

# مدلسازی مبتنی بر GIS پتانسیل انرژی زمین گرمایی کم عمق برای کاهش

## صدورات CO<sub>2</sub> در نواحی شهری

### چکیده

به دلیل درصد به سرعت در حال افزایش جمعیت ساکن مراکز شهری، نیازی به تاکید بر تقاضای انرژی در این شهرها و استفاده از انرژی های تجدیدپذیر به جای سوخت های فسیلی وجود دارد. در این مقاله، ما یک مدل فضایی را برای تعیین پتانسیل در هر قواره زمین برای استفاده از انرژی زمین گرمایی کم عمق برای گرمسازی فضا و آب گرم ایجاد کرده ایم. این روش براساس گرمسازی فضا و تقاضای انرژی برای گرمسازی فضا و آب گرم در هر ساختمان و پتانسیل استخراج گرمای ویژه سطح زیرین در هر قواره زمین می باشد. با این اطلاعات، همراه با فضای موجود در هر قواره زمین برای سوراخ های گمانه زنی درصد تقاضای انرژی که می تواند توسط انرژی زمین گرمایی تامین شود، محاسبه می شود. کاهش پتانسیل در صدورات CO<sub>2</sub> باید همگی انرژی زمین گرمایی استفاده شده ممکنی باشد که نیز محاسبه می شود. روش مزبور در شهر لودویگزبرگ المان بکار بسته شده و مشخص گردید که صدورات CO<sub>2</sub> می توانند احیاناً تا 29.7% کاهش یابد اگر کلیه الزامات فضا و گرمسازی آب توسط انرژی زمین گرمایی فراهم شود که در قابلیت پایداری یک شهر نقش دارد. روش اجرای ساده ای دارد و می تواند در سایر شهرها بکار بسته شود چرا که داده های استفاده شده باید به سهولت در دسترس باشد. مزیت دیگری همان اجرا روی پلتفرم انرژی شهری هوشمند مبتنی بر وب است که به بهره برداری تعاملی از راه حل ها درون یک شهر امکان می دهد.

**کلیدواژه ها:** GIS، برنامه ریزی شهری، تقاضای انرژی، انرژی زمین گرمایی، Guess و انرژی شهر هوشمند.

### ۱- مقدمه

تا سال 2030 پیش بینی شده است که تقریباً 60 درصد از جمعیت جهان در مناطق شهری زندگی خواهند کرد. در اتحادیه اروپا EU تعداد 74 درصد از کل جمعیت در نواحی طبقه بندی شده طبق دفاتر آمار ملی به عنوان

مناطق شهری زندگی می کنند.<sup>۱</sup> با چنین رشدی در شهرهای نواحی شهری، قابلیت پایداری یک مفهوم کلیدی هنگام برنامه ریزی برای آینده شده است. از زمان گزارش Brundtland مسائل قابلیت پایداری بویژه صدورات CO2 و تمام شدن سوختهای فسیلی از طریق افزایش مصرف سوخت در شهرهای رو به رشد در برنامه سیاسی بوده است. اتحادیه اروپا این نیاز را در راهکار رشد EU2020 خود تایید کرده است که هدفش کاهش صدورات CO2 تا 20 درصد با افزایش سهم منابع انرژی تجدیدپذیر در تولید انرژی تا 20 درصد و بهبود کارایی انرژی تا 20 درصد تا سال 2050<sup>۲</sup> باشد. بعلاوه یک هدف طولانی مدت EU تا سال 2050 کاهش صدورات گاز گلخانه ای تا دست کم 80 درصد در مقایسه با سطوح 1990 می باشد. نیاز به رهیافت به برنامه ریزی شهری با یک دیدگاه به عدم قرارگیری بار زیادی روی زمین و منابع اکنون همه جا پذیرفته شده است. ولیکن برای اینکه شهرها قابلیت پایداری کاهش انرژی و استفاده از آن را تضمین کنند، منابع انرژی تجدیدپذیر باید در برنامه های رشد شهری گنجانده شوند. در نتیجه، پژوهه اروپایی MUSIC <sup>۳</sup> راه اندازی گردید تا کاهش CO2 را بوسیله پتانسیل های انرژی تجدیدپذیر درون پنج شهر ابردين و گنت و لودویگزبرگ و مونتریل و روتردام مطرح سازد. یک سیستم پشتیبانی تصمیمات مبتنی بر وب به نام پلتغورم انرژی شهر هوشمند ایجاد گردید تا قابلیت بررسی راه حل های پایدار براساس پتانسیل های انرژی تجدیدپذیر را در کل شهر با یک درجه تفکیک بالای تصویر برای کاربران متعدد فراهم سازد.

ضروری است تقاضای انرژی را در مقیاس شهری، و پتانسیل استفاده از منابع انرژی تجدیدپذیر مختلف را برای انجام این تقاضا ارزیابی کنیم. فرد باید تعیین کند که کدام نوع انرژی تجدیدپذیر یا ترکیبی از آن برای یک شهر بهترین گزینه می باشد و نیز اثری که روی کاهش صدورات CO2 دارد باید تعیین شود. انرژی زمین گرمایی کم عمق یک راهی است که تاکید کمتری نسبت به پتانسیل های انرژی باد و خوشید برای شهرها دریافت کرده است. ما این کمبود را با تاکید خاصی بر اینکه چگونه تراکم و اشکال الگوی شهری بر پتانسیل انرژی و ظرفیت آن برای رفع تقاضای مصرف اثر دارند، مطرح کرده ایم.

<sup>۱</sup> طبق داده های بانک جهانی

<sup>۲</sup> World Bank data <http://data.worldbank.org/topic/urban-development>.

<sup>۳</sup> نشانی اینترنتی پژوهه MUSIC  
The MUSIC project <http://www.themusicproject.eu>.

انرژی خورشید و باد هدف اصلی مطالعات در زمینه پتانسیل برای استفاده از این منابع انرژی تجدیدپذیر می باشد.

سیستم های اطلاعات جغرافیایی GIS برای متناظرسازی قابلیت تناسب رده های پوشش زمین با پتانسیل انرژی خورشیدی و باد بالا استفاده شده است. اغلب مطالعات در یک سطح منطقه ای متمرکز بوده اند. Voiowntas و همکارانش برای مثال به محاسبه تقاضای گرمسازی آب برای یک ناحیه مسکونی و نیز پتانسیل استفاده از انرژی خورشیدی برای رفع این تقاضاها پرداخته اند. ارزیابی های پتانسیل انرژی خورشیدی نیز در مقیاس شهری توسط Bergamasco & Asinari اجرا شده است که یک روش ساده ای را برای ارزیابی قابلیت سقفی صفحات خورشیدی برای شهر تورین ابداع کرده اند در حالیکه Brito و همکارانش یک روشی را برای تخمین پتانسیل ESRI فتوولتاوی یک ناحیه شهری با استفاده از داده های LiDAR و بسط تحلیلگر خورشیدی برای ArcGIS ابداع کرده اند. Mastrucci و همکارانش در سال 2015 یک پلتفرم انرژی شهری هوشمند را برای ارزیابی ترکیبی مصرف برق خانوار و پتانسیل PV در مقیاس شهری برای شهر روتردام بکار بستند.

در مقایسه با باد و خورشید، انرژی زمین گرمایی کم عمق علی رغم اینکه یک انتخاب احتمالاً خوبی به دلیل موجودیت نامحدود آن است، کمتر به خوبی مطالعه شده است. این انرژی می تواند انرژی سالیانه را فراهم سازد و به عوامل خارجی مانند پوشش ابری همانند صفحات خورشیدی یا باد برای توربین های بادی بستگی ندارد. استفاده از انرژی زمین گرمایی به طور روزافزونی متداول شده است که یک نیروی حرارتی نصب شده تخمین زده شده برای استفاده مستقیم سال 2009 م معدل 48493 Mwt بوده است که نشان دهنده رشد سالیانه از 2005 تا 2010 به اندازه 11.4 درصد است. این مقدار معادل یک صرفه جویی در انرژی به اندازه 250 میلیون بشکه نفت سالیانه می باشد و یک کاهش در CO<sub>2</sub> به اندازه 107 میلیون تن می باشد. کشورهای پیشرو در واحدهای نصب شده برای استفاده مستقیم همان امریکا، چین و سوئد و المان و هلند می باشند. ولیکن یک پیشرفت آهسته این منبع انرژی به دلیل هزینه پایین نصب و صرف بودجه تاخیری اقتصادی کنونی وجود داشته است.

سوال مطرح شده در این مقاله این است که چگونه به سهولت قابلیت جایگزینی سوخت های فسیلی را با انرژی زمین گرمایی کم عمق برای رفع تقاضای گرمسازی فضا و آب گرم یک شهر ارزیابی نماییم. ما از یک روش جغرافیایی استفاده کرده ایم چرا که در مقیاس شهر، الگوی شهری به تقاضا و فضای موجود برای نصب مبدلهای حرارتی سوراخ گمانه زنی مربوط می شود. محاسبه پتانسیل روی یک قواره زمین براساس قواره زمین ارزیابی می

شود و در این مقیاس خیلی زمانبر است و از اینرو یک روش GIS ساده (سیستم اطلاعات جغرافیایی) لازم است که اینکار را انجام دهد. ما از یک روش نمونه گیری برای تعیین اینکه چه تعداد سوراخ گمانه زنی را می‌توان در هر قواره زمین قرار داد استفاده می‌کنیم و تعیین می‌کنیم که چه درصدی از تقاضای انرژی را می‌توان انگاه با انرژی زمین گرمایی تامین نمود. بعد از آن تعیین می‌کنیم که کاهش پتانسیل در صدورات CO<sub>2</sub> چقدر می‌شود اگر کلیه نصب‌های زمین گرمایی ممکنه در محل درون شهر باشند. نتایج چنین تحلیلی را می‌توان به عنوان بوسیله برنامه ریزان شهری درون پروژه MUSIC هنگام ابداع برنامه‌های اصلی پایدارتری برای آن شهر مطابق با راهکار EU2020 استفاده نمود. داده‌های قابل دسترسی آسان در روش اجرا برای تضمین این امر استفاده می‌شود که فرایند در هر شهری از پروژه MUSIC قابل تکرار است و فراتر از دسترسی به داده‌های پایه یکسان می‌باشد.

به دلیل پایگاه داده‌هایی که به سهولت موجودند، شهر Ludwigsburg به عنوان یک مطالعه موردی استفاده شده است. روش ابداعی پایه‌ای برای یک محاسبه کننده آنلاین مبتنی بر وب درون پلتفرم انرژی شهری هوشمند است که برپایه چارچوب نرم افزاری iGUESS می‌باشد. مقاله به ترتیب ذیل سازماندهی شده است . در بخش 2 ما به معرفی تکنولوژی انرژی زمین گرمایی کم عمق می‌پردازیم و متون علمی موجود درباره ارزیابی پتانسیل آن را به عنوان یک منبع انرژی تجدیدپذیر مورور می‌کنیم. در بخش 3 ما به معرفی داده‌ها و حیطه مطالعه موردی شهر Ludwigsburg می‌پردازیم. بعد از آن، ما یک توالی از روش‌های محاسباتی را ارائه کرده ایم که نامش محاسبه تقاضای انرژی، قابلیت زمین گرمایی و درصد تقاضای انرژی فراهم شده توسط انرژی زمین گرمایی در سطح قواره زمین می‌باشد. بعد ما کاهش پتانسیل در صدورات CO<sub>2</sub> را در مقیاس شهری محاسبه می‌کنیم. در بخش 4 ما نتایج هر زیرمدل را ارائه می‌کنیم. در بخش 5 ما نتیجه گیری می‌کنیم که روش تعیین پتانسیل زمین گرمایی یک شهر ساده و موثر بوده و اینکه یک کاهش معنی دار در صدورات CO<sub>2</sub> می‌تواند از طریق انرژی زمین گرمایی برای گرمسازی فضا و آب گرم استفاده شود. نیز نتیجه گیری می‌کنیم که قسمتهای مسکونی به بهترین نحوی مناسب این نوع انرژی تجدیدپذیر هستند چرا که تقاضای انرژی تقریباً پایین است و فضای کافی موجود برای نصب یک سوراخ گمانه زنی روی قواره زمین برای رفع آن تقاضا وجود دارد. این امر طراحی محله‌های مسکونی پایدار را از لحاظ فشردگی برنامه ریزی تراکم (در برخی موارد که در آن انرژی زمین گرمایی کم عمقی

را می توان استفاده کرد، یک الگوی شهری با فشردگی کمتری به طور پایدارتری درنظر گرفته می شود). به زیر سوال می برد.

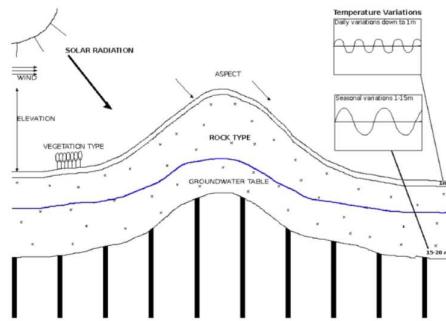
## 2- انرژی زمین گرمایی کم عمق

انرژی زمین گرمایی در کل اشاره به انرژی ذخیره سازی شده در زمین به شکل حرارت و گرما دارد. این منبع خیلی عظیم و بدام نیافتاده تجدیدپذیر انرژی است که هرگز هم تمام نخواهد شد و متحمل صدورات مربوطه CO<sub>2</sub> نمی شود. ما باید پتانسیل این منبع انرژی را برای شهرها بررسی کنیم و این کار مستلزم درک خوبی از فرایندها و تکنیک ها و نیز شناسایی شکاف دانش درون متون علمی موجود می باشد.

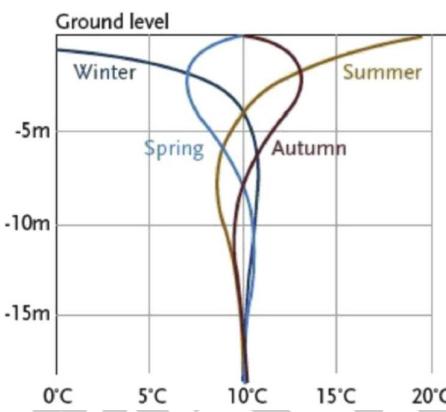
### 2-1- فرایندها، تکنیک ها و تعاریف

به دلیل هزینه بالای نصب استخراج کننده های انرژی حرارتی زمین گرمایی کم عمق (برای مثال مبدلهای حرارتی سوراخ گمانه زنی، پمپهای حرارتی منع زمین) مهمی است که یک ایده ای از قابلیت زمین برای کسب انرژی زمین گرمایی داشته باشیم. و اینکه آیا کافی است که تقاضای انرژی را در آن نقطه تحت پوشش قرار دهد یا خیر. مقدار انرژی زمین گرمایی موجود در هر محل بسته به تعدادی عوامل دارد و دو تا از مهمترین آنها تابش خورشیدی دریافتی زمین و نوع سنگ یافته شده در آن محل می باشد. انواع سنگ مختلف گرما را به شکل متفاوتی ذخیره سازی و هدایت می کنند و این عوامل بر درجه حرارت زمین در آن محل اثر می گذارد و از اینرو انرژی موجود برای استخراج نیز تحت تاثیر قرار می گیرد. سایر عوامل که می تواند اثر داشته باشد ارتفاع و ضلع شیب ها و پوشش گیاهی و شرایط اب و هوایی و حضور اب های زیرزمینی می باشد (شکل 1).

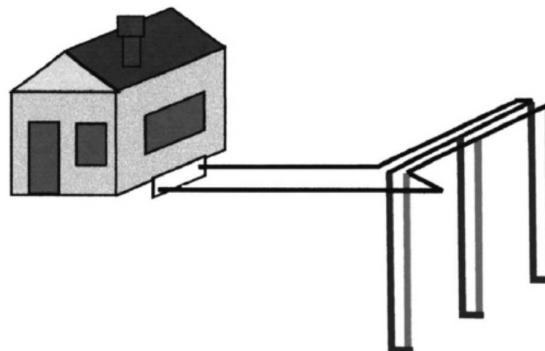
درجه حرارت سنگ یا خاک در سطح زمین و نزدیک به آن تقریباً کاملاً به گرمسازی با خورشید و خنک سازی از طریق تشعشع و تبخیر و انواع فرایندهای جذب گرما مตکی می باشد. در هر محلی درجه حرارت یک تابعی از گرما از زیر (گرادیان زمین گرمایی) و ورودی خورشیدی بوده است. اثر خورشید با عمق کاهش می یابد. درجه حرارت چندمترا بالایی زیرسطح معمولاً چند درجه کمتر از درجه حرارت هوا در تابستان بوده و چند درجه گرمرت در زمستان به دلیل تاخیر زمانی زمین برای تنظیم طبق درجه حرارت محیط می باشد. درجه حرارت سطح زیرین با عمق طبق گرادیان زمین گرمایی و زیر تقریباً 10 الی 15 متر افزایش می یابد، درجه حرارت زمین طی سال ثابت می ماند و از اینرو یک منبع خوبی را از انرژی برای گرمسازی و خنک سازی فضا ارائه می دهد (شکل 2).



شکل ۱- تأثیرات روی درجه حرارت سطحی زمین و تغییرات درجه حرارت زیرسطحی



شکل ۲- درجه حرارت زمین سالیانه انگلیس به طور تقریبی



شکل ۳- مبدل حرارتی سوراخ گمانه زنی حلقه بسته عمودی

انرژی زمین گرمایی کم عمق، که بر آن در این مقاله متمرکزیم، از گرادیان درجه حرارت میان هوا و محیط و چهارصد متر زیرسطح برای گرماسازی یا خنک سازی بناها استفاده می کند. چون درجه حرارت بین هوا و زمین به اندازه چند درجه تفاوت دارد، این تفاوت را می توان برای استخراج انرژی مورد بهره برداری قرار داد. این گرمایی زمین در مقایسه با هوا (برای مثال در زمستان) برای گرماسازی یک مایع (از طریق هدایت گرمایی) که از طریق یک لوله نصب شده درون یک سوراخ گمانه زنی در زمین جریان دارد، استفاده می شود. سپس حرارت از مایع

بوسیله پمپ حرارتی استخراج شده و برای گرم سازی بنا و فراهم سازی آب گرم استفاده می شود. در تابستان، زمین خنک تر به عنوان یک مخزن گرمایی برای هوای گرم خارج شده از بنا مورد بهره برداری قرار می گیرد. تنها استفاده از برق برای راه اندازی پمپ حرارتی لازم است که گرما را از سیستم انرژی زمین گرمایی استخراج می کند.

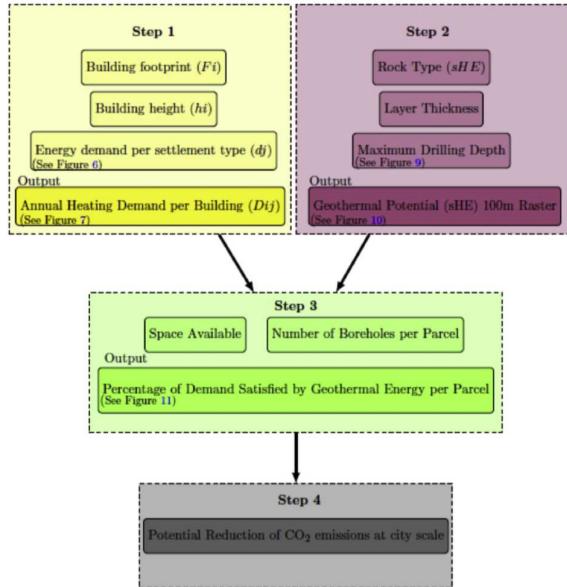
استخراج انرژی زمین گرمایی کم عمق را می توان از طریق سیستم های افقی یا عمودی در یک حلقه باز یا بسته انجام گیرد. در این مطالعه ما بر مبدلهای حرارتی سوراخ گمانه زنی حلقه بسته عمودی یا BHEها متمرکز بوده است (شکل ۳)، چرا که این سیستم ها می توانند به عمق هایی برسند که در آن درجه حرارت ثابت باقی می ماند (زیر ۵۰ متر) و نیز نیازی به مقدار بالای فضا برای نصب ندارند (با اینحساب به طور قابل بحثی برای محیطهای شهری مناسب تر هستند. BHEها معمولاً به عمق ۵۰ الی ۱۰۰ متر می باشند).

BHEها باید طبق شرایط محلی طراحی شوند. دو عامل اصلی هست که طبق آن سوراخ گمانه زنی تعیین اندازه می شود: تقاضای انرژی ساختمان (گرماسازی یا خنک سازی می تواند تقاضای اصلی بسته به شرایط آن محل باشد) و قابلیت استخراج حرارتی سوراخ گمانه زنی (یعنی مقدار انرژی زمین گرمایی که سنگها می توانند تهیه کنند).

پتانسیل کلی برای استخراج گرما در یک سنگ به شکل استخراج گرمای ویژه (sHE) انرژی به وات در هر متر طول سوراخ گمانه زنی بیان می شود. این مقدار بستگی به عواملی نظیر سنگ شناسی (نوع سنگ)، تخلخل (تخلخل بیشتر مقادیر را کاهش می دهد)، و حضور اب زیرزمینی (اب زیرزمینی انتقال حرارت را تسهیل می سازد) دارد. ترکیب مقادیر پتانسیل sHE که برای هر لایه سنگ در هر محل موجود است را می توان برای تعیین مقدار انرژی در آن نقطه به ماکزیمم عمق حفاری مجاز محاسبه نمود. این موردد برخ روشن اجراء بیشتر بحث شده است.

**جدول ۱-مقادیر تقاضای حرارتی معمول به ازای هر نوع اسکان**

Settlement types	Description	GWh/km <sup>2</sup> a	kWh/m <sup>2</sup> a
ST 1	Loose open development	25.5	57.7
ST 2	1 and 2 family house settlement	45.6	111.6
ST 3	Village core	52.5	85.0
ST 4	Terraced houses	42.5	62.6
ST 5a	Small apartment buildings	64.5	130.9
ST 5b	Small and medium apartment buildings	78.5	181.1
ST 6	Skyscrapers	101.3	145.7
ST 7a	Loose block developments	104.3	188.9
ST 7b	Dense block developments	109.5	177.2
ST 8	City buildings	117.8	162.3
ST 9	Historical old town	101.2	170.0
ST 10a	Large special public buildings	101.7	207.1
ST 11b	Commercial and service buildings	125.3	913.7



شکل 4- مراحل انجام شده در روش اجرا

جدول 2- استخراج گرمای ویژه ممکن برای مبدل حرارتی سوراخ گمانه زنی

General guideline values		Specific heat extraction (W/m) for 2400 h
<b>Underground (<math>\lambda</math> = thermal capacity)</b>		
Poor underground (dry sediment)	( $\lambda < 1.5 \text{ W/(m.K)}$ )	20
Normal rocky underground and water saturated sediment	( $\lambda < 1.5\text{--}3.0 \text{ W/(m.K)}$ )	50
Consolidated rock with high thermal conductivity	( $\lambda > 3.0 \text{ W/(m.K)}$ )	70
<b>Individual Rocks:</b>		
Gravel, sand, dry		<20
Gravel, sand, saturated water		55–65
For strong groundwater flow in gravel and sand, for individual systems		80–100
Clay, loam, damp		30–40
Limestone (massif)		45–60
Sandstone		55–65
Siliceous migmatite (e.g. granite)		55–70
Basic migmatite (e.g. basalt)		35–55
Gneiss		60–70

\*این مقادیر می تواند بر جسته ای به دلیل بافت سنگ نظیر درزها، قابلیت لایه لایه شدن، هوازدگی و غیره تغییر نماید.

جدول 3- تشکیلات سنگ و مقادیر استخراج گرمای ویژه مربوطه (sHE)

Layer name	Formation name	Predominant rock type	sHE Value (2400 h) (W/m)
S22	Quaternary	Loose gravel, sand, silt and clay sediments	20
S55	Upper middle Keuper (Schilfstein)	Sandstone, claystone, dolomite	55
S60	Gipskeuper	Claystone, dolomite, gypsum/anhydrite	55
S70	Lettenkeuper	Claystone, dolomite, sandstone	45
S75	Upper part of upper Muschelkalk lower part of upper	Limestone, dolomite, partly claystone	45
S76	Muschelkalk and upper dolomite of the middle Muschelkalk	Limestone, dolomite, partly claystone	45
S90	Gypsum formation of the middle Muschelkalk	Gypsum/anhydrite, dolomite	40
S100	Lower Muschelkalk	Limestone, marl, dolomite, partly claystone	45

پمپ حرارتی برای استخراج حرارت از مایع گرماسازی شده با وارون سازی جهت جریان طبیعی حرارت از طریق استفاده از یک کمپرسور استفاده شده است. یک پمپ حرارت از برق کمتری برای استخراج حرارت نسبت به زمانی که انرژی برق به انرژی تشعشعی تبدیل می شود برای مثال در گرمکن های تشعشعی استفاده می کند. کارایی پمپ حرارتی بستگی به کیفیت مولفه های استفاده شده و گرادیان درجه حرارت بین مایع آمده و درجه حرارت

مطلوب در بنا دارد. این کارایی را ضریب اجرای COP می نامند و نسبت انرژی مفید (انرژی تولید شده) به مصرف برق پمپ می باشد. عامل عملکرد فصلی اشاره به عملکرد کلی پمپ حرارتی روی یک فصل کامل دارد.

## 2-2-وسایل پیشرفته

مطالعات قبلی با استفاده از GIS برای ارزیابی پتانسیل انرژی زمین گرمایی انجام شده است. ولیکن این مطالعات اکثرا با هدف انرژی زمین گرمایی عمیق و انرژی حاصل از چشمehای آب گرم و آب زاها انجام شده و در مقیاس منطقه ای برای پیاده سازی کارخانجات زمین گرمایی در مقیاس وسیع انجام شده است. Blewitt در سال 2002 به ارزیابی قابلیت از طریق ایجاد مدلhای زمین شناسی برای تعیین رابطه میان درجه کرنش، گسل ها، و حضور محلهای تولید انرژی زمین گرمایی عمیق پرداخته است. Coolbaugh و همکارانش در سال 2003 یک پایگاه داده قابل دسترسی را حاوی نقشه های درجه حرارت زمین گرمایی و نیز نقشه بهره ورانه پتانسیل زمین گرمایی براساس مناطق با میزان کرنش بالای اضافی و جریان حرارتی بالا برای پیشگویی مناطقی فراهم کرده است که احتمالا پتانسیل انرژی زمین گرمایی بالایی دارند. این کار در مقیاس ملی انجام گرفت و همچنین مبتنی بر انرژی زمین گرمایی عمیقی می باشد. Lashin در سال 2014 از تحلیل تصویر ماهواره ای و یک مطالعه زمین گرمایی و نیز مطالعه دو بعدی برای شناسایی مخازن زمین گرمایی با مخازن آبگرم 46 تا 78 درجه سانتیگراد استفاده کرده اند. این مطالعه برای منطقه جنوب غربی عربستان سعودی انجام گردید. نوراللهی یک ابزار پشتیبان تصمیم گیری GIS را برای تعیین نقشه نگاری موضوعی محیط زیستی و اکتشافی رابطه فضایی ایجاد کرد که شامل تحلیل های اطلاعات زمین شناختی، ژئوشیمی، ژئوفیزیکی در مقیاس منطقه ای برای تعیین قابلیت استفاده از انرژی زمین گرمایی عمیق بوده است. این ابزار شامل انتخاب محل با همپوشانی تحلیل تناسب محیطی و پتانسیل همپوشانی برای انتخاب عرصه های انرژی زمین گرمایی مناسب می باشد.

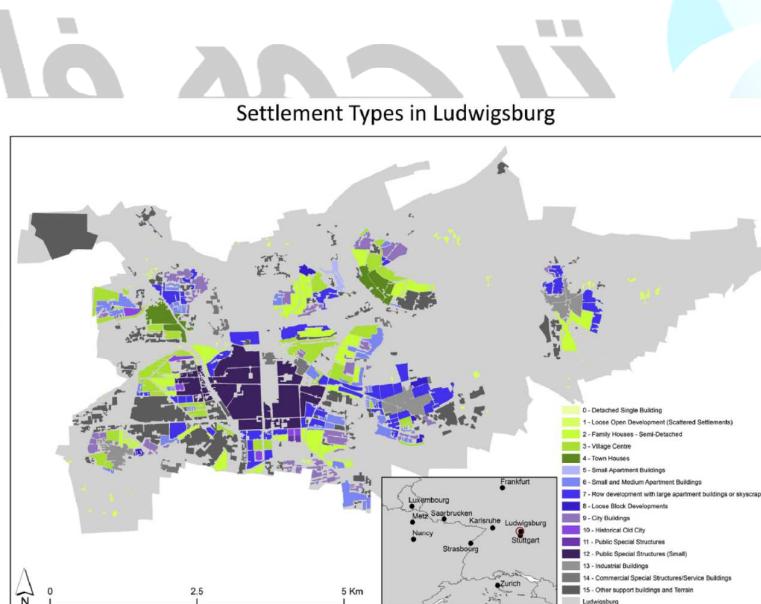
دو مطالعه دیگر در زمینه ارزیابی پتانسیل زمین گرمایی در مقیاس منطقه ای توسط Ondreka و همکارانش در سال 2007 و Gemelli و همکارانش در سال 2011 انجام گردید. Ondreka و همکارانش در سال 2007 نقشه های پتانسیل زمین گرمایی را برای دو منطقه مطالعه موردي در المان جنوب غربی ایجاد کردند که خصوصيات حرارتی زیرسطح را درنظر می گرفت (که براساس زمین شناسی و آب شناسی بوده است). زیرسطح به لایه هایی با خصوصيات حرارتی مشابه تقسیم بندی گردید و یک مقدار استخراج حرارتی خاصی به آن تخصیص داده شد، و

نقشه های متوسط اندازه گیری شده در عمق 50 و 100 متری محاسبه شد. آنها با این نقشه ها نشان دادند که چگونه استخراج گرمای ویژه بین مناطق فرق دارد و به عمق بستگی دارد. Gemelli و همکارانش از یک نقشه پتانسیل زمین گرمایی منطقه ای استفاده کردند که از پارامترهای فیزیکی مشتق شده بود تا یک مجموعه شاخصه های اقتصادی را برای ارزیابی قابلیت دسترسی اقتصادی حقیقی به منبع انرژی زمین گرمایی محاسبه کند.

در کل ما می بینیم که یک نیازی از اینزو برای ایجاد یک مدل فضایی وجود دارد که می تواند در مقیاس محلی برای تعیین قابلیت استفاده از انرژی زمین گرمایی کم عمق استفاده شود که به سهولت برای بهره گیری کل دنیا در دسترس است و تنوعاتی را در انرژی پتانسیل براساس زمین شناسی پایه درنظر می گیرد.

مزیت استفاده از منابع تجدیدپذیر نظیر انرژی زمین گرمایی کم عمق کاهش صدورات CO<sub>2</sub> است. Blum و همکارانش در سال 2010 این پتانسیل را در مقیاس منطقه ای برای جنوب غربی المان ارزیابی کردند و دریافتند که صرفه جویی به اندازه 35 درصد برای ترکیب برق ملی و 72 درصد برای ترکیب برق منطقه ای امکان پذیر

است.



شکل 5-توزيع انواع اسکان در شهر Ludwigsburg

صرفه جویی ها به شدت به برق مورد نیاز برای پمپ حرارتی، و نیز کارایی نصب مبدل حرارتی سوراخ گمانه زنی متکی است. آنان نتیجه گرفتند که از صدورات اضافی CO<sub>2</sub> می توان از طریق استفاده از انرژی زمین گرمایی کم عمق برای گرم سازی و خنک سازی ساختمانها اجتناب نمود. Sauer و همکارانش در سال 2010 نتیجه گیری از ارزیابی چرخه زندگی شان درباره نصب زمین گرمایی کردند که صرفه جویی در CO<sub>2</sub> از انرژی زمین گرمایی

بستگی بارزی به برق استفاده شده توسط پمپ حرارتی و شرایط آب و هوایی و ورود قابلیت های خنک سازی منفعانه همراه با نقش اندکی از طریق تراوش مایع حامل حرارت به زمین و تجزیه کارایی پمپ گرمایی دارد. اصالت این کار در ترکیب یک مدل GIS برای تعیین پتانسیل استفاده از انرژی زمین گرمایی به کمک ارزیابی کاهش ممکن در صدورات CO<sub>2</sub> نهفته است که این کار می تواند منجر به آن شود اگر انرژی زمین گرمایی برای گرمسازی فضا و آب گرم اجرا شود.

### 3-داده ها و روش اجرا

#### 3-1-مطالعه موردي: شهر Ludwigsburg

کار ارائه شده در این مقاله براساس داده های شهر Ludwigsburg است که یکی از پنج شهر شرکت کننده در پروژه MUSIC می باشد<sup>3</sup> که هدفش کمک به این شهرها برای کاهش صدورات CO<sub>2</sub> به اندازه 20 درصد تا سال 2020 می باشد.

شهر Ludwigsburg یک شهر با تقریبا 87 هزار ساکنین آن است که در شمال شهر Stuttgart واقع است. این شهر برنامه انرژی از سال 2004 داشته است و تفکر پیش رو در شیوه خود برای تغییر آب و هواء، انرژی های تجدیدپذیر، امنیت انرژی و کیفیت هوای محلی دارد. شهر Ludwigsburg بخشی از تشکیلات Baden-Wurttemburg است که در آن دو واحد زمین شناسی اصلی یعنی لایه زیرین کریستال و مقدار زیادی رسوبات وجود دارد. سنگهای لایه زیرین اساسا از سنگ نیس و گرانیت تشکیل شده است. بار رسوبات روی لایه زیرین کریستال را می پوشاند و در انواع شیوه ها و تنظیمات ته نشین شده است.

در شهر Ludwigsburg ، انواع سنگ اصلی که داریم همان لاکوسترین، رسوبات رودخانه و دریا در تشکیلات (243–235 Ma) و Muschelkalk (251–243 Ma)، Buntsandstein (235–200 Ma) Keuper می باشد.

<sup>3</sup> نشانی وب سایت پروژه MUSIC

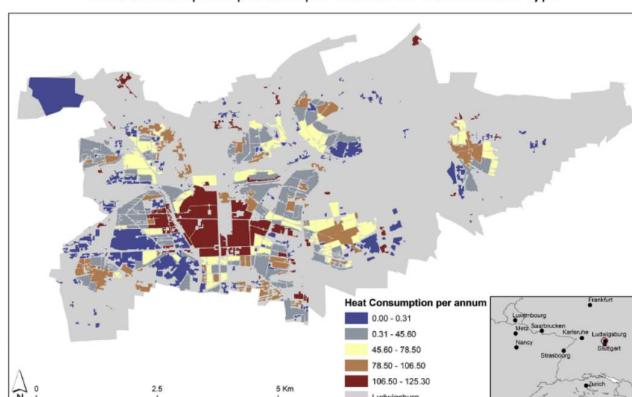
<sup>5</sup> The MUSIC Project,<http://www.themusicproject.eu>.

انواع سنگ اصلی مربوط به این تشکیلات ماسه سنگ، گل سنگ، سنگ آهک، دولومیت، سنگ گچ و آنهیدریت و شن و گل با فشردگی خیلی کم می باشد. مهم است انواع سنگ غالب را در یک تشکیلات و ضخامت لایه را بدانیم چرا که اینها بر مقدار استخراج حرارت ویژه کل مربوط به آن تشکیلات سنگ اثر خواهد گذاشت.

### 3-روش اجرا

روش ابداعی این مطالعه شامل 4 مرحله می باشد: برای محاسبه 1) تقاضای گرما، 2) استخراج گرمایی ویژه، 3) درصد تقاضایی که توسط انرژی زمین گرمایی در هر قواره تامین می شود و 4) کاهش پانسیل CO<sub>2</sub> وقتی که از انرژی زمین گرمایی برای گرمسازی فضا و آب گرم استفاده می شود. برای تکثیر آسان برای سایر شهرها با دسترسی به همان داده ها این کار را ساده نگه داشته ایم. روش اجرا چهار بخش دارد.

Heat Consumption per km<sup>2</sup> per Annum for a Settlement Type



شکل 6- تقاضای انرژی بر حسب نوع اسکان (d) در شهر Ludwigsburg

به واحد (GWh/a)

ابتداء، ما الزامات انرژی گرمسازی آب گرم و فضا را برای هر قواره زمین براساس حجم بنا و مقادیر تقاضای انرژی مربوطه بر حسب نوع اسکان که بناها در آن طبقه قرار می گیرند، محاسبه کردیم. یک نوع اسکان همان ترکیبی از انواع مختلف بنا درون یک حیطه خاص است (برای مثال مرکز شهر که حاوی تعداد انواع زیادی بنا می باشد (جدول 1). ما از توپولوژی اسکان که توسط موسسه اقتصاد در دانشگاه Stuttgart و ایجاد شده است، و مصرف سهمیه بندی انرژی IER استفاده کردیم. داده های منطقه ای درباره نوع اسکان برای داشتن یک مقدار تقاضای انرژی در هر بنا جمع بندی نشد. این کار با تبدیل یک مقدار مصرف برای یک منطقه بندی نوع اسکان در هر کیلومتر مربع به مقدار مصرف در هر بنا که درون یک نوع اسکان قرار می گیرد انجام گرفته است.

دوم اینکه، پتانسیل استخراج گرمای ویژه زیرسطح با استفاده از داده های سوراخ گمانه زنی تغییر داده شده (نوع سنگ و ضخامت لایه) همراه با ماقزیم عمق حفاری مجاز برای تعیین مقدار انرژی که می تواند طبق ماقزیم عمق حفاری استخراج شود، محاسبه گردید.

سوم، این نتایج در کنار نتایج از یک فرایند نمونه گیری استفاده گردید تا تعداد سوراخهای گمانه زنی تعیین شود که در هر قواره زمین قرار می گیرد، تعداد و طول سوراخهای گمانه زنی که لازم است تا نیازهای انرژی گرمسازی فضا و آب گرم را رفع سازد، و نیز درصد الزامات انرژی که می تواند توسط انرژی زمین گرمایی کم عمق در هر قواره زمین فراهم شود. سرانجام اینکه، کاهش احتمالی در صدورات گاز  $CO_2$  با فراهم سازی همه گرمسازی فضا و الزامات آب گرم با انرژی زمین گرمایی کم عمق با تعیین نقش صدورات  $CO_2$  توسط گرمسازی فضا و آب گرم و تعیین درصد کل صدوراتی که تشکیل می دهند برای تعیین کاهش پتانسیل محاسبه گردید.

شکل 4 نشان دهنده مراحلی است که دنبال شده تا به این اهداف دست یابیم.

### 3-2-1-محاسبه تقاضای انرژی گرمایی (مرحله 1)

روش اجرا از مقاله Dorfner تبعیت می کند. داده های ذیل برای محاسبه تقاضای انرژی گرمایی برای آب گرم و گرمسازی فضا در هر ساختمان استفاده گردیده است: نقشه های ساختمان  $F_i$  ، ارتفاع ساختمان  $d_i$  ، و تقاضای انرژی گرمایی فضا و آب گرم در هر ساختمان براساس نوع اسکان  $h_i$ . در این تپولوژی، ساختمانها مصرف انرژی طبق نوع اسکان دسته بندی شده خود دارند. هر تپولوژی اسکان یک مقدار تراکم مصرف گرمایی سالیانه به واحد  $GWh/a$  دارد. یک مقدار در هر کیلومتر مربع اسکان براساس کل مساحت هر نوع اسکان به واحد  $GWh/km^2a$  محاسبه گردید. بعد به مقدار به ازای هر بنا براساس اندازه بنا و نوع اسکانی که مربوط می باشد به واحد  $kWh/m^2a$  تبدیل می شود. ما یک دامنه مقادیر از 40 الی 455  $kWh/m^2a$  را بدست آورده ایم که متعلق به مقادیر متداول تقاضای گرمسازی فضا در هر مترمربع در سال می باشد (جدول 1).

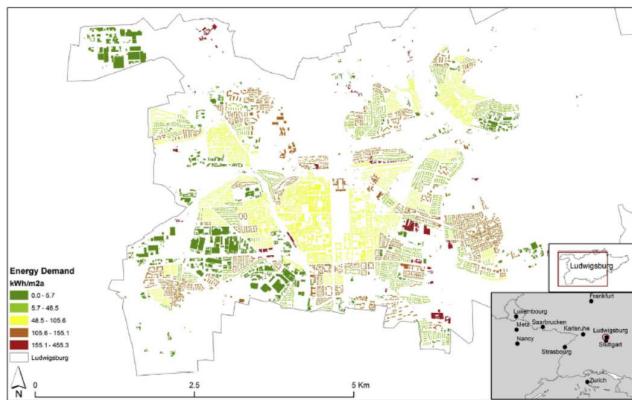
تقاضای گرمسازی فضا و آب گرم در هر بنا به واحد  $(D_{ij})$  به ترتیب ذیل محاسبه می شود:

$$D_{ij} = 1.2d_j A_i \quad (1)$$

که در آن  $d_j$  تقاضای گرمسازی مربوط به یک نوع ساختمان به واحد  $A_{ij}$  است و کل مساحت یک

بنا می باشد، 20 درصد این تقاضا اضافه می شود تا انرژی مورد نیاز برای آب گرم به حساب آید.

Annual Energy Demand for Space Heating and Hot Water in Ludwigsburg



شکل 7- تقاضای گرمسازی سالیانه محاسبه شده در هر قواره زمین  $(D_{ij})$  به واحد  $(MWh/a)$

مقدار 20 درصد یک فرضیه براساس اندازه گیری محلی می باشد. مساحت بنا با معادله ذیل محاسبه می شود:

$$A_i = F_i n_i$$

(2)

که در آن  $F_i$  مساحت چندضلعی ساختمان است و  $n_i$  تعداد طبقات ساختمان می باشد.

تعداد طبقات ساختمان با استفاده از معادله ذیل محاسبه گردید:

$$n_i = 0.32(h_i - 2.5m)$$

(3)

که در آن  $h_i$  ارتفاع ساختمان به متر است و طبق منبع Dorfner سال 2011 در 0.32 ضرب می شود که

معادل متوسط ارتفاع طبقه 3125 متری است. دو و نیم متر از ارتفاع کم می شود تا بخاطر فضای سقف تصحیح

شود که در مساحت مورد نیاز برای گرمسازی فضای لحاظ نمی شود.

نقشه بنا و داده های بردار ارتفاع بنا از شهر Ludwigsburg دریافت گردید. بنها از محاسبات وقتی اطلاعات

ارتفاعشان در دست نبود حذف شدند.

## 2-2-3-محاسبه قابلیت انرژی زمین گرمایی (مرحله دو)

قابلیت انرژی زمین گرمایی با تعیین پتانسیل استخراج گرمای ویژه در زیرسطح شهر Ludwigsburg با استفاده

از یک مدل زیرسطح 3 بعدی جمع آوری شده از داده های سوراخ گمانه زنی فراهم شده توسط تحقیقات زمین

شناسی Freiburg محاسبه گردید.<sup>۴</sup> این مدل سه بعدی به شکل مجموعه‌ای از نقاط با مختصات  $x, y, z$  و داده‌های صفت مربوطه از جمله ارتفاع، عمق پایه هر تشکیل زمین شناسی، پتروگرافی، چینه شناسی و ماکزیمم عمق حفاری مجاز در هر نقطه فراهم گردیده است.

استخراج حرارت ویژه (SHE) در هر لایه با ضرب ض خامت لایه در مقدار SHE معین در خط مشی VDI برای بهترین نوع سنگی که متناسب با نوع سنگ غالب پیدا شده در تشکیلات می‌باشد، (نتایج به وات) و جمع بندی مقادیر برای هر لایه تا ماکزیمم عمق حفاری ماکزیمم مجاز محاسبه گردید. مقادیر معمول بین 40 و 70  $\text{W/m}^3$  می‌باشد. SHE برای هر نوع سنگ می‌تواند یا به طرز صحیحی از روی اندازه گیری‌ها در محل برای سیستم‌های بزرگ یا طبق مورد ما با استفاده از تخمین‌های محاسبه شده توسط VDI در آلمان برای هر نوع سنگ اصلی محاسبه گردد. VDI یک مجموعه خط مشی‌ها به نام «استفاده حرارتی از زیرزمین – پمپهای حرارتی منع زمینی» دارد که مقادیر استخراج حرارتی ویژه را برای انواع مختلف سنگ کلی فهرست می‌کند. این تخمین‌ها براساس ساعات کار سالیانه مختلف از 1800 الی 2400 ساعت می‌باشد. در این خصوص ما 2400 ساعت را درنظر می‌گیریم که یک تخمین واقع گرایانه‌ای برای تعداد ساعات لازم برای گرماسازی فضا و آب در یک سال در آلمان می‌باشد. جدول 2 فهرستی از مقادیر استخراج حرارتی ویژه برای انواع سنگ کلی بنا به VDI می‌باشد.

جدول 3 نشان دهنده تشکیلات صخره، نوع صخره و مقدار مربوطه SHE برای آندهسته تشکیلاتی است که در ناحیه Ludwigsburg یافت می‌شود، که مقادیر آن از جدول 2 برگرفته شده است. حد پایینی این دامنه بنا به VDI در محاسباتی استفاده شده چرا که بهتر است پتانسیل زمین گرمایی را به جای تخمین بیش از حد، کمتر از حد تخمین بزند.

کل پتانسیل SHE مشتق از پارمترهای بالا بنابراین با ضرب در 2400 ساعت کاری سوراخ گمانه زنی در سال برای بدست آوردن پتانسیل سالیانه SHE در هر نقطه (مقادیر به  $\text{MWh/a}$  می‌باشد) بوده است.

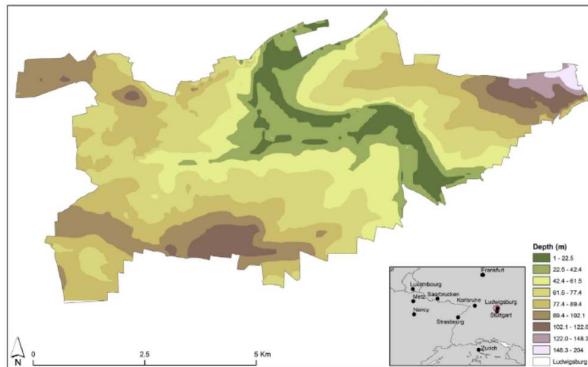
<sup>4</sup> ۶- نشانی وب سایت

<sup>6</sup> <http://www.lgrb.uni-freiburg.de/lgrb/home>.



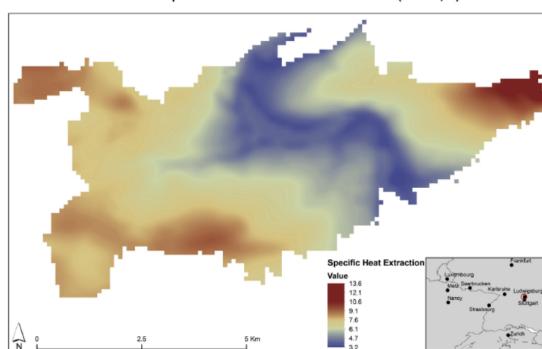
شکل 8- تقاضای گرماسازی و انرژی تحت پوشش پتانسیل زمین گرمایی در پلتفرم انرژی شهر هوشمند برای هر قواره ممیزی زمین. مثال نمونه گیری نشاندهنده سوراخهای گمانه زنی احتمالی به شکل دایره های سفید است که در حدفاصله بین 6 و 3 متر با فراز حاشیه قواره زمین ممیزی لحاظ شده است.

Maximum Allowable Drilling Depth in Ludwigsburg (m)



شکل 9- ماکریمم عمق حفاری به متر

Annual Specific Heat Extraction Potential (MWh/a)



شکل 10- پتانسیل زمین گرمایی محاسبه شده (sHE) به واحد (MWh/a)

3-2-3- تقاضای فراهم شده توسط انرژی زمین گرمایی در هر قواره زمین (مرحله سوم)

مرحله بعدی تعیین تعداد و طول سوراخهای گمانه زنی در هر قواره زمین برای تامین انرژی زمین گرمایی کافی

جهت تامین تقاضای ساختمان در آن محل بوده است. برای این محاسبه تقاضای انرژی در هر ساختمان ( $D_{ij}$ )، قابلیت استخراج گرمایی قواره زمین مربوطه (SHE) و فضای موجود برای نصب سوراخهای گمانه زنی لازم بود. دوتای اولی مانند شرح فوق محاسبه شد در حالیکه سومی به فضای باقیمانده روی زمینی اشاره دارد که وقتی بنا و منطقه بافر سه متری حذف می شود باقی می ماند. این قسمت با استخراج نقشه اولیه بنا از قواره زمین و حذف بافر سه متری دور قواره و مرزهای ساختمان برای ترسیم مساحت موجود برای سوراخهای گمانه زنی محاسبه گردید.

برای محاسبه تعداد سوراخهای گمانه زنی که می تواند در یک فضای موجود قرار گیرد، یک روش نمونه گیری برای قرارگیری تصادفی یک شبکه منظم از نقاط به فاصله 6 متر از هم در یک فضای موجود استفاده گردید. 6 متر به عنوان فاصله مناسبی بین سوراخهای گمانه زنی برای اجتناب از تخلیه حرارتی برای سوراخهای گمانه زنی به طول 50 الی 100 متر صورت گرفت. این فرایند ده بار تکرار شد و تعداد نقاط قرارگرفته در هر چندضلعی هر بار شمارش شد. برای نتایج واقع گرایانه تری، ما از حداقل تعداد سوراخهای گمانه زنی شمارش شده درون هر قواره زمین استفاده کرده ایم، بعد از آن همه تکرارها کامل بوده چرا که آندسته چندضلعی هایی که شکل فرد داشتند و نواحی خیلی کوچکی که برای نصب سوراخهای گمانه زنی واقع گرایانه نبودند حذف گردیدند.

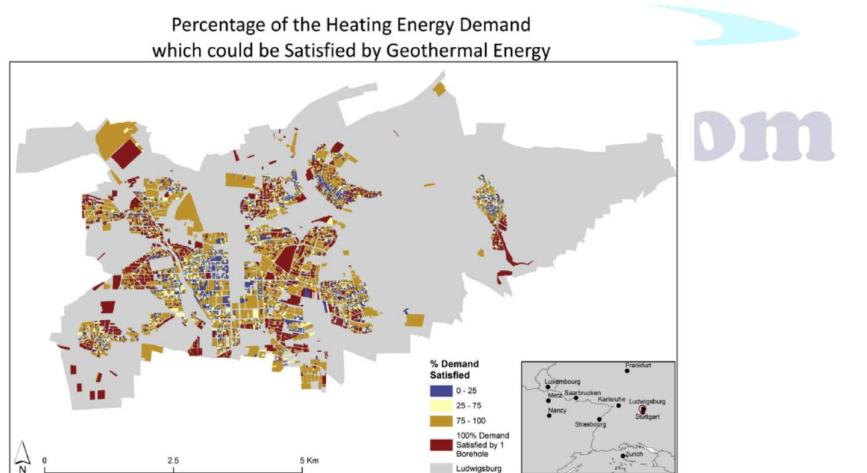
با درنظرگیری تعداد سوراخهای گمانه زنی که می تواند در هر قواره زمین قرار گیرد، تعداد لازم با درنظرگیری اینکه کلیه سوراخهای گمانه زنی تا ماکزیمم عمق حفاری مجاز حفاری شده اند برای تعیین درصد تقاضای انرژی در هر قواره زمین محاسبه گردید تا درصد تقاضای انرژی در هر قواره زمین که می تواند از طریق انرژی زمین گرمایی فراهم شود، تعیین شود. بسته به تقاضا و اندازه بسته، همه سوراخهای گمانه زنی که می توانند در یک قواره زمین باشد مورد نیاز نیست و گاهی اوقات فقدان فضا بدان معناست که تقاضا را نمی توان رفع کرد. این محاسبه با استفاده از R-script که بر حسب تقاضا در اختیار نویسندهای قرار گرفته انجام گردید.

#### 4-2-3-کاهش احتمالی صدورات CO<sub>2</sub>

سپس ما کاهش احتمالی صدورات CO<sub>2</sub> را ارزیابی کردیم اگر انرژی زمین گرمایی کم عمیقی برای گرماسازی فضا و آب گرم استفاده شود. برای تعیین اینکه این احتمال چیست لازم بود ابتدا صدورات CO<sub>2</sub> مربوط به گرماسازی

فضا و آب گرم و نیز پمپ حرارتی تعیین شود. این مورد از کل مزیت کاهش صدورات کل CO<sub>2</sub> کسر می‌شود. یک COP برابر با 3.2 بکار گرفته شد یعنی برای هر 3.2 kW انرژی تولیدی توسط پمپ حرارتی، 1 kW برق برای استخراج این انرژی استفاده می‌شود. صدورات CO<sub>2</sub> با ضرب مصرف انرژی در صدورات CO<sub>2</sub> مربوطه (به گرم CO<sub>2</sub> در سال) محاسبه گردید. برای قسمت گرماسازی فضا و آب گرم که در اثر برق باشد، لازم بود برق را به انواع روشها تقسیم بندهی نمود (برای مثال هسته‌ای، گاز طبیعی و غیره). این کار طبق متوسط ترکیب برق برای المان انجام گرفت.<sup>۵</sup>

از این مقادیر، درصد کل صدورات CO<sub>2</sub> در اثر گرماسازی فضا محاسبه گردید (منهای CO<sub>2</sub> در اثر استفاده از پمپ حرارتی) که منجر به این امر گردید که درصد احتمالی برای کاهش صدورات CO<sub>2</sub> باید همه انرژی زمین گرمایی احتمالی را مصرف کند. این مقادیر با ضرب مصرف انرژی نهایی کنونی برای گرماسازی فضا و آب گرم به ازای حامل برای آن حامل ویژه محاسبه گردید. مقادیر صدورات CO<sub>2</sub> به واحد g/kWh در مقدار مربوطه برای صدورات CO<sub>2</sub> به واحد



شکل 11- درصد تقاضای انرژی گرماسازی که می‌تواند در اثر انرژی زمین گرمایی به ازای هر قطعه زمین فراهم شود.

جدول 4- محاسبه صدورات CO<sub>2</sub> که در اثر مصرف انرژی برای گرماسازی فضا و آب گرم بوجود آمده است.

<sup>5</sup>- نشانی وب سایت:

<sup>7</sup> <http://www.unendlich-viel-energie.de/en/details/article/4/the-electricity-mix-in-germany-2010.html>.

Energy carrier	Electricity mix	Percentage contributed to electricity mix	Final energy consumption for space heating and hot water (GWh/a)	Associated grams CO <sub>2</sub> Emissions per kWh (g/kWh)	CO <sub>2</sub> emissions for space heating and hot water for each energy source (kTCO <sub>2</sub> /a)
Gas Fuel oil Electricity	Nuclear	22%	412.3	201.0	82.8
	Natural gas	13%	344.8	275.8	95.1
	Lignite	23%	14.0	19.7	0.3
	Hard coal	19%	8.3	201.0	1.7
	Renewable energies	17%	14.6	364.0	5.3
	Other sources	6%	12.1	333.7	4.0
			10.8	0	0
District heating			3.8		0
Coal			44.3	394.7	17.5
Wood			4.0	333.7	1.3
Solar			3.3	340	1.1
			1.1	10	0.0114
			Total final energy consumption for space heating and hot water (GWh/a)	873.5	Total CO <sub>2</sub> emissions for space heating and hot water (kTCO <sub>2</sub> /a)
					209.2

جدول 5- صدورات CO<sub>2</sub> همراه با یک پمپ گرمایی (CoP به اندازه 3)

Heat pump	GWh/a per electricity type	Assoc gCO <sub>2</sub> /kWh per electricity type	Electricity type	Share provided by electricity type	tCO <sub>2</sub> /a contributed by each electricity type
Electricity	60.0	19.70	Nuclear	22%	1.2
	35.5	200.95	Natural gas	13%	7.1
	62.8	364.03	Lignite	23%	22.9
	51.9	333.72	Hard coal	19%	17.3
	16.4	0	Other	6%	0
	46.4	0	Renewables	17%	0
				CO <sub>2</sub> emissions contributed by the heat pump with a CoP of 3.2 (kTCO <sub>2</sub> /a)	48.5

#### 4- نتایج و بحث

##### 4-1- تقاضای انرژی حرارتی و گرمایی

جدول 1 نشان دهنده نتایج محاسبات مقادیر مصرف حرارتی به ازای نوع اسکان (d<sub>ij</sub>) به واحد kWh/m<sup>2</sup>a می باشد و توزیع این انواع اسکان در شکل 5 نشان داده شده است.

توزیع مصرف انرژی نشان دهنده مقادیر بالاتر مربوط به مرکز شهر می باشد که در آنجا بناهای بزرگتری نظیر برجهای بلند و اپارتمانهای بلوکی متتمرکز می باشند. مقادیر کمتر دورتر از مرکز یافت می شوند در نواحی حومه که در آنجا بناهای از نوع مسکونی (خانه های خانوادگی تکی و دوبلكس، روستاهای ییلاقی و خانه های تراس دار) یافت می شود. می توان این مورد را در شکل 6 دید.

نتایج محاسبه تقاضای انرژی برای گرم سازی فضای آب گرم به ازای هر ساختمان (D<sub>ij</sub>) در شکل 7 نشان داده شده است.

محاسبه تقاضای انرژی حرارتی به ازای هر قواره زمین به نتایجی در دامنه های مورد انتظار دست یافته است. مقادیر محاسبه شده به ازای نوع اسکان بر حسب مقادیر محاسبه شده به ازای قواره زمین بر حسب اینکه چگونه مصرف انرژی کل نوع اسکان در میان کلیه قواره های کوچکتر از همان نوع توزیع شده است متفاوت است. هرچند تقاضای انرژی می تواند خیلی بالا نباشد، قواره زمین می تواند به دلیل فقدان فضای نامناسب، برای مثال

در شهر فشرده تر قواره های زمین از نوع اسکان ، برای نصب تعداد لازم سوراخ های گمانه زنی، باقی بماند. اطلاعات مفصلتری در زمینه مصرف گرما به ازای نوع ساختمان، به جای استنباط از روی نوع اسکان (که مصرف متوسط را به ازای همه ساختمانهایی که در هر نوع اسکان قرار دارند بدست می دهد) منجر به مصرف صحیح تر حرارت شده و ازا ینرو مقادیر تقاضای انرژی حرارتی صحیح تری بدست می آید. در زمان ابداع آن، داده های مصرف حرارتی بر حسب نوع بنا برای شهر Ludwigsburg در اختیار نبود.

این نتایج در پلتفرم انرژی شهر هوشمند (که با iGuess توانمند شده) برای کاربران جهت تصور فرایند موجود است. این ها لایه های تعاملی است که در آن طراحان شهر و متخصصان انرژی، نظیر موسسات انرژی، می توانند اطلاعاتی را بازیابی کرده و لایه های مختلف را برای تحولات بیشتر برنامه های پایاتر اصلی ملحق کرده و درباره این اندازه گیری ها تصمیم بگیرند که صدورات CO<sub>2</sub> را در کل شهر با شرکت های بخش دولتی و خصوصی احتمالی کاهش می دهد یا نه. لایه نمونه گیری مثالی از الگوریتم های بهینه سازی سوراخ گمانه زنی برای ارائه یک طراحی نمونه گیریا حتمالی در کل شهر می باشد. یک مثال از خروجی می تواند در شکل 8 دیده شود.

## 2- انرژی پتانسیل زمین گرمایی

استخراج گرمایی ویژه  $\text{SHE}$  با استفاده از عمق حفاری ماکزیمم مجاز و نوع سنگ و ضخامت لایه ها محاسبه می شود. شکل 9 نشان دهنده ماکزیمم عمق حفاری در شهر Ludwigsburg براساس حضور یک لایه آبزای آب زیرزمینی عمیق می باشد. دلیل این عمق های حفاری مجاز خیلی کم عمق نزدیک به رودخانه Neckar این است که بالای آبزای نزدیک به سطح این محل واقع شده است. بدور از رودخانه، ماکزیمم عمق حفاری افزایش می یابد و ماکزیمم عمق مجاز در انتهای شمال شرقی ناحیه می باشد. عمق حفاری کم عمق تر از مسیر رودخانه Neckar و رودهای فرعی آن پیروی می کند.

کل قابلیت استخراج گرمایی ویژه  $\text{SHE}$  در زیرسطح تا به پایین ماکزیمم عمق حفاری در یک مرحله دومی محاسبه گردید و نتایج در شکل 10 امده است. مساحت ها با بالاترین قابلیت مربوط به نواحی است که در آن ماکزیمم عمق حفاری مجاز بسیار زیاد است.

ازا ینرو شمال شرقی شهر متتحمل هم عمیق ترین عمق حفاری و هم بالاترین قابلیت  $\text{SHE}$  می باشد. پایین ترین مقادیر در طول روند رودخانه یافت شده که در ان حفاری امکان ندارد یا اینکه مجاز نمی باشد.

محاسبه قابلیت استخراج گرمایی خاص در شهر Ludwigsburg صحیح تر از مطالعات قبلی نظری محاسبه SHE می باشد که در آن متوسط SHE استفاده می شود و مقادیر خاص انواع صخره یافت نمی شود، و یک عمق حفاری مشترک برای محاسبه قابلیت SHE استفاده شده است. روش ما این قسمت را با فرض نوع سنگ، ضخامت لایه و ماکزیمم عمق حفاری هنگام محاسبه قابلیت SHE بهبود داده است. ولیکن علی رغم این بهبودها تغییرات در SHE بازتاب تغییر در ماکزیمم عمق حفاری مجاز به جای هر گونه تغییر اصلی و عمدۀ در زمین شناسی زیربنایی می باشد چرا که هر چند لایه های زمین شناسی در زیرسطح ضخامت متفاوتی در نواحی مختلف دارند، انواع سنگ مختلفی دارای مقادیر استخراج حرارت ویژه مشابهی می باشند (جدول 3). با اینحساب به دلیل ساختار زیربنایی بسیار همگن، رابطه بین عمق حفاری ماکزیمم و پتانسیل استخراج حرارت ویژه اکثرا خطی باقی می ماند. این امر تا حد زیادی در نواحی با انواع سنگ ریزه متنوع تر و ساختار زمین شناختی پیچیده متغیرتر است.

جدول 6- کاهش احتمالی در CO<sub>2</sub> از طریق استفاده از انرژی زمین گرمایی

کل صدورات CO <sub>2</sub> کل برای گرمسازی فضا و آب گرم (kTCO <sub>2/a</sub> ) Ludwigsburg	209.2
کل صدورات CO <sub>2</sub> برای شهر Ludwigsburg	539
درصد صدورات CO <sub>2</sub> که در اثر گرمسازی فضا و آب گرم بوده است.	38.8%
صدورات CO <sub>2</sub> که در اثر پمپ حرارتی با COP برابر با 3.2 (kTCO <sub>2/a</sub> ) بوده است.	48.5
درصد صدورات CO <sub>2</sub> که در اثر یک پمپ حرارتی با COP برابر با 3.2 بوده است.	8.9%
درصد کاهش احتمالی صدورات CO <sub>2</sub> با استفاده از انرژی زمین گرمایی برای گرمسازی فضا و آب گرم	29.7%

#### 3- تقاضایی که با انرژی زمین گرمایی در هر قطعه زمین رفع شده است.

ترکیب پارامترهای فوق (تقاضای انرژی گرمسازی به ازای هر قطعه زمین، SHE در هر قطعه زمین و تعداد ماکزیمم سوراخهای گمانه زنی در هر قطعه زمین) تعداد و طول سوراخهای گمانه زنی لازم برای رفع تقاضای انرژی حرارتی را در هر قطعه زمین بدست می دهد و درصد این تقاضا که می تواند توسط انرژی زمین گرمایی در هر قطعه زمین رفع شود، که در شکل 11 نشان داده شده است. قواره های زمین که می توانند صد درصد تقاضای انرژی را برای گرمسازی فضا و آب گرم از طریق انرژی زمین گرمایی رفع سازند مربوط به 40 درصد کل قواره های زمین می شود. این قواره های زمین ظاهرا اکثرا آنهایی است که بیشتر از نوع مسکونی بوده و تقاضای انرژی کمتری داشته

و فضای کافی برای نصب سوراخهای گمانه زنی دارند. این قواره های زمین به طور غالب در بخشهایی از حومه شهر می باشد که در آنجا توسعه مسکن وجود داشته است.

در حالیکه 40 درصد از قواره های زمین می تواند به لحاظ تئوریکی همه تقاضای انرژی را از طریق انرژی زمین گرمایی فراهم سازند، گاهی اوقات تعداد سوراخهای گمانه زنی لازم برای انجام چنین کاری به طور غیرواقع گرایانه ای بالا می باشد. هرچند فضا می تواند بالحاظ تئوریکی قابل دسترس باشد، یک تعداد زیادی سوراخهای گمانه زنی نصب شده در یک قطعه زمین امکانپذیر نمی باشد، و فوق العاده هم هزینه بر می باشند. از اینرو، سوراخهای گمانه زنی کمتری لازم است تا تقاضای انرژی را بهتر رفع سازد. شکل 11 نشان دهنده آندسته قواره زمین هایی است که نیاز به تنها یک حفاری دارند تا تقاضای انرژی را برآورده سازند. این قواره های زمین ماهیت مسکونی داشته و 30.4% زمین ها را تشکیل می دهند.

برای محاسبه درصد تقاضا که می تواند با انرژی زمین گرمایی برطرف شود، این فرض انجام گرفته است که همه فضای موجود روی قطعات زمین قابل دسترسی برای دکه حفاری جهت نصب سوراخهای گمانه زنی می باشد. ولیکن در واقعیت چنین نیست که یک فضای موجودی برای مثال از طریق جاده غیرقابل دسترس باشد. در اینده، کارهای آتی را می توان در این بخش از روش اجرا انجام داد تا قابلیت دسترسی به فضای موجود از طریق جاده ها، اتوبانها درنظر گرفته شود و تضمین شود که روزنه ها به قدر کافی برای دکه های حفاری بزرگ باشد.

#### 4-4 کاهش احتمالی در صدورات CO<sub>2</sub>

نتایج محاسبه کاهش درصد احتمالی در صدورات CO<sub>2</sub> از طریق استفاده از انرژی زمین گرمایی برای گرماسازی فضا و آب گرم در جداول 4 الی 6 ارائه شده است.

این مقادیر با استفاده از تجزیه مصرف انرژی برای گرمایش فضا و آب گرم در آلمان و نیز گرم های مربوطه صدورات CO<sub>2</sub> برای هر نوع حامل انرژی محاسبه گردید. مقدار CO<sub>2</sub> ساطع شده از طریق انرژی مصرفی برای گرماسازی فضا و آب گرم برابر با 209.2 kTCO<sub>2</sub>/a میباشد. این مقدار معادل 38.8% کل صدورات CO<sub>2</sub> برای Ludwigsburg (برای گرماسازی فضا و آب گرم) می باشد. مقدار انرژی لازم برای انجام یک پمپ حرارتی با یک ضریب همبستگی عملکرد (COP) برابر با 3.2 نیز باید به حساب آید. این مورد بالغ بر 272.0 GWh/a می شود که منجر به 48.5 kT CO<sub>2</sub> یا 8.9% صدورات کل می شود.

با این حساب، قابلیت کاهش صدورات CO<sub>2</sub> با جایگزینی کلیه گرم سازی فضای کنونی و الزامات آب گرم بوسیله انرژی زمین گرمایی، برابر با 29.7 درصد است (از جمله با نقش پمپ حرارتی). ولیکن اگر قرار بود تنها آندسته املاکی را در نظر بگیریم که می توانستند صدرصد تقاضای تامین شده توسط یک سوراخ گمانه زنی را داشته باشند که به انرژی زمین گرمایی تغییر می کرد، کاهش صدورات CO<sub>2</sub> احتمالی برابر با 9.0% می باشد. این مورد مربوط به 18.8kT CO<sub>2</sub> در سال می شود.

## 5-نتیجه گیری

ما نتیجه گرفته ایم که روش ابداعی این مطالعه یک ابزار مفید برای ارزیابی قابلیت استفاده از انرژی زمین گرمایی کم عمق برای گرم سازی فضا و آب گرم می باشد. این روش از داده هایی استفاده کرده است که راحت بدست می آید و درجه تفکیک بالاتری نسبت به مطالعات قبلی دارد. نتایج نشان داده است که یک تقاضای انرژی گرماسازی پایین تری در انواع مسکونی وجود دارد و اینها به احتمال بیشتری می توانند تقاضای انرژی را برای گرماسازی فضا و آب گرم از طریق انرژی زمین گرمایی با استفاده از یک سوراخ گمانه زنی فراهم سازد. ساختمنهای با تقاضای انرژی بالاتر به تناسب نوع اسکان آنها نظیر مرکز شهر به احتمال کمتری تقاضای انرژی شان بدون نیاز به تعداد غیرواقع گرایانه سوراخهای گمانه زنی برای انجام چنین کاری فراهم خواهد شد. پس نتیجه می شود که الگوی شهری باید برای برنامه ریزی آتی درباره سازماندهی قواره های زمین و ساختمنهای به ملاحظه درآید خواه تعداد لازم (یا تعداد واقع گرایانه ای) از سوراخهای گمانه زنی را بتوان نصب کرد تا تقاضای انرژی رفع شود یا خیر. طبق این نتایج به نظر می رسد که یک الگوی شهری با تراکم کمتر برای استفاده از انرژی حرارتی زمین گرمایی کم عمق جهت گرماسازی فضا و آب گرم مناسب تر می باشد. به دلیل قابلیت دسترسی به نتایج در پلتفرم های مبتنی بر وب، راه حل های پلتفرم انرژی شهری هوشمند می تواند به طور تعاملی با همه ذی نفعان امتحان گردد.

## References

- [1] Luis de Sousa, Christopher Eykamp, Ulrich Leopold, Olivier Baume, Christian Braun, iGUESS – A web based system integrating urban energy planning and assessment modelling for multi-scale spatial decision making, in: Sixth Biennial Meeting, International Congress on Environmental Modelling and Software Managing Resources of a Limited Planet, Leipzig, Germany, 2012. URL, <http://www.iemss.org/sites/iejemss2012/proceedings.html>.
- [2] 4640 Richtlinie VDL Thermal Use of the Underground – Ground Source Heat Pump Systems, Beuth Verlag, 2004.
- [3] N. Aydin, E. Kentel, S. Duzgun, GIS-based environmental assessment of wind energy systems for spatial planning: a case study from western Turkey, Renew. Sustain. Energy Rev. 14 (1) (Jan. 2010) 364–373. URL, <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S13640321109001610>.
- [4] L. Bergamasco, P. Asinari, Scalable methodology for the photovoltaic solar energy potential assessment based on available roof surface area: further improvements by ortho-image analysis and application to Turin (Italy), Sol. Energy 85 (11) (Nov. 2011) 2741–2756. URL, <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0038092X11002830>.
- [5] M. Blest, U. Fahl, A. Voss, Strategien und technologien einer pluralistischen fern- und nahwärme- versorgung in einem liberalisierten energiemarkt unter besonderer berücksichtigung der kraft-wärme- kopplung und regenerativer energien (pluralistische wärmeversorgung), 2011.
- [6] G. Blewitt, M. Coolbaugh, W. Holt, C. Kremer, J. Davis, R. Bennett, Targeting of potential geothermal resources in the great basin from regional relationship between geodetic strain and geological structures, Geotherm. Resour. Coun. Trans. 26 (2002) 523–526.
- [7] P. Blum, G. Campillo, W. Moch, T. Kibel, Co2 savings of ground source heat pump systems – a regional analysis, Renew. Energy 35 (1) (2010) 122–127.
- [8] M. Brito, N. Gomes, T. Santos, J.A. Tenorio, Photovoltaic potential in a Lisbon suburb using LiDAR data, Sol. Energy 86 (1) (Jan. 2012) 283–288. URL, <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0038092X11003574>.
- [9] M. Coolbaugh, D. Sawatzky, G. Oppliger, T. Minor, G. Raines, L. Shevenell, G. Blewitt, J. Louie, Geothermal GIS coverage of the great basin, USA: defining regional controls and favourable exploration terrains, Geotherm. Resour. Coun. Trans. 27 (Oct. 2003) 12–15.
- [10] J. Dorfner, GIS-based mapping tool of urban energy demand for room heating and hot water, in: 17th Building Services, Mechanical and Building Industry Days, Debrecen, Hungary, Oct. 2011.
- [11] T. Dwyer, Y. Evans, Figure 1 : Approximate UK Annual Ground Temperatures, 2010. Online. URL, <http://www.cibsejournal.com/cpd/2010-04/>.
- [12] European Commission, Europe 2020: A Strategy for Smart, Sustainable and Inclusive Growth, Brussels, 2010.
- [13] U. Fahl, M. Sippel, C. Kruck, M. Hrdtlein, L. Eitrop, R. Schelle, J. Lambauer, E. Heyden, C. Benighaus, A. Arnold, O. Renn, Integrated Climate Protection and Energy Strategy for Ludwigsburg – Summary of Key Findings, IER Stuttgart, DIALOGIK Stuttgart, City of Ludwigsburg, 2011.
- [14] A. Genelli, A. Mancini, S. Longhi, GIS-based energy-economic model of low temperature geothermal resources: a case study in the Italian Marche region, Renew. Energy 36 (9) (September 2011) 2474–2483.
- [15] J. Janke, Multicriteria GIS modeling of wind and solar farms in Colorado, Renew. Energy 35 (10) (Oct. 2010) 2228–2234. URL, <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S096014811000131X>.
- [16] A. Lashin, N. Al Arifi, Geothermal energy potential of southwestern of Saudi Arabia exploration and possible power generation: a case study at Al Khouba area – Jizan, Renew. Sustain. Energy Rev. 30 (Feb. 2014) 771–789. URL, <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1364032113007363>.
- [17] T. Lovering, H. Goode, Measuring Geothermal Gradients in Drill Holes Less than 60 Feet Deep East Tintic District, Utah : Utilization of Shallow-hole Temperature Measurements in Finding Thermal Diffusivity and Conductivity of Rocks, Temperature Gradient, Average Surface Temperature, and Certain Kinds of Climatic Data, United States Government Printing Office, Washington, 1963.
- [18] J. Lund, D. Freeston, T. Boyd, Direct utilization of geothermal energy 2010 worldwide review, Geothermics 40 (3) (Sep. 2011) 159–180. URL, <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0375650511000344>.
- [19] J. Lund, D. Freeston, T. Boyd, Direct utilization of geothermal energy 2010 worldwide review, Geothermics 40 (3) (September 2011) 159–180.
- [20] A. Mastrucci, C. Braun, O. Baume, F. Stazi, U. Leopold, Towards a comprehensive approach to sustainable urban planning: integrated estimation of housing electricity consumption and photovoltaic generation potential using the web-based framework iGUESS, in: Renewable Energy in the Service of Mankind, vol. 1, Springer, 2015. URL, <http://www.springer.com/us/book/9783319177762>.
- [21] J. Meester, Optimising Borehole Heat Exchanger Spacing to Maximise Advection Heat Transfer (Master's thesis), University of Minnesota, 2013. advisor: Martin O. Saar,
- [22] Y. Noorollahi, R. Itoi, H. Fujii, T. Tanaka, GIS integration model for geothermal exploration and well siting, Geothermics 37 (2) (Apr. 2008) 107–131. URL, <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0375650507000995>.
- [23] J. Ondreka, M. Rüsgen, I. Stober, K. Czurda, GIS-supported mapping of shallow geothermal potential of representative areas in south-western Germany—possibilities and limitations, Renew. Energy 32 (13) (Oct. 2007) 2186–2200. URL, <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0960148106003338>.
- [24] T.V. Ramachandra, Solar energy potential assessment using GIS, Energy Educ. Sci. Technol. 18 (2) (2007) 101–114.
- [25] B. Sanner, Overview of Shallow Geothermal Systems, Geotrainet, Brussels, 2011, pp. 1–13. Ch. 1.
- [26] D. Sauer, R. Juraske, M. Kübert, P. Blum, S. Hellweg, P. Bayer, Is it only CO<sub>2</sub> that matters? A life cycle perspective on shallow geothermal systems, Renew. Sustain. Energy Rev. 14 (7) (Sep. 2010) 1796–1813. URL, <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1364032110001061>.
- [27] P. Steskens, Thermal Energy Storage in the Ground, February 2010, p. 3. Design Guide SET, figure 3.
- [28] J.W. Tester, The Future Of Geothermal Energy – Impact Of Enhanced Geothermal Systems (EGS) on the United States in the 21st Century, Tech. rep., Idaho National Laboratory, US Department of Energy, 2006.
- [29] D. Voivontas, G. Tsiligiannis, D. Assimacopoulos, Solar potential for water heating explored by GIS, Sol. Energy 62 (6) (Jun. 1998) 419–427. URL, <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0038092X98000279>.
- [30] World Commission and Development on Environment, Our Common Future, Oxford University Press, Oxford; New York, 1987.