ۶:۰۰ صبح) و روزانه (ساعت ۶ صبح تا ۲۲:۰۰) قوانینی را تنظیم می‌کند. مثلاً بر اساس مرجع [۲] هر شهرداری باید از جدول ۴ منطقه محلی خود را بر اساس ویژگی صوتی، نقشه‌برداری منطقه خود را طبقه‌بندی کند و مجوزهای لازم را دریافت کند.

۳-۱-۲- راهکار کاهش میزان آلودگی صوتی

فناوری کاهش سروصدا در ایتالیا به‌طور گسترده‌ای کاربرد دارد، به‌عنوان‌مثال موانع صدا، سپرهای صوتی در موتورها و به‌کارگیری تجهیزات کم سروصدا در موقع تست چاه‌ها. حفاری یک فعالیت موقت است و معمولاً در مناطقی با تعداد سکنه پایین انجام می‌شود، سروصدا بسیار کمتر از حد مجاز برای این مناطق است. خطوط لوله از تجهیزات با اثرغیرآکوستیک محسوب می‌شود که نیاز به تعمیر و نگهداری دارد. پس از ساخت نیروگاه تمام فناوری‌های مورداستفاده در نیروگاه زمین‌گرمایی با بهبود مستمر عملکرد تجهیزات نیروگاهی به پایین‌ترین استانداردهای نوع طبقه ۱" محدود می‌شود. همچنین کاهش قابل‌توجه سروصدا توسط عایق‌های حرارتی توربین و قفس‌های ضد صدا در اطراف توربین و ژنراتور به دست می‌آید. برج‌های خنک‌کن بالاترین سروصدا را ایجاد می‌کند. بر اساس گزارش داخلی شرکت چندملیتی و ایتالیایی تولیدکننده انرژی‌های تجدیدپذیر انل گرین پاور[2]، اثر آکوستیک تا مرز ۷۵ تا ۹۰ دسی‌بل به وسیله مفروش کردن سطح آب و استفاده از سازه‌های چوبی و فن‌های ضد صدا و استفاده از موتورهای محور عمودی باهدف خاص، کاهش می‌یابد.

۳-۲- تداخل آب‌های سطحی و زیرزمینی

آب به‌طور قابل‌توجهی یک منبع کلیدی است. اگر معیار مناسب جهت ساخت‌وساز و عملیات بهره‌برداری نیروگاه اعمال نشود، می‌تواند تأثیرات منفی بر کیفیت آب، کمیت و چرخه زیرزمینی آب ایجاد کند.

۳-۲-۱- کاربرد و مصرف آب

تمام نیروگاه‌های زمین‌گرمایی از مقادیر قابل‌توجهی از سیالات زمین‌گرمایی استفاده می‌کنند. پس از تولید برق و چگالش، این سیالات قبل از تزریق مجدد

1 NCG: non condensable gas

2 Enel Green Power

[DOR: 20.1001.1.20089813.1399.7.2.3.2]

جدول ۴ محدوده مقدار سروصدا در محیط‌زیست بر اساس مقصد هر سایت در واحد دسی‌بل

حوزه طبقه‌بندی	مقادیر سطح انتشار (دسی‌بل)		مقادیر سطح مصرف (دسی‌بل)		مقادیر استاندارد کیفیت (دسی‌بل)	
نوع طبقه	روز	شب	روز	شب	روز	شب
۱) مناطق با حفاظت ویژه: بیمارستان‌ها، مدارس، مناطق مسکونی روستایی، پارک‌ها و غیره	۴۵	۳۵	۵۰	۴۰	۴۷	۳۷
۲) مناطق بیشتر مسکونی، با فعالیت‌های تجاری و صنعتی	۵۰	۴۰	۵۵	۴۵	۵۲	۴۲
۳) مناطق فعال درزمینه تولید محصولات غیر صنعتی و مسکونی	۵۵	۴۵	۶۰	۵۰	۵۷	۴۷
۴) مناطق به‌شدت مسکونی	۶۰	۵۰	۶۵	۵۵	۶۲	۵۲
۵) مناطق بیشتر صنعتی و به‌ندرت مسکونی	۶۵	۵۵	۷۰	۶۰	۶۷	۵۷
۶) مناطق منحصراً صنعتی	۶۵	۶۵	۷۰	۷۰	۷۰	۷۰

برای کاربردهای دیگر قابل‌استفاده است. آب در مراحل حفاری و ساخت‌وساز موردنیاز است. اگر سیال زمین‌گرمایی در دسترس نباشد برای سیمان و گل حفاری دیواره چاه آب تازه موردنیاز است. برای خطوط لوله و محوطه‌سازی نیز در هنگام ساخت نیروگاه نیاز به آب دارد. ازآنجاکه آب حدود ۱۰ درصد وزن سیمان است، مقدار تخمین زده‌شده برای سیمان‌کاری به ازای هر یک کیلومتر ۱۰-۱۵ مترمکعب آب نیاز است. درحالی‌که در طول مدت بهره‌برداری نیروگاه آب اضافی موردنیاز نیست.

۳-۲-۱- آلودگی آب‌های سطحی و زیرزمینی

سیال زمین‌گرمایی متشکل از طیف گسترده‌ای از یون‌های حل‌شده در فاز مایع آن است شامل استرانسیم، آنتیموان، منیزیم، بور، لیتیم، کلسیم، پتاسیم، سدیم، آرسنیک، فلوئور، سلیسیم، روبیدیم، کلرایدها، بی‌کربنات‌ها و سولفات‌ها، بخار فوق گرم به‌طور عمده حاوی کلرایدها و بی‌کربنات‌های اسید بوریک و مقادیر جزئی از آرسنیک و جیوه است؛ که همین کانی سازی و بهره‌برداری از منابع زمین‌گرمایی ممکن است بر کیفیت آب سطحی نزدیک به منابع زمین‌گرمایی تأثیر بگذارد و باعث آلودگی آب‌های زیرزمینی شود، ۱) حوادث حین عملیات حفاری چاه، ۲) نشت‌های کوچک ولی مستمر در خطوط لوله در چاه‌ها و سایر بخش‌های زمین‌گرمایی و ۳) نشت‌های تصادفی از گل و سیال زمین‌گرمایی که قبل از تزریق مجدد به‌طور موقت در مخازن ذخیره می‌شود.

ترک خوردن خط لوله، نشت خطوط لوله و سایر نشت‌های سطحی که می‌تواند مسیر آب‌های سطحی و زیرزمینی را آلوده کند. علاوه بر این جریانی که از برج خنک‌کننده خارج می‌شود می‌تواند باعث آلودگی خاک، آب و

همین‌طور رسوب‌گذاری شود. هرچه چرخه گردش سیال عمیق‌تر در زمین باشد شناسایی اثرات احتمالی چرخه بر کیفیت آب سخت‌تر حاصل می‌شود[۲].

۳-۲-۲- مداخله در مخازن زیرزمینی

زمانی که تعداد چاه‌ها و اطلاعات مستقیم کمی وجود داشته باشد درک چرخه سیال زیرزمینی پیچیده است. آزمایش‌های هیدرولیکی در چاه‌های موجود جهت مشخصه نفوذپذیری انجام می‌شود و مدل‌سازی عددی هیدرولوژیکی اصلی‌ترین ابزار کارآمد و پایدار جهت مدیریت زمین‌گرمایی است. اثر خروج آب از مخازن زمین‌گرمایی می‌تواند تا حد زیادی توسط تزریق مجدد به مخزن زمین‌گرمایی جبران می‌شود. البته به دلیل تلفات سیال زمین‌گرمایی و گازهای غیرقابل تراکم به‌طور کامل این بازگشت اتفاق نمی‌افتد. تلفات جرم در سیستم‌های حاوی سیال دو فاز (گاز و مایع) باعث کاهش فشار مخزن می‌شود.[۲۰] بنابراین طرح‌های دقیق برای تزریق مجدد با استفاده از مدل پیش‌بینی برای تکامل مخزن و نظارت بر اقدامات اصلاحی لازم است. [۲۱]

۳-۳- فرونشست زمین

فرونشست زمین، حرکت عمودی به سمت پایین سطح زمین است که از فرایندهای طبیعی، ازجمله حرکات زمین‌شناسی و پدیده‌های آتشفشانی، یا از طریق فعالیت‌های انسانی ناشی می‌شود. استخراج سیال از منابع زیرزمینی، شایع‌ترین علت تخریب انسانی است که منجر به تغییر در ناحیه تنش مخزن و مناطق اطراف آن (تغییر شکل الاستیک و الاستیسیته) و درنتیجه باعث تغییر شکل سنگ می‌شود. بسته به ضخامت و خواص مکانیکی سنگ‌ها، این تغییر شکل می‌تواند با حرکت عمودی و / یا افقی باعث تغییر شکل سطح زمین شود[۲۲].

۳-۳-۱- قوانین

قوانین باید متضمن حفاظت و ترمیم خاک‌های سطحی و زیرزمینی باشد که شامل مواردی جهت بازسازی هیدرولوژیکی منطقه آسیب‌دیده از طریق پیشگیری از پدیده بی‌ثباتی، ایمن‌سازی شرایط خطرساز و مبارزه با بیابان‌زایی تصویب شود.

۳-۳-۲- راهکار کاهش میزان نشست

یکی از راهکارهای برای جلوگیری، کنترل یا کاهش فروپاشی و نشست زمین تزریق و بازتزریق مجدد سیالات به سیستم زمین‌گرمایی است، در بسیاری از موارد این روش جهت جبران کمبود و کاهش فشار ناشی از استخراج سیالات را می‌کند. تأثیر تزریق و بازتزریق مجدد برای حمایت از فشار، پایداری منابع

[DOR: 20.1001.1.20089813.1399.7.2.3.2]

و کنترل سیلاب‌ها اثبات‌شده است و به‌سرعت به بخش جدایی‌ناپذیر از بهره‌برداری از سیستم‌های زمین‌گرمایی پایدار و سازگار با محیط‌زیست شده است.[۲۰]

۳-۴- زمین‌لغزش‌های القایی

بر اساس علم زلزله‌شناسی، زمین‌لرزه‌ها هنگامی بروز می‌کنند که تنش‌های زمین ساختی در طول یک گسل انباشته شوند تا به یک نقطه بحرانی برسند و ناگهان تنش‌ها تخلیه می‌شوند. زلزله‌های مصنوعی را زلزله‌های القایی یا تحریک‌شده می‌نامند که ناشی از عوامل طبیعی نبوده و در دهه‌های اخیر به دلیل عملکردهای بشر روی پوسته زمین رخ‌داده‌اند.[۲۳]

بنابراین باید انتظار داشت که مراکز این نوع زلزله‌های کاذب در نواحی فعالیت‌های انسان‌ها و حوالی آن قرار گیرد شکل۵ این حرکات معمول با آشفتگی و بر هم زدن موازنه طبیعت همراه بوده است و نسبت مستقیمی بین زلزله‌های تحریک‌شده و فعالیت‌های انسانی وجود دارد. از آن جمله استخراج سیال زمین‌گرمایی و تزریق مجدد آن است؛ که ممکن است به علت ایجاد تغییر فشار در منافذ، عدم تعادل ایزو استاتیک و اثرات ترموالاستیته ایجاد زمین‌لرزه‌های القایی می‌کند[۲۴]

۳-۴-۱- راهبردها

آزمایش‌ها نشان می‌دهد شروع و میزان حوادث لرزه‌ای از حجم تزریق سیالات و فشارهای آن ناشی می‌شود بنابراین امروزه از هرگونه روش و فناوری که تحریکات سخت و سنگین مانند پمپاژ حجم زیادی سیال زیرزمین داشته باشد جهت به حداقل رساندن خطر ناشی از لرزه‌های القایی، خودداری می‌شود.

همچنین در مناطق زمین‌گرمایی عموماً از توازن قابل‌توجهی بین مقدار سیال تولیدشده و سیال مجدداً تزریق‌شده برقرار است که مانع از کاهش فشار انبساط می‌شود و علاوه بر آن به خاطر اختلاف دمای محدود بین این دو سیال اثرات خنک‌سازی کاهش می‌یابد و نیاز برای توسعه تکنیک‌های جلوگیری از لرزه‌های القایی را به‌طور قابل‌توجهی کاهش می‌دهد.[۲۵]

۳-۵- تأثیرات بصری

تأثیر بصری یک عامل کلیدی در تولید صنعت زمین‌گرمایی است. کاهش تأثیرات بصری به‌طور فزاینده‌ای اهمیت دارد و تمام نیروگاه‌های جدید در هماهنگی با چشم‌اندازهای طبیعی طراحی می‌شود. در بعضی موارد، مراقبت‌های ویژه‌ای برای ایجاد مسیرهای پیاده‌روی در اطراف نیروگاه برای ترویج گردشگری فناوری در نظر گرفته‌شده است.

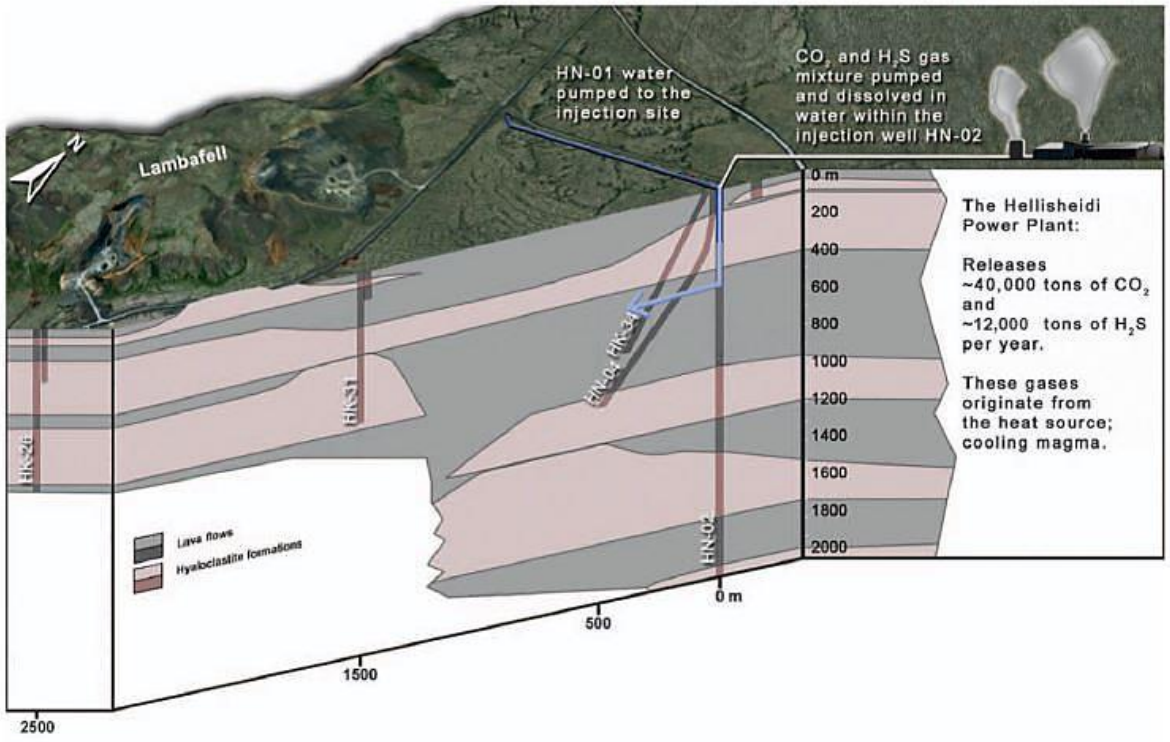
برای نمونه برخی ساختمان‌های لاردرلو که به اوایل دهه ۱۸۰۰ ازلحاظ تاریخی و هنری موردتوجه هستند؛ و همین‌طور روستای جدید لاردرلو توسط معمار معروف جهان جیووانی میچلوچی طراحی‌شده است شکل۶ و ۷ به خاطر سبک منحصربه‌فرد او دارای چشم‌انداز بسیار غیرمعمولی است.

۳-۶- ضایعات

نیروگاه‌های زمین‌گرمایی هم ضایعات مایع و هم جامد که به دنبال حفاری چاه‌ها، ساخت‌وساز، بهره‌برداری و نگهداری از نیروگاه و نیز پسماندهای شهری کارکنان، تولید می‌کند. ازجمله ۱) گل حفاری و دیگر مواد افزودنی مایع حفاری مانند دوغاب سیمان، گازوئیل و روان کننده‌ها مواد مایع تمیزکننده و آب شور زمین‌گرمایی ۲) برش‌ها، خورده سنگ‌ها، ضایعات صنعتی از انواع مختلف آن. سایر ضایعات ناشی از ساخت‌وساز یک نیروگاه عبارت‌اند از: ضایعات باقیمانده از ساخت‌وساز مسیرهای دسترسی و لوله‌گذاری، پلاستیک‌های بسته‌بندی، زباله‌های فلزی، زباله‌های چوبی، مواد لاستیکی، فیلترها و...

۳-۶-۱- راهکارهای کاهش میزان ضایعات

برای به حداقل رساندن مقدار ضایعات در حین حفاری، نخاله‌های جامد به‌طور جداگانه در مخازن خاص ذخیره می‌شوند. مایعات حفاری برای استفاده



شکل ۴برش مقطع عرضی از سایت تزریق مجدد، دی‌اکسیدکربن و سولفید هیدروژن که به‌طور کامل در آب حل‌شده‌اند از طریق چاه **HN-۰۲** به عمق ۴۰۰ تا ۴۵۰ متر تزریق می‌شود[۱۹]

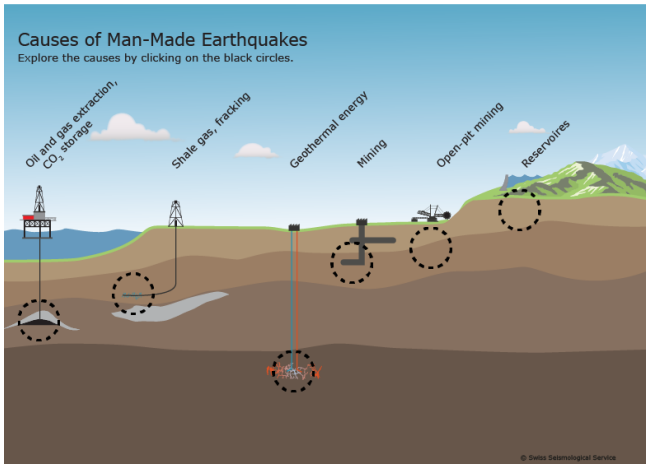
[DOR: 20.1001.1.20089813.1399.7.2.3.2]

مجدد و بازیافت آن در مخازن مهروموم شده جمع‌آوری و ذخیره می‌شود. برای استفاده مجدد و بازیافت گل حفاری باید به‌طور صحیح حمل شود. ابتدا در مخازن رسوب ضد آب برای جداسازی زباله‌های درشت، سپس صفحه‌های ارتعاشی و فیلترهای فشاری استفاده می‌شود. بعد از جداسازی زباله‌های درشت گل را به مدار حفاری منتقل می‌کند. هنگامی‌که گل حفاری دیگر قابل‌استفاده مجدد نیست، پس از جدا شدن ضایعات برش در یک فیلتر فشاری خشک می‌شود و آب به یک تصفیه‌خانه فاضلاب ارسال می‌شود و فاز جامد به محل‌های دفن زباله منتقل می‌شود. آب شور استخراج‌شده در حین حفاری دوباره تزریق می‌شود و یا آب آن را جدا می‌کنند و مواد جامد را به محل دفن زباله می‌فرستند. دیگر مواد زائد (مواد ناکارآمد، چوب، فلز، کارتن، پلاستیک و غیره) در سطل‌ها یا کانتینرهای مناسب قرار می‌گیرند. زباله‌های خطرناک (مانند روغن‌ها و باتری‌ها) در ظروف جداشده و برچسب‌گذاری می‌شوند. یک منطقه ذخیره‌سازی خاص در نیروگاه وجود دارد و دارای مجوز مدیریت زباله و حمل است.

۴- ابعاد اجتماعی و اقتصادی زمین‌گرمایی

۴-۱- تأمین انرژی امن و پایدار

یکی از مقولات پیچیده، فوری، نامحدود و همچنان مطرح جهت تأمین انرژی امن و پایدار، چالش‌های فنی، سیاسی، اقتصادی، اجتماعی و حتی اخلاقی آن است. سیستم‌های انرژی و ساختار اجتماعی به‌طور پیچیده‌ای درهم‌تنیده



شکل ۵ فعالیت‌های انسانی که باعث ایجاد زمین‌لغزش‌های القایی می‌شود [۲۶]

است و این بدین معناست که هیچ نوآوری موفق انرژی نمی‌تواند بدون تغییرات جامع و اجتماعی باشد. نوآوری زمانی قدرتمند و جامع محسوب می‌شود که ازنظر اجتماعی پایدار باشد.[۲۷] حرکت به سمت آینده انرژی کم‌کربن به‌طور غیرقابل‌اجتنابی پیچیده است و صور نوینی از حکومت را در بردارد. تغییر از دولت به حکومت[1] (سبک جدیدی از حکومت‌داری که در آن مرز بین بخش‌های عمومی و خصوصی و سطوح ملی و بین‌المللی کم‌رنگ شده است)[۲۸] ازجمله تمام ذینفعان مرتبط در توسعه انرژی تجدید پذیر متضمن فناوری‌های جدید است؛ اما مطالعات درزمینه ساختار حکومت ابعاد اجتماعی و سیاسی انرژی زمین‌گرمایی تا سال‌های اخیر به‌ندرت در ادبیات بین‌المللی یافت می‌شود. البته در ایتالیا تحقیقاتی چند در این زمینه صورت گرفته است.[۲] ازجمله سه مطالعه بحث برانگیز در قلمرو عمومی به‌قرار زیر است: مطالعه اول، درزمینه زمین‌گرمایی پیشرفته در کوه آمیاتا انجام شد، مطالعه دوم با طرح تحقیق و روش‌شناسی یکسان در ایالت پالرمو در جنوب

شکل۶ نیروگاه سن مارتینو[۲]

شکل ۷ دید از بالای نیروگاه باگنور ۳ [۲]

ایتالیا انجام گردید، که در این منطقه هیچ توسعه زمین‌گرمایی طرح‌ریزی نشده بود و سومین مورد ویتربو در مرکز ایتالیا بود که در آن توسعه زمین‌گرمایی مطرح‌شده ولی با مخالفت‌هایی مواجه شده است[۲۹].

۴-۱-۱- مزایای اجتماعی و محلی بهره‌وری از انرژی زمین گرما

تولید ارزش‌افزوده طولانی‌مدت یکی از اهداف شرکت چندملیتی تولیدکننده انرژی‌های تجدید پذیر انل گرین پاور برای جوامع در مناطق زمین‌گرمایی است[۱۲]؛ بنابراین بهبود رشد اقتصادی و اجتماعی ناشی از توسعه زمین گرمایی خواهد بود. اگر اشتغال مستقیم و غیرمستقیم افراد را در نظر بگیریم صنعت زمین‌گرمایی در یک منطقه مشخص بر زندگی بیش از ۲۰۰۰ نفر تأثیر می‌گذارد، حدود یک‌سوم در استخدام مستقیم شرکت هستند و بقیه در بخش‌های مختلف کسب‌وکار مانند خدمت، کارهای شهری، صنعت الکترومکانیک و نجاری فعال هستند. همچنین انل گرین پاور از ابتکارات کسب‌وکار محور پشتیبانی می‌کند درحالی‌که هم‌زمان از قابلیت دسترسی به سیالات زمین‌گرمایی از راه همکاری نزدیک با مدارس حرفه‌ای، دانشگاه‌های محلی و مؤسسات تحقیقاتی بهره می‌برد، مانند کشت اخیر جلبک دریایی یا استارتاپ‌هایی که نیازمند صنعت مکانیکی دقیق هستند.

[1] Government to Governance

[DOR: 20.1001.1.20089813.1399.7.2.3.2]

۵- نتیجه

پس از جمع‌آوری و سازمان‌دهی اطلاعات ارائه‌شده توسط سوابق رسمی و مقالات علمی، این مقاله جنبه‌های زیست‌محیطی توسعه زمین‌گرمایی را در رابطه با هوا، سروصدا، آب، نشست زمین و لرزه‌های القایی، تأثیرات بصری و ضایعات جهت استفاده برای تولید برق مورد تجزیه‌وتحلیل قرار داد. خطرات مرتبط با آن، قوانین و اقدامات لازم جهت کاهش اثرات مورد بحث قرار گرفت. مراقبت از محیط‌زیست و کاهش اثرات بالقوه انرژی زمین‌گرمایی در سطح ایمن و مدنظر داشتن آن در سیاست‌گذاری‌ها اساسی است.

با توجه به نقش استراتژیکی که انرژی زمین‌گرمایی می‌تواند داشته باشد، می‌بایست قوانین ملی توسط مدیران اجرایی و دولت به‌طور کامل اجرا شود و دستورالعمل‌هایی برای اکتشاف، بهره‌برداری و مدیریت منابع زمین‌گرمایی ارائه شود.و کنترل سختگیرانه ایی در مورد جنبه زیست محیطی باید انجام شود، با اینکه همواره این واقعیت وجود دارد که یکی از کنترل‌شده‌ترین و سازگارترین صنعت تولید برق ازلحاظ محیط‌زیستی انرژی زمین‌گرمایی است، اما اختلافات و نگرانی هایی با توسعه انرژی زمین گرمایی مطرح است از آن جمله به تاثیرات بصری تا انتشار آلودگی در هوا و تخلیه پسآب ها می شود اشاره کرد، که گروه های مخالف اکنون فناوری های نوینی از جمله نیروگاه های با آلودگی صفر را پیشنهاد می کنند. همچنین بحث در مورد انرژی زمین‌گرمایی به بحث در مورد سایر فناوری‌های انرژی (انرژی‌های تجدید پذیر، هسته‌ای، نفت شیل) وابسته است. مثلا در ایتالیا موضوع حفاری عمیق باعث شد تا این سوال مطرح شود که آیا زلزله ایی که در سال ۲۰۱۲ رخ داد آیا ناشی از فعالیت های بشری در خصوص استهسال انرژی است؟ همچین بحثی در مورد نفت شل در آمریکا مطرح شده بود هرچند در حوزه زمین گرمایی مطرح نبود اما همین باعث ایجاد تردید در سایر مناطق شد. اطلاعات ارائه شده جزئی و نادرست بیانگر یک مساله جدی در طرح توسعه انرژی زمین گرمایی است. در عرصه اجتماعی، ارتباطات بهبود یافته و دقیق که مبتنی بر واقعیت و داده های حقیقی است نقش استراتژیکی در رفع این مخالفت ها در سراسر جهان دارد. بررسی های منظم و جامع از رژیم های زیست محیطی و امنیتی توسعه انرژی زمین گرمایی مطمئنا به نفع بخش زمین گرماایی است.

یکی دیگر از مسائل کلیدی این است که بخش زمین‌گرمایی چگونه می‌تواند درگیری مؤثرتری با جامعه داشته باشد و ارزش‌های اجتماعی را در روند نوآوری قرار دهد؟، به‌جای تمرکز تنها بر ترس عمومی از خطرات بالقوه، عامل کلیدی تعیین‌کننده در پذیرش تحولات زمین‌گرمایی، این است که به‌وضوح مزایا برای عموم مردم توضیح داده شود، به‌عنوان مثال کاهش نرخ وسایل و مالیات بر آن، افزایش اشتغال و توسعه نوآوری. پذیرش محصول (انرژی زمین‌گرمایی) به‌شدت تحت تأثیر پذیرش فرایند (تصمیم‌گیری، معیارهای توزیع مزایا ...) است، بنابراین توجه به جنبه‌های اجتماعی و زیست‌محیطی، دو ستون مهم برای توسعه هرگونه استفاده از انرژی است.

۶- مراجع

[1] R. Bertani, “Geothermics Geothermal power generation in the world 2010 – 2014 update report,” *Geothermics*, vol. 60, pp. 31–43, 2016.

[2] A. Manzella *et al.*, “Geothermics Environmental and social aspects of geothermal energy in Italy,” *Geothermics*, vol. 72, no. April 2017, pp. 232–248, 2018.

[3] F. Creutzig, P. Agoston, J. C. Goldschmidt, G. Luderer, G. Nemet, and R. C. Pietzcker, “The underestimated potential of solar energy to mitigate climate change,” *Nat. Energy*, vol. 2, no. 9, 2017.

[4] K. P. Tsagarakis, “Shallow geothermal energy under the microscope: Social, economic, and institutional aspects,” *Renew. Energy*, 2019.

[5] M. Malo, B. Karine, and J. Raymond, “Public Perception Regarding Deep Geothermal Energy and Social Acceptability in the Province of Qu é bec , Canada,” pp. 91–103, 2019.

[6] A. Santilano *et al.*, “Convective , intrusive geothermal plays : what about tectonics ?,” no. i, pp. 51–59, 2015.

[7] P. Conti, M. Cei, and F. Razzano, “Geothermal Energy Use , Country Update for Italy (2010-2015),” no. July 2012, pp. 19–24, 2016.

[8] M. H. Ahmadi, A. Ahmadi, M. S. Sadaghiani, and M. Ghazvini, “Ground Source Heat Pump Carbon Emissions and Ground-Source Heat Pump Systems for Heating and Cooling of Buildings : A Review,” vol. 00, no. 00, 2017.

[9] M. H. Dickson and M. Fanelli, “What is geothermal energy ?,” 1965.

[10] A. Foley and A. G. Olabi, “Renewable energy technology developments, trends and policy implications that can underpin the drive for global climate change,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 68, pp. 1112–1114, 2017.

[11] R. Bertani, “World geothermal power generation in the period 2001 – 2005 ,” vol. 34, pp. 651–690, 2005.

[12] R. Bertani, “Geothermal Power Generation in the World 2010-2014 Update Report,” no. April, pp. 19–25, 2015.

[13] E. Rodríguez, W. S. Harvey, and E. J. Ásbjörnsson, “Review of H 2 S Abatement Methods in Geothermal Plants,” no. April, pp. 19–25, 2015.

[14] P. Bayer, L. Rybach, P. Blum, and R. Brauchler, “Review on life cycle environmental effects of geothermal power generation,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 26, pp. 446–463, 2013.

[15] A. Berardy and M. V. Chester, “Climate change vulnerability in the food, energy, and water nexus: Concerns for agricultural production in Arizona and its urban export supply,” *Environ. Res. Lett.*, vol. 12, no. 3, 2017.

[16] I. Dincer and C. Acar, “A review on clean energy solutions for better sustainability,” 2015.

[17] H. Kristmannsdo, “Environmental aspects of geothermal energy utilization,” vol. 32, pp. 451–461, 2003.

[18] “Promoting Geothermal Energy : Air Emissions Comparison and Externality Analysis Promoting Geothermal Energy : Air Emissions Comparison and Externality Analysis,” no. April, pp. 1–19, 2013.

[19] S. R. Gislason *et al.*, “carbon dioxide emissions,” vol. 352, no. 6291, pp. 10–13, 2016.

[20] A. R. Diaz, E. Kaya, and S. J. Zarrouk, “Reinjection in geothermal fi elds A A worldwide review update,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 53, pp. 105–162, 2016.

[21] E. Kaya, S. J. Zarrouk, and M. J. O. Sullivan, “Reinjection in geothermal fields : A review of worldwide experience,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 15, no. 1, pp. 47–68, 2011.

[DOR: 20.1001.1.20089813.1399.7.2.3.2]

[22] L. Berkeley, "TWO-WEEK LOAN COPY This is a Library Circulating Copy," 2013.

[23] D. Elsworth, K. Im, Y. Fang, and T. Ishibashi, *Induced Seismicity and Permeability Evolution in Gas Shales , CO 2 Storage and Deep Geothermal Energy*, vol. 1. Springer Singapore, 2018.

[24] L. I. Lubis, M. Kanoglu, I. Dincer, and M. A. Rosen, "Geothermics Thermodynamic analysis of a hybrid geothermal heat pump system," *Geothermics*, vol. 40, no. 3, pp. 233–238, 2011.

[25] G. Kwiatek, P. Martínez-garzón, G. Dresen, M. Bohnhoff, H. Sone, and C. Hartline, "Journal of Geophysical Research : Solid Earth," pp. 7085–7101, 2015.

[26] A. Thomas, B. Simone, and C. Daniela, "Ac ce p t," *Biochem. Pharmacol.*, 2018.

[27] S. Andy, "Towards Innovation Democracy? Participation, Responsibility andPrecaution in Innovation Governance," vol. 24, 2014.

[28] A. Jordan, R. K. W. Wurzel, and A. R. Zito, "' New ' Instruments of Environmental Governance : Patterns and Pathways of Change," no. November 2014, pp. 37–41, 2010.

[29] A. Pellizzone, A. Allansdottir, R. De Franco, G. Muttoni, and A. Manzella, "Geothermal energy and the public : A case study on deliberative citizens ' engagement in central Italy," *Energy Policy*, no. November, pp. 0–1, 2016.

[DOR: 20.1001.1.20089813.1399.7.2.3.2]