



Maden Tetkik ve Arama Dergisi

<http://dergi.mta.gov.tr>



Kentsel ısı adasının Kütahya şehir merkezi sığ akiferlerinde yer alan yeraltısuları üzerindeki etkisi ve bölgenin sığ jeotermal enerji potansiyeli, Türkiye

The effect of urban heat island on groundwater located in shallow aquifers of Kütahya city center and shallow geothermal energy potential of the region, Turkey

Ali Samet ÖNGEN^{a*} ve Zeynel Abidin ERGÜLER^a

^aKütahya Dumlupınar Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, Kütahya, Türkiye

Araştırma Makalesi

Anahtar Kelimeler:

Kentsel ısı adası,
Sığ jeotermal enerji,
Yenilenebilir enerji,
Yeraltısuyu, Isı
potansiyeli.

ÖZ

Kentleşme neticesinde doğal yüzeylerin yerini bina, kaldırım, asfalt gibi ısıyı hapseden yapay yüzeyler almakta, bunun sonucunda yerleşim yerleri çevrelerinde bulunan kırsal alanlara göre daha yüksek sıcaklık değerlerine sahip olmaktadır. Kentsel ısı adası olarak tanımlanan bu etki, sadece hava sıcaklığında değil, aynı zamanda yeraltı ve yeraltısuyunda da sıcaklık artışına neden olmaktadır. Bu çalışmada; kentsel ısı adasının Kütahya şehir merkezi yeraltı çevresindeki etkisinin tespiti için farklı tür yerleşim alanlarını, yeşil alanları ve tarım arazilerini kapsayan yaklaşık 53 km²'lik bir alanda bir yıl boyunca yeraltısuyu sıcaklığı değerleri ölçülmüştür. Yapılan ölçümler neticesinde; kentsel ısı adası haritaları oluşturulmuş, yeraltısuyu sıcaklığı anomalilerinin kentsel / endüstriyel alanlara doğru artış gösterdiği gözlenmiş, kentsel ve kırsal alanlarda yeraltısuyu sıcaklığı farkının kuyu bazında 7 °C'ye kadar ulaştığı tespit edilmiştir. Kentsel ısı adası etkisiyle artan bu ısı enerjisi "sığ jeotermal enerji sistemleri" adı verilen sistemler aracılığı ile konutların/ticari binaların ısıtma işlemlerinde kullanılabilir. Bu sebeple çalışma kapsamında Kütahya şehir merkezi altında yer alan alüvyon akiferin ısı potansiyeli hesaplanmıştır. Bu akiferin teorik ısı potansiyeli değerlerinin 3,50×10¹³ kJ K⁻¹ ortalama bir değer ile 1,64×10¹³ kJ K⁻¹ ile 5,55×10¹³ kJ K⁻¹ arasında değiştiği tespit edilmiştir. Kentsel ısı adası haritaları ve akiferlerin ısı potansiyeli hesaplarının, sığ jeotermal sistemlerin uygulanabilirliği açısından önemli parametreler olacakları düşünülmektedir.

Geliş Tarihi: 16.06.2020

Kabul Tarihi: 26.10.2020

Keywords:

Urban heat island,
Shallow geothermal
energy, Renewable energy,
Groundwater, Heat
capacity.

ABSTRACT

As a result of urbanization, natural surfaces are replaced by artificial surfaces that trap heat such as buildings, pavements and asphalt, so residential areas have higher temperature values than rural areas. This effect, defined as the urban heat island, causes an increase not only in air temperature but also in the subsurface and groundwater. Groundwater temperature values were measured during one year in an area approximately 53 km² consisting of different types of settlement areas to determine the urban heat island effect on the subsurface of Kütahya. As a result of the measurements, urban heat island maps were prepared. It was observed that the groundwater temperature anomalies increased towards the urban/industrial areas. The difference of groundwater temperature in urban/ rural areas reached up to 7 °C by well. This heat energy increasing with the effect of urban heat island can be used in the heating processes of buildings by utilizing systems called "shallow geothermal energy". For this reason, the heat potential of the alluvial aquifer under Kütahya was calculated.

Atf bilgisi: Öngen, A. S., Ergüler, Z. A. 2021. The effect of urban heat island on groundwater located in shallow aquifers of Kütahya city center and shallow geothermal energy potential of the region, Turkey. Bulletin of the Mineral Research and Exploration 165, 217-234. <https://doi.org/10.19111/bulletinofmre.820395>

*Başvurulacak yazar: Ali Samet ÖNGEN, alisamet.ongen@dpu.edu.tr

The theoretical heat potential values of the this aquifer range between $1.64 \times 10^{13} \text{ kJ K}^{-1}$ and $5.55 \times 10^{13} \text{ kJ K}^{-1}$ with a mean value of $3.50 \times 10^{13} \text{ kJ K}^{-1}$. It is thought that urban heat island maps and the heat potential calculations of the aquifers may be important parameters for applicability of shallow geothermal systems in the city center of Kütahya.

1. Giriş

Ekonomik, sosyal ve kültürel faktörlerden dolayı şehirlerde insan nüfusu artmakta, kent merkezleri giderek kalabalıklaşmaktadır. Artan nüfusa bağlı olarak ortaya çıkan barınma ihtiyacı sonucunda şehirlerde kentleşme dünya genelinde hızla artmaktadır. Kentleşme neticesinde doğal bitki örtüsünün yerini yapay yüzeyler almaktadır. Bunun sonucunda kent merkezleri, etrafındaki kırsal alanlara göre daha yüksek hava sıcaklığı değerlerine sahip olmaktadır. Bu durum ilk kez Howard (1883) tarafından dile getirilmiş ve “kentsel ısı adası” olarak tanımlanmıştır. Bir başka araştırmada (Oke, 1973) kentsel ve kırsal alanlardaki en yüksek hava sıcaklığı farkı kentsel ısı adası yoğunluğu olarak tanımlanmış, açık ve rüzgârsız yaz akşamlarında kentsel ısı adası yoğunluğunun 12 °C’ye kadar ulaşabildiği belirtilmiştir. Kentsel ısı adası etkisi neticesinde, kent merkezlerindeki hava sıcaklığı kırsal alanlara göre 10 °C’ye kadar daha yüksek olabilmektedir (Oke, 1987; Klysik ve Fortuniak, 1999). Menberg (2013a)’ya göre ise şehir merkezi ile kırsal alanlardaki fark yapay yapılardan dolayı 20 K’ya kadar yükselmektedir.

Kentsel ısı adası etkisinin en önemli sebebi, doğal yüzeylerin yerini yapay yüzeylerin almasıdır. Yeşil alanların etrafındaki kentsel alanlardan daha serin olduğu önceki çalışmalarda vurgulanmıştır (Gallo ve Owen, 1999; Spronken - Smith ve Oke, 1999). Şehirlerde kentleşmeye bağlı olarak artan yapay yüzeyler, insan kökenli ısı kayıplarına neden olmakta, atmosferdeki radyasyon düzeyinde ve şehirlerdeki enerji dengesinde değişime sebep olmaktadır. Bu durum şehir mikroikliminde değişime ve hava sıcaklığında artışa neden olur (Landsberg, 1956; Oke, 1988). Çünkü bitkiler, gün içerisinde güneşten yeryüzüne gelen radyasyonu buharlaşma - terleme (evapotranspirasyon) yoluyla atmosfere geri salmaktadır. Ancak; doğal yüzeylerin yok olmasıyla evapotranspirasyon azalmakta, bina, asfalt, yol, kaldırım, köprü gibi yapay yüzeyler güneş ışınlarını hapsederek gün içerisinde hava sıcaklığının artmasına sebep olmaktadır. Bunun sonucunda kentsel ısı adası etkisi ortaya çıkmakta ve kentsel alanlarda yeşil

alanların yoğun olduğu kırsal alanlara göre daha yüksek hava sıcaklığı değerleri gözlenmektedir. Dolgu alanlar, metro tünelleri, elektrik kabloları, bölgesel ısıtma sistemleri ve kanalizasyon sistemleri de kentsel ısı adası etkisine sebep olan diğer insan kökenli yapılarıdır (Balke, 1977; Pollack vd., 1998; Menberg vd., 2013b).

Kentsel ısı adası etkisinin aynı zamanda şehrin büyüklüğünün ve nüfus artışının bir sonucu olduğu önceki çalışmalarda (Oke, 1973) vurgulanmıştır. Ezber vd. (2007), İstanbul’da kentsel ısı adası etkisini incelemiş ve kentsel ısı adası faktörünün nüfus ve şehir büyüklüğü ile doğrudan ilişkili olduğunu göstermiştir. Ancak, önceki çalışmaların bazılarında göre bu etkinin sadece büyük şehirlerde değil, Granada (İspanya) gibi orta büyüklükteki (Montavez vd., 2000) veya Aveiro (Portekiz) gibi küçük şehirlerde de gözlemlendiği belirtilmiştir (Pinho ve Manso Orgaz, 2000). Allen vd. (2003)’e göre kentsel ısı adası etkisi her şehirde gözlenmeyebilir. Bu etki bölgesel hava durumu, topografya, cadde, bina ve insan kaynaklı yapıların yoğunluğu, park ve bahçeler gibi insan yapımı alanların sayısı gibi birçok faktöre bağlıdır. Landsberg (1981), kentsel ısı adası etkisinin heterojen bir dağılım gösterdiğini ve alana özgü bir kavram olduğunu, şehir içerisinde birçok mikroiklimsel değişimlerin meydana geldiğini ve kentsel ısı adasının kent içerisinde mikroiklimsel değişikliklerin bir özeti olduğuna dikkat çekmiştir. Yani kentsel özelliklere göre kentsel ısı adası yoğunluğu şehir içerisinde alansal olarak değişebilmektedir.

Birçok çalışma ve meteorolojik kayıt son yüzyılda şehirlerde belirgin bir sıcaklık artış eğilimi olduğunu göstermektedir (Perrier vd., 2005; Ferguson ve Woodbury, 2007; Taniguchi vd., 2007). Bu olay sadece iklimsel faktörlerin değil, aynı zamanda yukarıda bahsedildiği gibi kentleşme neticesinde ortaya çıkan kentsel ısı adası etkisinin de bir sonucudur (Oke, 1973; Kataoka vd., 2009). Örneğin Karaca vd. (1995), İstanbul’da nüfus artışı ile kentsel ısı adası etkisi arasındaki ilişkiyi incelemiş ve yapılaşmanın az olduğu İstanbul’un kuzey kısmında son 40 yılda

ortalama sıcaklığın 1,17°C azaldığını, yapılaşmanın yoğun olduğu güney kısmında ise son 40 yılda ortalama sıcaklığın 0,47°C arttığını gözlemlemiştir. Bu durum şehirlerdeki sıcaklık artışının sadece iklimsel faktörlerin değil, aynı zamanda kentleşmenin de sonucu olduğunun bir kanıtıdır.

Yukarıda belirtilen önceki çalışmalarda olduğu gibi, atmosferde meydana gelen kentsel ısı adası etkisi yaygın olarak bilinmekte olup uzun yıllardan beri bu değişim uluslararası çalışmaların odak noktası olmuştur. Ancak, kentsel ısı adası etkisi atmosferde olduğu gibi, yeraltı ve çevresinde de sıcaklık artışına sebep olmaktadır (Taniguchi vd., 2007). Yeraltı sıcaklığı dünyanın merkezinden gelen ısı akışı ile yüzey sıcaklığı tarafından kontrol edilmektedir (Huang vd., 2009). Yeryüzünde kentsel ısı adası etkisi ile meydana gelen sıcaklık değişimleri, ısı transferiyle yer altına iletilmekte ve özellikle yüzeye yakın yerlerde yer alan sığ akiferler, yüzeyde meydana gelen atmosferik olaylardan etkilenmektedir. Dolayısıyla, kentsel ısı adası etkisinin ortaya çıkmasına sebep olan bina, otopark, asfalt, metro tünelleri gibi mühendislik yapıları yeryüzünün ve dolayısıyla yeraltında sığ derinliklerde yer alan birimlerin ve yeraltısuyu sıcaklığının yükselmesinden sorumludurlar. Çeşitli çalışmalarda kentsel ısı adası etkisinin yeraltı sıcaklığı üzerinde güçlü bir etkiye sahip olduğu ispat edilmiş ve toprak sıcaklığı ve/veya yeraltısuyu sıcaklığı değerleri kullanılarak kentsel ısı adası etkisi birçok araştırmacı tarafından tespit edilmiştir (Taniguchi vd., 1999; Changnon, 1999; Ferguson ve Woodbury, 2004; Taniguchi, 2006; Taniguchi vd., 2007). Ferguson ve Woodbury (2004) kentsel bölgelerde yer alan binalardan yayılan ısı kaybını hesaplamış ve yeraltı çevresinin metro ağları ya da geri enjekte edilen termal sular gibi daha önceden dikkate alınmayan insan kaynaklı faaliyetlerden etkilendiğini belirtmişlerdir. Ampofo vd. (2004) Londra metrosundaki sıcaklığın %70'nin havalandırma ile dışarıya atılabildiğini, geri kalan %30'nun yeraltına iletildiğini belirtmiştir. Kottmeir vd. (2007), Berlin örneğini kullanarak üstü kapalı yüzeylerin yüzdesi ile yeraltısuyu sıcaklığı değerleri arasında ilişki kurmuştur. Araştırmacıya göre; üstü kapalı yüzeyler ve kentleşme yüzdesiyle yeraltısuyu sıcaklığı arasında doğru orantı vardır. Kapalı yüzeylerin ve yapılaşma yüzdesinin azaldığı kırsal kesimde ise yeraltısuyu sıcaklığı azalmaktadır. Taniguchi (2006), Bangkok'ta nüfus yoğunluğu ile yeraltı sıcaklık değerleri arasında doğrudan bir ilişki

kurmuştur. Yine hızla büyüyen Asya şehirlerinde yeraltı toprak sıcaklığındaki artış birçok çalışma tarafından araştırılmıştır (Taniguchi ve Uemura, 2005; Taniguchi vd., 2009). Benzer çalışmalarda ormanlık alanların yok edilmesi sonucunda toprak sıcaklığının tropik ve ılıman bölgelerde 2 ile 3 K arasında artış gösterdiği gözlenmiştir (Murtha ve Williams, 1986; Nitoiu ve Beltrami, 2005). Türkiye'de Yalçın ve Yetemen (2009), İstanbul'un iki yakasında yaptığı çalışmada, farklı noktalarda sığ derinliklerdeki toprak sıcaklıklarını ölçmüş ve yapılaşmanın olduğu alanlarda yeraltı sıcaklık farkının 3,5 K'e kadar yükseldiğini tespit etmişler. Kentsel alanlarda ölçülen yeraltı sıcaklığının çevre alanlardan 5 K daha sıcak olduğu gözlenmiştir (Taniguchi vd., 1999; Ferguson ve Woodbury, 2004; Reiter, 2006). Zhu vd. (2010) tarafından Almanya'nın Köln kentinde yapılan çalışmada, yeraltısuyu sıcaklığının alansal dağılımı incelenmiş ve en yüksek yeraltısuyu sıcaklığı değerlerine kentleşmenin yoğun olduğu şehir merkezinin altında yer alan akiferlerde rastlandığını belirtilmiştir. Benzer birçok çalışmada, yeraltına etkileri kanıtlanmış olan kentsel ısı adası etkisi ile artan yeraltısuyu sıcaklığı değerleri, şehir merkezinin sığ derinliklerinde yer alan akiferlerin jeotermal enerji kaynağı olarak kullanılması fikrini doğurmuştur. Yeraltısuyu sıcaklıklarının kentsel ısı adası etkisiyle artması ile bu akiferler jeotermal rezervuar konumuna gelecek ve fosil yakıtlara alternatif olarak çevre dostu ve yenilenebilir bir enerji kaynağı kazandırılmış olacaktır. Çünkü; yüksek sıcaklık değerlerine sahip akifer yüksek miktarda depolanan enerji, yüksek miktarda depolanan enerji ise, yüksek jeotermal potansiyel anlamına gelmektedir. Bu anlamda yüksek sıcaklıktaki kentsel akiferler, sığ jeotermal sistemler gibi ülke ekonomisi ve çevre sağlığı için önem arz eden sistemlerin uygulanabilirliğine imkân tanıyabilirler. Kırsal ve daha yoğun yerleşim alanlarında sığ jeotermal enerji sistemlerinin uygulanabilirliğinin değerlendirildiği birçok çalışma yer almaktadır (Lee vd., 2017; Casasso vd., 2017; Francisco Pinto ve Graça, 2018). Söz konusu sistem Fransa, Almanya, Avusturya, Hollanda ve İsveç gibi ülkelerde toplam yarım milyondan fazla sayıda kurulmuştur (EGEC, 2018). Bu sayı dünya genelinde bir milyon ünite civarındadır (Pophillat vd., 2020). Bu sistemlerin sayısı kurulum maliyetleri azaldıkça artacaktır (Soltani vd., 2019).

Artan nüfus ve kentleşmeye bağlı olarak ortaya çıkan kentsel ısı adası etkisi neticesinde, kent merkezleri etrafındaki kırsal alanlara göre daha sıcak

hale gelmektedir. Nüfusun ve kentleşmenin sürekli artış gösterdiği bir şehir olan Kütahya’da, kentsel ısı adası etkisinin gözlenebileceği öngörülmüştür. Bu sebeple çalışma kapsamında, Kütahya şehir merkezinde kentsel ısı adası etkisinin tespit edilmesi amacıyla, yeraltısuyu sıcaklıkları ölçümlerinin gerçekleştirilmesi ve kentsel ısı adası haritalarının oluşturulması planlanmıştır. Önceki çalışmalarda kentsel ısı adası etkisinin sadece hava değil yeraltı ve yeraltısuyu sıcaklığı üzerinde de güçlü bir etkiye sahip olduğu ispat edilmiştir. Yeraltı çevresinin ve yeraltısuyunun sıcaklıklarının kentsel ısı adası etkisiyle artması ile şehir merkezinin sığ derinliklerinde yer alan bu akiferlerin, jeotermal enerji kaynağı olarak kullanılması fikri doğmuştur. Fosil yakıt tüketiminin ve enerji ithalatının yüksek olduğu ülkemizde bu çevre dostu yenilenebilir enerji kaynağının çok önemli bir alternatif olacağı düşünülmüştür. Buna istinaden, Kütahya şehir merkezinde kentsel ısı adası etkisinin varlığının tespitine ek olarak, alüvyon akiferin ısı potansiyelinin belirlenmesi amaçlanmıştır. Özetle, kentsel ısı adası etkisinin Kütahya ili şehir merkezinde sığ akiferlerde yer alan yeraltısuyu sıcaklığına etkisinin incelenmesi, söz konusu sıcaklık değerlerinin sığ jeotermal sistemler açısından değerlendirilmesi ve alüvyon akifer içerisindeki ısı potansiyelinin hesaplanması bu çalışmanın ana amaçlarını oluşturmaktadır.

2. Çalışma Alanı

Ege Bölgesi’nin İç Batı Anadolu bölümünde yer alan Kütahya, Yellice Dağı’nın eteğinde, Kütahya Ovası’nın güney kenarında kurulmuştur. Konum olarak 38° 70’ ve 39° 80’ kuzey enlemleri ile 29° 00’ ve 30° 30’ doğu boylamları arasında yer almaktadır. Türkiye İstatistik Kurumu (TÜİK) verilerine göre 12.014 km² yüzölçümü ile Türkiye topraklarının yaklaşık olarak %1,5’ünü oluşturmaktadır.

TÜİK 2019 yılına ait verilerine göre Kütahya genel nüfusu 579.257 olarak belirlenmiştir. Merkez ilçesinin sosyal ve ekonomik imkanların diğer ilçelere göre daha güçlü olmasından dolayı bu nüfusun yaklaşık %50’si (272.367 kişi) merkez ilçede

yaşamaktadır (Çizelge 1). Dolayısıyla merkez ilçede nüfus yoğunluğu ve kentleşme oranı diğer ilçelere göre daha yüksektir. Yine TÜİK (2019) verilerine göre Kütahya ilinde 2019 yılı için yıllık nüfus artışı hızı %2,3 iken, Merkez ilçede bu oran %20,7’ye kadar çıkmaktadır. Artan nüfusa bağlı olarak yeni alanlar imara açılmakta, kentleşme hızı artmakta, tarım alanlarının ve yeşil alanların miktarı azalmaktadır. Bu durum, kentsel ısı adası etkisinin kent merkezinde ortaya çıkma potansiyelini artırmaktadır.

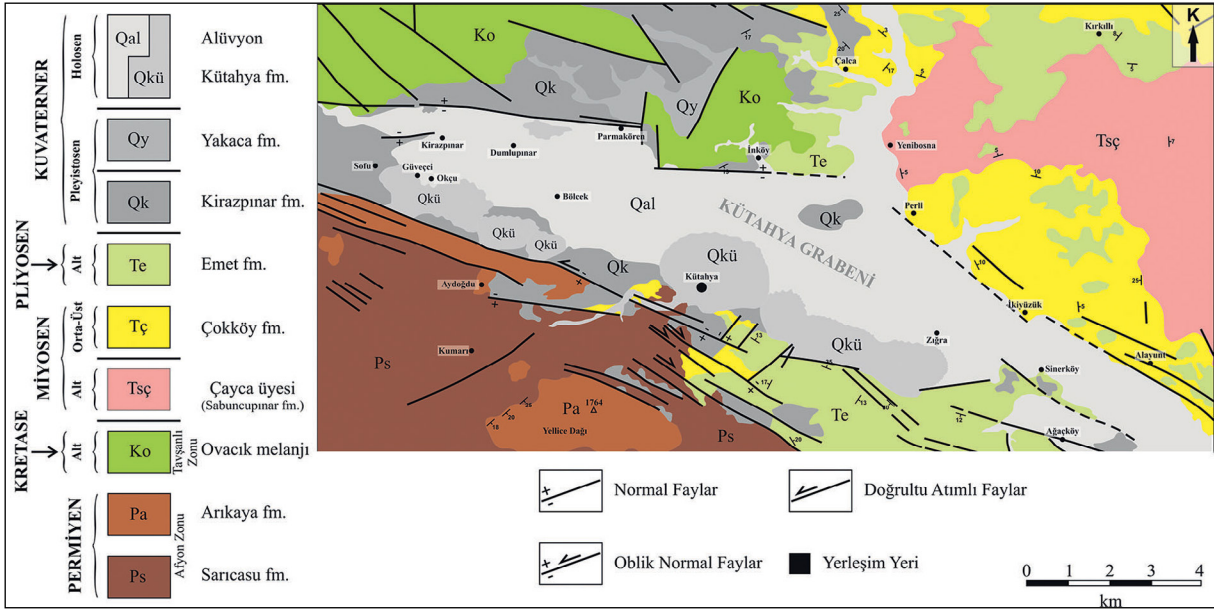
Kütahya Ovası, Kütahya fayına bağlı olarak oluşmuş tektonik bir ova özelliğinde olup, kentleşme yoğun olarak burada gözlenmektedir. Ova genel olarak düz bir topoğrafyaya sahiptir ve içerisinde alüvyon birimler yer almaktadır. Özburan (2009)’a göre yöredeki birimleri uyumsuz olarak üzerleyen alüvyon, Porsuk ve Felent Çayları’nın ve kollarının ürünüdür. Çalışma alanında en yüksek yer şehrin güney kısmında yer alan Yellice Dağı’dır. Şehirde Paleozoyik, Mesozoyik ve Senozoyik yaşlı birimler yüzeylenmektedir. Temelde şist ve mermerden oluşan metamorfik birimler yer almakta, bunların üzerine ofiyolitik kayalar gelmektedir. Bu birimlerin üzerinde diskordansla duran, göl/akarsu ortamını yansıtan, volkaniklerle girik, kırıntılı ve karbonatlı bir istif bulunmaktadır. Kütahya Grabeni’nin oluşum sırası ve sonrasında gelişen daha genç flüviyal çökeller graben dolgusu olarak bulunur (Özburan, 2009). Bölgede Kuvaterner yaşlı Kirazpınar, Yakaca ve Kütahya formasyonu ve alüvyon, örtü birimler olarak bulunmaktadır (Şekil 1).

Bölgede 145 m² yayılım gösteren Alüvyon birimi, Felent ve Porsuk Çayı boyunca düzlükleri oluşturan tarım arazilerinde gözlenmektedir. Yeraltısuyu özellikle Kuvaterner yaşlı bu sedimanlar içerisinde yer almaktadır. Bu su bölge insanı tarafından tarımsal sulama gibi amaçlarda kullanılmaktadır. Alüvyon biriminde bugüne kadar açılmış olan sondaj sonuçlarına göre, sondaj debileri 2 - 12 l/s ve özgül debi değerleri ise 0,04 - 0,22 l/s/m arasında değişmektedir. Şehrin sığ derinliklerinde yer alan Kuvaterner yaşlı

Çizelge 1 - Kütahya ili şehir merkezine ait istatistiki bilgiler.

Yükselti (m)	Nüfus (Kişi) ^a	Nüfus yoğunluğu (km ²) ^b	Alan (km ²)	T _{ort} (°C) ^c	İncelenen kuyu Sayısı	İnceleme alanı (km ²)	Kuyu/Alan (kuyu/km ²)
970	272.367	110,27	2470	10,81	41	52,44	0,78

a. Türkiye İstatistik Kurumu (2019). b. Harita Genel Müdürlüğü c. Kütahya Meteoroloji Müdürlüğü (1970-2019), T_{ort}: Yıllık ortalama hava sıcaklığı.



Şekil 1 - Kütahya ve çevresinin genel jeoloji haritası (Özburan, 2009).

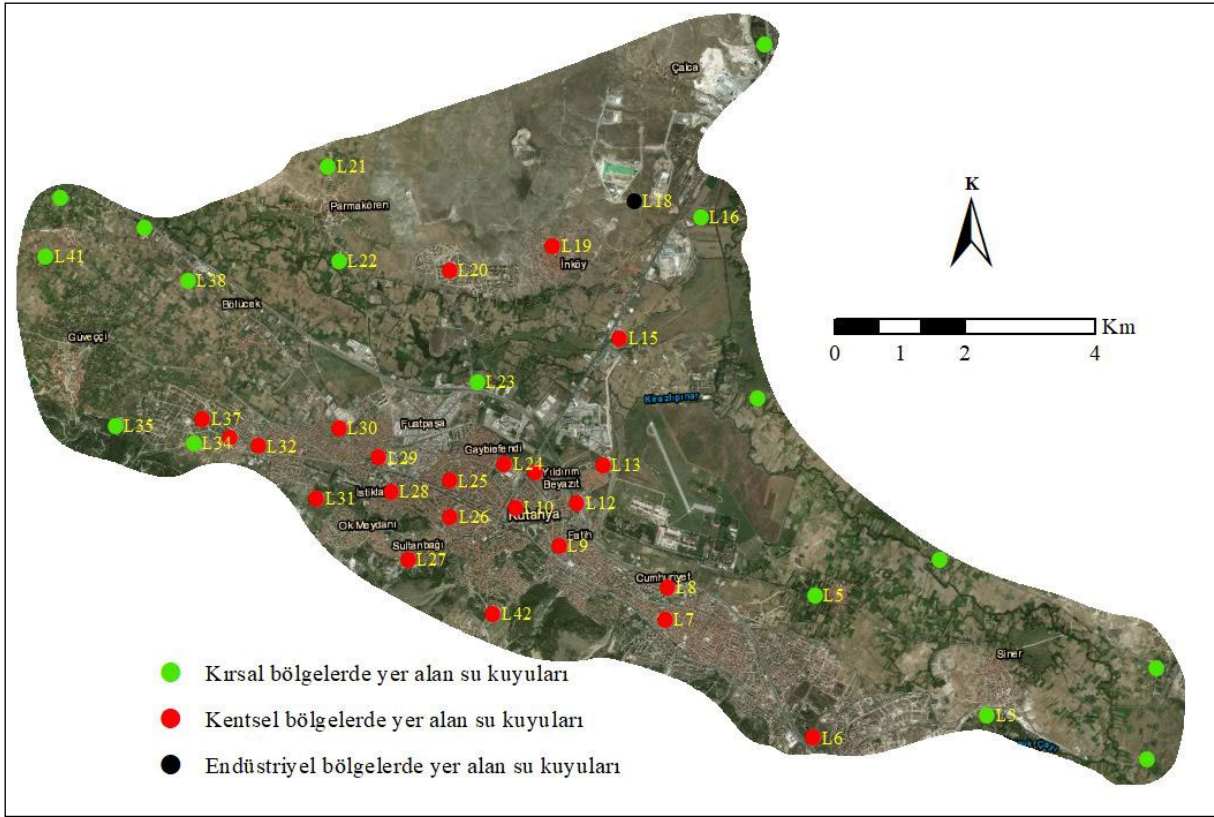
akifer ortalama 44,2 m/gün hidrolik iletkenlik ve 213,48 m²/gün transmissivite değerine sahiptir (DSİ, 2003). Bölgede yoğun tektonik aktivite neticesinde yüksek ikincil geçirgenliğe sahip metamorfik kayalar geçirimli birimleri oluşturmaktadır. İnceleme alanında devamlı akışa sahip dereler ovayı kuzeybatıdan güneydoğuya doğru ilerleyen Felent Çayı ile güneyden kuzeye doğru akışlı Porsuk Çayı'dır (DSİ, 2003).

3. Materyal ve Yöntem

Yeraltısuyu sıcaklığının Kütahya Merkez ilçesi içerisinde kentsel ve kırsal kesimlerde alansal dağılımının belirlenmesi ve bu değerler kullanılarak kentsel ısı adası etkisinin tespiti için kentleşmenin yoğun olduğu bölgelerde ve kırsal kesimler ölçüme uygun su kuyularına ihtiyaç duyulmuştur. Bu doğrultuda 2019 yılı Ocak ayında Kütahya ovası içerisinde arazi çalışmasına başlanmış ve kırsal ve kentsel alanlarda yeraltısuyu seviyesi ile yeraltısuyu sıcaklığı ölçümüne uygun 42 adet su kuyusu tespit edilmiştir (Şekil 2). L36 numaralı kuyuda Şubat ayında göçme gerçekleştiğinden dolayı bu kuyu iptal edilmiş ve toplamda 41 kuyu ile çalışmaya devam edilmiştir. Kentsel ısı adası etkisinin tam olarak tespit edilebilmesi için ölçüm yapılacak kuyu yerlerinin kentsel, kırsal ve endüstriyel alanlarda dağılım göstermesine özen gösterilmiştir (Şekil 2). Konutların, ticari binaların, kamu binalarının,

fabrikaların, yeşil alanların ve tarım arazilerinin bulunduğu yaklaşık 53 km²'lik bir alanda 2019 yılının Ocak ayından Aralık ayına kadar 12 ay boyunca her ay periyodik olarak yeraltısuyu seviyesi ve sıcaklığı, seviye ve sıcaklık ölçer cihazı (Heron Conductivity Plus) kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Yeraltısuyu sıcaklıkları, su yüzeyinin atmosfer ile olan teması düşünülerek yeraltısuyu tablasının 1 metre altından ölçülmüştür. Kuyularda ölçüm derinlikleri 1,20 ile 25,40 metre arasında değişmektedir. Elde edilen sıcaklık değerlerinin alansal dağılımını gözlemlemek ve kentsel ısı adası etkisini alanlara göre tespit etmek için ArcMap 10.7 yazılımında (ESRI, 2019) Internal Distance Weighting (IDW) jeoistatistik metodu kullanılarak verilerin alansal dağılımını gösteren haritalar oluşturulmuş, kentleşmenin yeraltısuyu ve çevresine etkisi incelenmiştir. Buna ek olarak, arazi çalışmalarında elde edilen yeraltısuyu sıcaklığı değerleri Kütahya Meteoroloji İstasyonu'ndan elde edilen hava sıcaklığı ve 100 cm toprak sıcaklığı değerleri ile karşılaştırılmıştır.

Şehir merkezinin altında sığ derinliklerde yer alan alüvyon akiferin ısı potansiyelinin hesaplanması için gerekli parametrelerden biri olan zeminin hacimsel ısı kapasitesi C_s (kJ m⁻³ K⁻¹) değerinin belirlenebilmesi için ölçüm yapılan kuyu yerlerinden zemin örnekleri alınmış, 2019 yılı Kasım ayında Torino (İtalya)'da bulunan Torino Teknik Üniversitesi (Politecnico di Torino) Arazi, Çevre ve Altyapı Mühendisliği



Şekil 2- Ölçüm yapılan kuyu yerleri.

Bölümü laboratuvarlarında bulunan ISOMET 2114 cihazı kullanılarak zemin örneklerinin hacimsel ısı kapasiteleri belirlenmiştir.

4. Gözlemler ve Elde Edilen Veriler

4.1. Meteorolojik Veriler

Karasal iklimin hüküm sürdüğü Kütahya’da yazlar sıcak ve kurak, kışlar soğuk ve yağışlıdır. Köppen - Geiger (1954) iklim sınıflamasına göre şehir CSB (yazı sıcak ve kurak, kışı serin ve yağışlı) iklim sınıfındadır. Yağışlar genellikle ilkbahar, sonbahar ve kış aylarında gözlenmektedir. Zaman içerisinde artan kentleşmenin hava sıcaklığı üzerindeki etkisini tespit etmek için, 1970 ile 2019 yılları arasında 50 yıllık aylık/yıllık hava sıcaklığı ile 100 cm toprak sıcaklığı verileri Kütahya Meteoroloji İstasyonu’ndan temin edilmiştir. Kentsel ısı adası etkisinin hava ve toprak sıcaklığına etkilerinin anlaşılması açısından meteoroloji istasyonunun kentleşmenin yoğun olduğu bir bölgede yer alması, çalışma açısından önemli bir avantaj olarak görülmektedir. Meteorolojik verilere göre; yıllık ortalama hava sıcaklığı ve toprak sıcaklığı

değerleri 1970 yılından 2019 yılına kadar 10’ar yıllık zaman aralıklarında değerlendirilmiştir (Çizelge 2). Buna göre, 1970 - 1979 yılları arasında 10,26°C olan yıllık ortalama hava sıcaklığı değeri, zaman içerisinde sürekli artış göstermiş ve 2010 - 2019 yılları arasında bu değer 11,92°C’ye ulaşmıştır. Diğer bir ifadeyle, son 50 yılda ortalama yıllık hava sıcaklığı değeri, Kütahya kent merkezinde +1,66°C artmıştır. Yine son 50 yılın verilerine göre 100 cm toprak sıcaklığı değerleri de 1970 yılından günümüze kadar neredeyse aynı miktarda (+1,61°C) artış göstermiştir. TÜİK verilerine göre; 1970 yılında 129.056 kişi olan Kütahya Merkez ilçe nüfusu, son 50 yılda %111 artış göstererek 2019 yılında 272.367 kişiye ulaşmıştır. Nüfustaki bu artış beraberinde barınma ihtiyacı doğurmuş ve il merkezinde kentleşme yıldan yıla artış göstermiştir. Kütahya şehir merkezinde yer alan meteoroloji istasyonundan alınan verilere göre 1970 ile 2019 yılları arasında ortalama hava sıcaklığı +1,66 °C, yıllık ortalama toprak sıcaklığı ise +1,61 °C artış göstermiştir. Kütahya ilinde kırsal alanda herhangi bir meteoroloji istasyonu olmadığından bu yıllar arasında kentsel ve kırsal alanlardaki ortalama sıcaklıklar karşılaştırılamamaktadır. Ancak bu yıllar

Çizelge 2 - Kütahya ili şehir merkezinde 1970-2019 yılları arasında aylık ve yıllık ortalama hava sıcaklığı ve 100 cm toprak sıcaklığı değerleri.

Parametre	Zaman aralığı (yıl)	Ay												Ortalama	Fark*
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12		
T _{hava} (°C)	1970-1979	0,34	2,38	5,65	9,92	14,09	17,73	20,19	19,35	15,96	11,25	6,11	0,79	10,26	1,66
	1980-1989	0,64	0,76	4,32	10,21	13,90	17,89	20,21	20,26	16,80	10,95	5,53	2,24	10,31	
	1990-1999	0,13	1,09	4,22	9,47	14,42	17,95	20,38	20,46	16,28	12,17	5,96	2,39	10,41	
	2000-2009	0,19	1,53	6,12	10,07	14,85	19,06	21,97	21,86	16,91	12,41	6,69	1,97	11,14	
	2010-2019	1,17	3,93	6,86	11,07	15,57	19,23	22,25	22,19	18,39	12,19	7,57	2,57	11,92	
T _{toprak} (°C)	1970-1979	5,56	5,03	6,26	9,12	12,35	15,46	18,45	19,72	18,42	15,32	11,21	7,89	12,07	1,61
	1980-1989	6,21	5,35	5,99	9,23	12,38	15,34	18,33	19,91	18,98	15,82	11,75	8,52	12,37	
	1990-1999	7,54	6,28	7,11	9,74	13,18	16,2	18,67	19,92	19,15	16,59	13,01	9,85	13,10	
	2000-2009	8,00	7,04	8,01	10,55	13,61	16,87	19,81	21,34	20,35	17,48	13,67	10,07	13,90	
	2010-2019	8,09	7,27	8,11	10,10	13,07	15,86	18,66	20,47	20,10	17,57	14,06	10,81	13,68	

T_{hava}: Hava sıcaklığı; T_{toprak}: Toprak sıcaklığı * 1970-2019 yılları arasındaki yıllık ortalama sıcaklık farkını ifade etmektedir.

arasında kentleşmenin nüfusa bağlı olarak sürekli artış gösterdiği ve yeşil alanların azaldığı bilinmektedir. Dolayısıyla 1970 ve 2019 yılları arasında ortalama hava ve toprak sıcaklıklarında meydana gelen bu artışın sadece iklimsel faktörlerin değil aynı zamanda kentleşmenin bir sonucu olduğu düşünülmektedir. Verilere göre hava sıcaklığı 21°C ortalama ile en yüksek Temmuz ayında, 0,36°C ile en düşük Ocak ayında; toprak sıcaklığı 20,27°C ile en yüksek Ağustos ayında, 6,19°C ile en düşük Şubat ayında gözlenmektedir.

4.2. Yeraltısıyu Sıcaklık Dağılımı

Yeraltı sıcaklığı zemin türü, termal iletkenlik, özgül ısı kapasitesi ve yoğunluğu gibi fiziksel faktörlerden etkilenmektedir. Bu faktörlere ek olarak; yeraltından gelen ısı akısı, yeryüzü örtüsü (doğal/yapay) ile hava sıcaklığı, rüzgâr, güneş ışığı, nem gibi iklimsel faktörler yeraltı sıcaklığını etkileyen diğer faktörler olarak bilinmektedir (Landsberg, 1981; Krarti vd., 1995; Popiel vd., 2001). Popiel vd. (2001) yeryüzünü sıcaklık dağılımına göre yüzey zonu, sıg zonu ve derin zonu olmak üzere üçe ayırmıştır. Buna göre yüzey zonu yerin 1 metre derinliğine kadar olan kısımdır ve bu zonu günlük sıcaklık değişimlerinden etkilenmektedir. Hava sıcaklığının yıllık ölçekte etkisinin gözlemlendiği zonu sıg zonu olarak adlandırılmıştır. Sıg zonu 1 metreden 20 metre derinliğe kadar uzanmakta olup, zeminin cinsine ve su içeriğine bağlıdır. Derin zonu olarak tabir edilen bölge ise, sıg zonu altında yer almakta ve atmosferik değişimlerden etkilenmemektedir. Oke (1987) ise yerin 0,75 metre altına kadar olan kısmını yüzey zonu, 14 metreye kadar olan kısmını ise sıg zonu olarak nitelendirmiştir. Araştırmacılar bu zonlar için derinlik sınırlarını belirtirler de bu zonların derinliği

yüzeyin örtü tipine bağlıdır. Landsberg (1981)'e göre günlük ve yıllık sıcaklık dalgaları çim ile kaplı yüzeyde 4 ile 8 metre derinliğe kadar, beton kaplı yüzeylerde ise daha derine ulaşarak 15 - 19 metre derinliklere etki etmektedir. Rybach ve Sanner (2000) ise bu etkinin 15 metre derinliğe kadar ulaştığını belirtmiştir (Yalçın ve Yetemen, 2009).

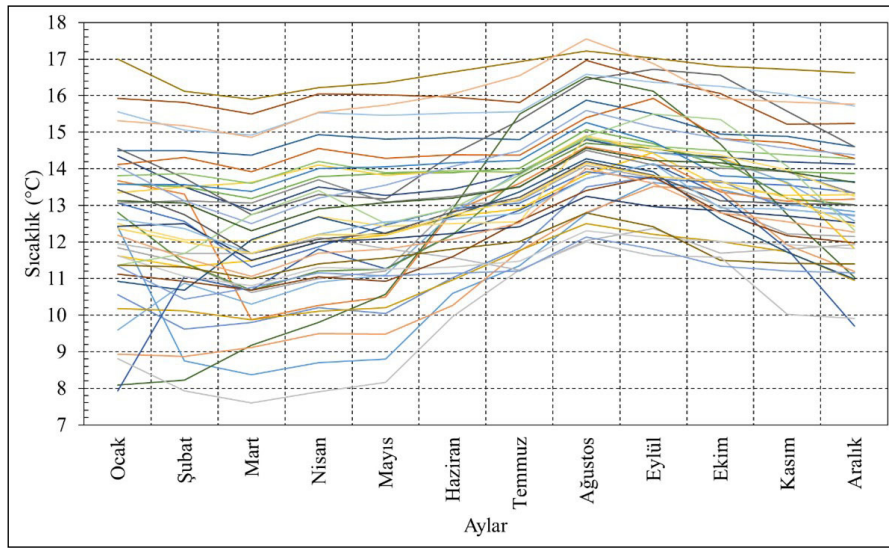
Önceki çalışmalarda da belirtildiği gibi (Taniguchi vd., 1999; Ampofo vd., 2004; Ferguson ve Woodbury, 2004; Taniguchi, 2006; Taniguchi, 2007; Yalçın ve Yetemen, 2009; Zhu vd., 2010) kentsel ısı adası etkisi sadece hava sıcaklığında değil, ısı yayılım yoluyla zemin sıcaklığında, zemin ve yeraltısıyu arasındaki ısı transferi neticesinde de yeraltısıyu sıcaklığında artışa neden olmaktadır. Kütahya ili şehir merkezinde kentsel ısı adası faktörünün yeraltısıyu sıcaklığı üzerindeki etkisinin tespit edilmesi amacıyla 41 adet su kuyusunda aylık periyodik olarak yapılan yeraltısıyu sıcaklığı ölçümlerinin lokasyonlara göre yıllık ortalama değerleri Çizelge 3'te ve yeraltısıyu sıcaklığı değerlerinin yıl içerisinde aylara göre değişimi grafiği Şekil 3'te sunulmuştur.

Elde edilen verilere göre; en yüksek yeraltısıyu sıcaklığı Ağustos ayında 17,55°C ile şehir merkezinde kentleşmenin en yoğun olduğu bölgelerden birinde yer alan L26 numaralı lokasyonda, en düşük yeraltısıyu sıcaklığı Mart ayında 7,60°C ile kırsal alanların ve ekili tarım arazilerinin yoğunlukta olduğu L40 numaralı lokasyonda gözlemlenmiştir. Yeraltısıyu sıcaklığının yıl içerisinde en yüksek olduğu ay; ortalama 14,43°C sıcaklık ile Ağustos ayı, en düşük olduğu ay ortalama 11,83°C ile Mart ayıdır. İncelenen tüm kuyulardan elde edilen verilere göre; yeraltısıyunun Kütahya şehir merkezinde alansal olarak yıllık ortalama

Çizelge 3- Ölçüm yapılan kentsel (U), kırsal (R) ve endüstriyel bölgelerdeki kuyularda yıllık ortalama yeraltısuyu sıcaklığı (T_{sort}) değerleri.

Lokasyon	L1	L2	L3	L4	L5	L6	L7	L8	L9	L10	L11	L12	L13	L14
T_{sort} (°C)	11,22	12,72	12,28	12,69	12,95	13,96	14,88	15,92	14,76	16,63	13,89	12,11	12,44	10,90
Bölge	R	R	R	R	R	U	U	U	U	U	U	U	U	R
Lokasyon	L15	L16	L17	L18	L19	L20	L21	L22	L23	L24	L25	L26	L27	L28
T_{sort} (°C)	11,82	13,80	11,64	14,15	14,01	14,59	13,56	11,05	11,71	12,76	15,71	15,93	11,58	13,15
Bölge	U	R	R	I	U	U	R	R	U	U	U	U	U	U
Lokasyon	L29	L30	L31	L32	L33	L34	L35	L37	L38	L39	L40	L41	L42	
T_{sort} (°C)	14,12	13,38	12,35	11,92	12,95	11,66	12,46	13,47	12,77	12,34	9,73	12,80	11,23	
Bölge	U	U	U	U	U	R	R	U	R	R	R	R	U	

T_{sort} (°C): Yıllık ortalama yeraltısuyu sıcaklığı değerleri R: Kırsal bölgelerde yer alan kuyular, U: Kentsel bölgelerde yer alan kuyular, I: Endüstriyel bölgelerde yer alan kuyular.

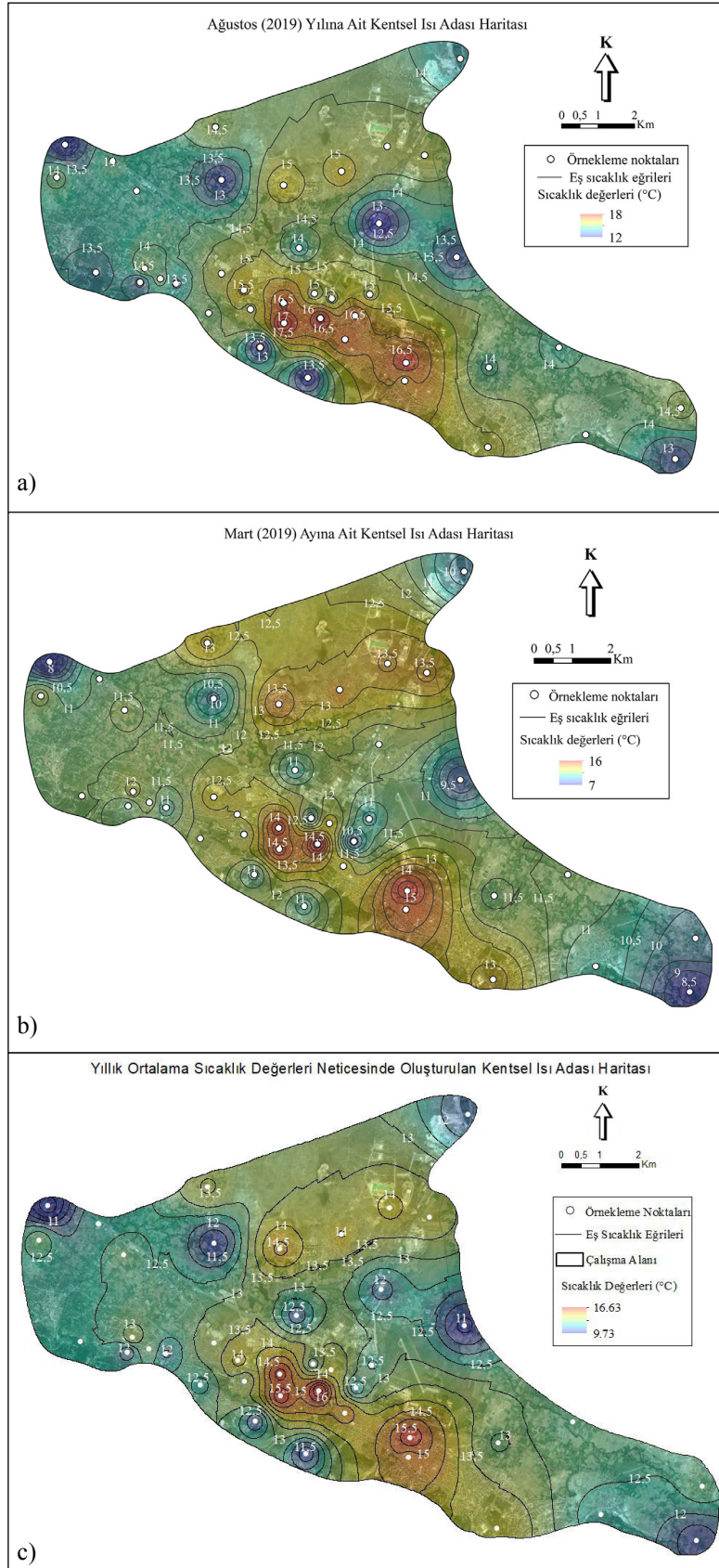


Şekil 3- 2019 yılında ölçüm yapılan kuyularda aylara göre yeraltısuyu sıcaklığı değişimi.

sıcaklığı 13,02°C'dir. Çoğunlukla yeşil alan ve tarım arazilerinden oluşan kırsal alanlar ile kentleşmenin yoğun olduğu şehir merkezindeki yeraltısuyu sıcaklık farkı aydan aya değişmekte olup, bu fark 1,63°C'ye kadar yükselmektedir.

Elde edilen bu yeraltısuyu sıcaklığı değerlerinin alansal dağılımını gözlemlemek ve kentsel ısı adası etkisinin alansal dağılımını tespit etmek için yapılan ölçümler neticesinde; en yüksek yeraltısuyu sıcaklık ortalamasına sahip Ağustos ayı, en düşük yeraltısuyu sıcaklık ortalamasına sahip Mart ayı ve 12 aylık ortalama yeraltısuyu sıcaklık değerlerine göre ArcMap 10.7 yazılımında (ESRI, 2019) Internal Distance Weighting (IDW) metoduyla kentsel ısı adası haritaları oluşturulmuş, kentsel ısı adasının yeraltısuyu ve çevresine etkisi incelenmiştir (Şekil 4).

Yıllık ve aylık kentsel ısı adası haritaları incelendiğinde, Kütahya şehir merkezinde yeraltısuyu sıcaklıkları bölgeden bölgeye çok değişiklik göstermekte olup, kentleşmenin yoğun olduğu bölgelere doğru sıcaklık artışı eğiliminde olduğu açıkça gözlenmektedir. En düşük sıcaklıklar kırsal alanlarda, en yüksek sıcaklıklar ise yapılaşmanın olduğu bölgelerde gözlenmiştir. Kent bölgesinde, yeraltısuyu sıcaklığı Ağustos ayında 16,93°C'ye kadar yükselmektedir. Kırsal alanda bu değer aynı ay içerisinde 11,20°C olarak ölçülmüştür. Kırsal alanlarda yer alan kuyulardan yapılan ölçümlerde yeraltısuyu sıcaklığı yıllık ortalama 11,95°C iken, kentsel alanlarda yer alan yeraltısuyu sıcaklığında bu ortalama +1,63°C yükselerek 13,58°C'ye ulaşmaktadır. Kuyu bazında tek tek karşılaştırma yapıldığında ise, kentsel ve kırsal alanlarda yer alan iki kuyu arasındaki fark



Şekil 4- Kentsel ısı adası haritaları. a) Yeraltısuyu sıcaklığı değerlerinin en yüksek olduğu Ağustos (2019) ayı, b) Yeraltısuyu sıcaklığı değerlerinin en düşük olduğu Mart (2019) ayı, c) Yıllık ortalama sıcaklık değerleri.

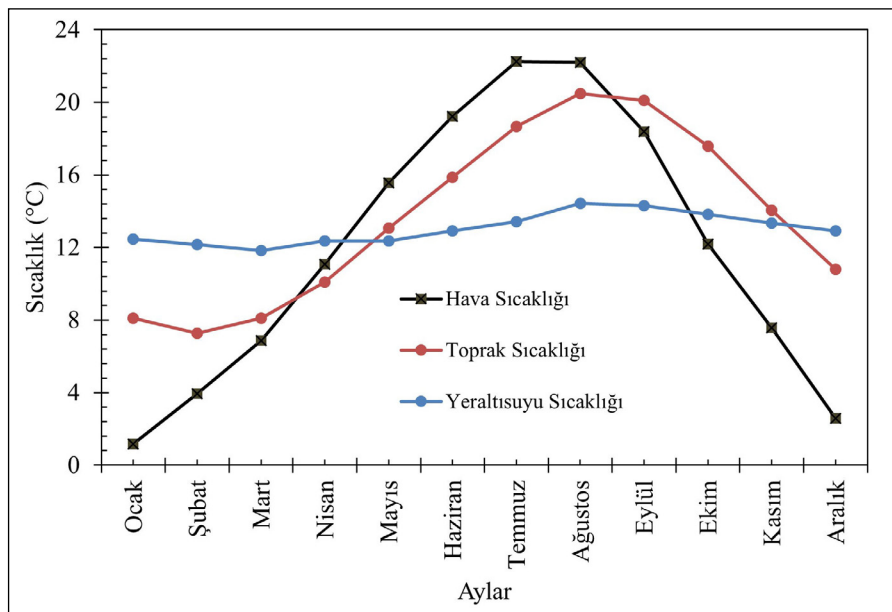
yaklaşık 7°C'ye kadar yükselmektedir. Örneğin, Kütahya'da şehirleşmenin en yoğun olduğu Atatürk Bulvarı'nda ölçüm yapılan bir lokasyonda yıllık yeraltısuyu sıcaklığı ortalaması 16,63 °C iken, tarımsal arazilerin ve yeşil alanların egemen olduğu eski bir köy olan Kirazpınar Mahallesi'nde yer alan kuyuda bu değer 9,73°C olup arada 6,90°C'lik bir fark vardır. Bu durum; insan kaynaklı yapıların yeraltısuyu sıcaklığı üzerindeki doğrudan etkisi açısından önemli bir gösterge olarak düşünülmektedir. Oluşturulan haritalara göre (Şekil 4) Kütahya şehir merkezinde yeraltısuyu sıcaklığı değerleri, çalışma alanı içerisinde heterojen dağılım göstermekte olup, bu sıcaklık değerleri kentleşme gibi insan kökenli etkenlerle doğrudan bağlantılıdır.

Yıl boyunca değişen hava, toprak ve yeraltısuyu sıcaklıkları değerlendirildiğinde; toprak ve yeraltısuyu sıcaklığı hava sıcaklığına paralel olarak artış/azalış göstermektedir (Şekil 5). Toprak sıcaklığı, hava sıcaklığından önemli derecede etkilenmekte ve sene içerisinde büyük artış ve azalışlar gözlenmektedir. Bunda kullanılan verilerin 100 cm derinlikteki toprak sıcaklığına ait olmasının da etkisi vardır. Çünkü; meteoroloji istasyonunda ölçülen toprak sıcaklığı değerleri, Popiel vd. (2001)'in 1 metre derinliğe kadar tabir ettiği yüzey zon içerisinden alınan değerlerdir ve bu zon günlük sıcaklık değişimlerinden etkilenmektedir. Yeraltısuyu sıcaklığı ölçümleri ise; yüzey zonundan değil, sığ zon içerisinden

gerçekleştirildiği için yeraltısuyunda sıcaklık dalgalanmaları daha az gözlenmektedir.

5. Sığ Jeotermal Enerji

Son yıllarda nüfusun artmasına bağlı olarak artan enerji ihtiyacı, araştırmacıların yenilenebilir ve güvenilir enerji kaynaklarına yönelmesine yol açmıştır. Bu bağlamda, sığ jeotermal enerji son yıllarda özellikle Avrupa'da popüler hale gelen yenilenebilir enerji kaynaklarından biridir. Kentsel ısı adası etkisiyle yeraltısularında meydana gelen sıcaklık artışı, bu suların ısı potansiyelinin artmasına sebep olmuş, bu durum sığ bölgelerde yer alan yeraltısularının düşük entalpili enerji kaynağı olarak değerlendirilmesi fikrini doğurmuş ve sığ jeotermal enerji kavramı enerji literatürüne girmiştir. Sığ jeotermal enerji sistemleri ile bu yeraltısularının ısınma ihtiyacı için kullanılması mümkün hale gelmiştir. Türkiye, nüfusun sürekli olarak yükseldiği ve buna bağlı olarak kentleşmenin hızla arttığı bir ülkedir. Günümüzde Türkiye enerji ihtiyacını çoğunlukla yenilenemeyen enerji kaynaklarından ve fosil yakıtlardan sağlamaktadır. Bu kaynakların büyük bir kısmı yurtdışından ithal edilmektedir. Sığ jeotermal enerji gibi yenilenebilir enerji kaynaklarının yaygınlaştırılması ülke ekonomisi ve çevre sağlığı açısından önem arz etmektedir. Sığ jeotermal sistemler ile binaların hem ısıtma hem de soğutma ihtiyaçları karşılanabilmektedir.



Şekil 5- 2019 yılında aylara göre hava, 100 cm toprak ve yeraltısuyu sıcaklığı değişim grafiği.

Kütahya ve yakın çevresinin iklimi yazlar sıcak ve kurak, kışlar ise oldukça yağışlı olması nedeniyle bölgedeki sığ akiferler yeraltısuyu kaynakları açısından önemli bir potansiyele sahiptir. Yaz aylarının sıcak geçmesi, güneş ışınlarının bir kısmının doğal ve yapay zeminler tarafından soğurulmasına, bunun neticesinde söz konusu yeraltısuyu sıcaklıklarının dolayısıyla sığ jeotermal enerji potansiyelinin artmasına sebep olmaktadır. İklimsel koşullar ve kentleşme hızı değerlendirildiğinde, sığ jeotermal sistemin Kütahya’da enerji kaynaklarına önemli bir alternatif olacağı öngörülmektedir. Sığ jeotermal enerjinin yenilenebilir, çevre dostu ve sürdürülebilir olması sistemin en önemli avantajlarıdır. Günümüzde fosil yakıtlara bağlı enerji üretimi önemli miktarda CO₂ emisyonuna sebep olmakta, bunun neticesinde ciddi çevresel problemler meydana gelmektedir. Oysaki; ısı pompalarının kullanıldığı sığ jeotermal sistem, diğer sistemlere göre çok daha az CO₂ emisyonuna sebep olmakta ve bu durum sığ jeotermal sistemi çevre dostu bir sistem haline getirmektedir.

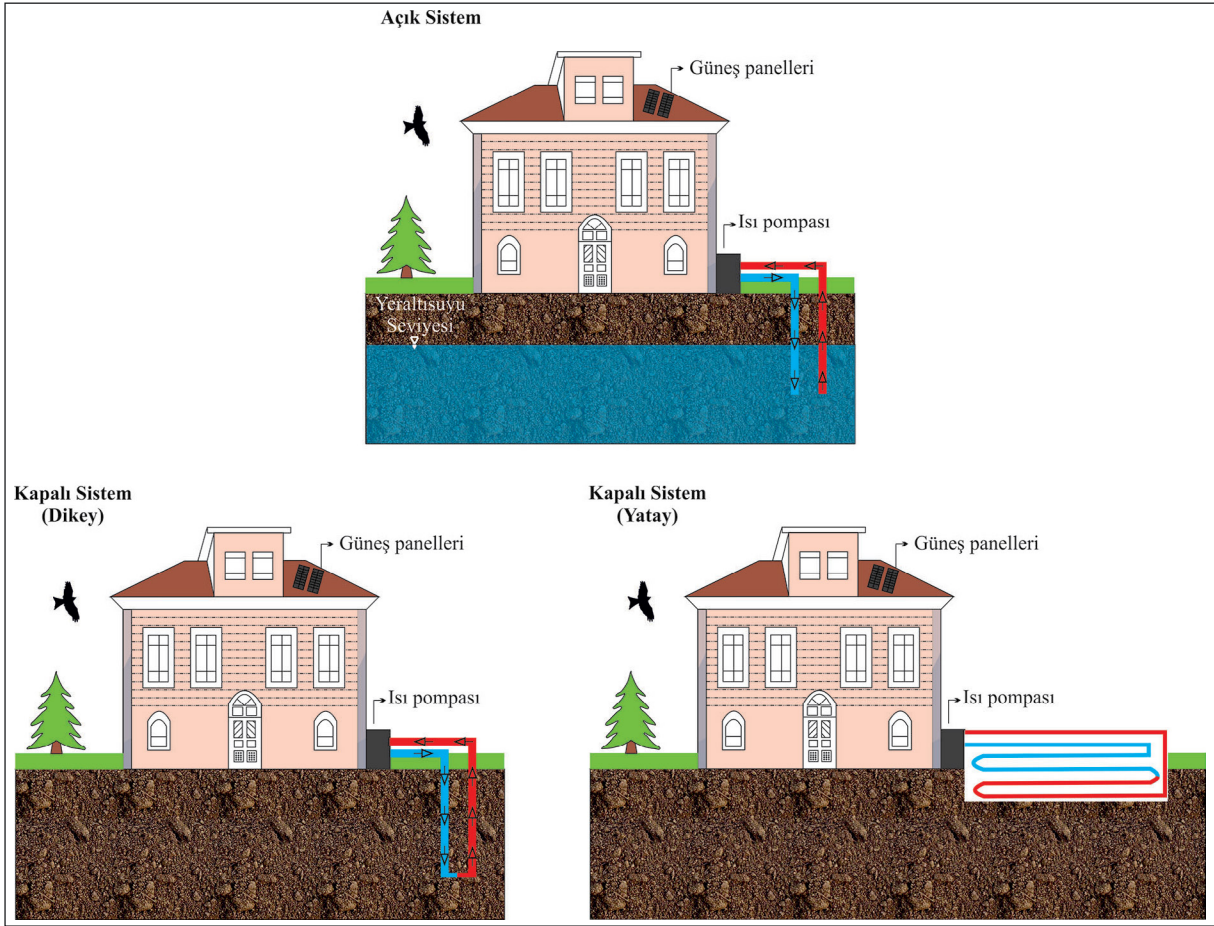
Jeotermal enerji, yeryüzünün derinliklerinde ısı biçiminde depolanan enerji olarak tanımlanmakta iken, sığ jeotermal enerji, yerin sığ derinliklerinde bulunan düşük sıcaklıktaki yeraltısuyunun sıcaklığının ısı pompaları aracılığı ile artırılarak, konutların ısıtma ve soğutma sistemlerinde kullanılmasına olanak sağlayan sistem olarak tanımlanmaktadır. Günümüze kadar gerçekleştirilen birçok çalışma (Allen vd., 2003; Kerl vd., 2012; Zhu vd., 2010), şehirlerin altında bulunan sığ akiferlerin düşük entalpiye sahip önemli bir enerji kaynağı olabileceğini göstermiştir. Yeryüzü, güneşten alınan enerjinin yeryüzünün altında depolanması noktasında bir toplayıcı işlevi görmektedir. Aynı şekilde yerkürenin çekirdeğinden gelen ısı da yeryüzünün altında depolanmaktadır. Bu iki kaynak; bir bölgenin sığ jeotermal potansiyelini etkileyen iki ana faktördür. Ancak, sığ jeotermal enerji, çoğunlukla güneş ışınlarından türemiş olup, sığ akiferlerdeki depolanmış enerjinin sadece küçük bir oranı dünyanın iç ısısından veya plaka tektoniği tarafından üretilen ısıdan kaynaklanmaktadır (Banks, 2010). Sığ jeotermal enerji, çoğunlukla yerin 100 m derinliğine kadar olan kısmını kapsamaktadır. Sistem daha derin bölgelere uygulanabilmektedir ancak bu durum maliyeti artırmaktadır.

Isı pompaları; ısıyı bir ısı kaynağından bir soğutucuya aktarmaya yarayan araçlardır (Aye

ve Charters, 2003). Sığ jeotermal sistemlerde, ısı pompaları suyun/akışkanın giriş çıkış yaptığı ve sıcaklığının artırılıp/azaltıldığı üniteler olmaları açısından hayati öneme sahiptir. Sığ jeotermal sistemler; çalışma prensibine ve kuruluş şekline göre açık sistem (open - loop) ve kapalı sistem (closed - loop) olmak üzere iki şekilde incelenmektedir (Şekil 6) (Stauffer vd., 2013; Huang, 2012; Rees, 2016). Bugüne kadar daha yaygın olarak kullanılan kapalı sistemde ısı kaynağı olarak toprak kullanılır. Toprak sıcaklığı akışkan yardımıyla zeminden alınır, boruların içerisinde dolaştırılan ve ‘termal transfer akışkanı’ olarak adlandırılan akışkana iletilir. Boruların içerisinde bulunan, su ve antifrizden oluşan bu akışkan, kapalı sistemde sürekli dolaşım yapmaktadır. Antifrizli akışkanın ısı alışverişi neticesinde topraktan kazandığı ısı, ısı pompaları aracılığıyla artırılarak yapıların ısıtma işlemlerinde kullanılmaktadır. Kapalı sistemde uygulama alanının elverişliliğine ve ısıtma/soğutma amacına göre borular 1 - 2 metre derinliğe yatay olarak, ya da 100 metre derinliğe kadar düşey olarak serilmektedir. Daha az olarak gözlenen açık sistemde ise, ısı enerjisi açılan sondaj kuyusu içerisine yerleştirilen borular yardımıyla doğrudan yeraltısuyundan, gölden veya nehirden alınmakta, bu su pompalanarak ısı eşanjörüne oradan da ısı pompasına iletilmektedir. Bir başka deyişle; açık sistemler, ısıtma ve soğutma işleminde kullanılacak olan suyun pompalama ile sondaj kuyusu aracılığıyla yeraltısuyundan ya da göl/nehir gibi su kütlelerinden çekildiği sistemlerdir. Açık bir sistemde su iki veya daha fazla yeraltısuyu kuyusu arasında dolaşım yapmaktadır. Bu su yeraltından çekilip ısıtma/soğutma işleminde kullanıldıktan sonra, ikinci bir sondaj kuyusu aracılığıyla aynı akifer içerisine veya yüzeyde bulunan herhangi bir su kütlesine (göl, nehir vb.) geri enjekte edilmektedir. Açık sistemde gerekli su miktarı çekildiğinde, düşümün en az düzeyde olması için akiferin yüksek geçirimliliğe sahip olması gerekmektedir (Rafferty, 2000; Sanner, 2001).

Sistem maliyetinde önemli bir etken olan ısı pompasının performans katsayısı (COP), bir ısı pompası sisteminde sistem çıkışında elde edilen enerjinin, harcanan elektrik enerjisine oranı olarak tanımlanmaktadır (Curtis vd., 2005). COP aşağıda verilen eşitlikle hesaplanır.

$$COP = \frac{Q}{W}$$



Şekil 6- Sığ jeotermal sistemlerin şematik gösterimi.

Burada Q : sistem tarafından çıkarılan faydalı ısı miktarı; W : sistemin gerektirdiği işittir. Daha açık bir ifadeyle; bu katsayı sistemin harcadığı elektrik enerjisine karşılık, üretebildiği ısı miktarı arasındaki oranı ifade etmektedir. COP değerinin yüksek olması, sistem maliyetinin düşük olması için ısı pompalarında arzu edilen bir durumdur. Örneğin COP değeri 4 olan bir sistemde, tüketilen bir birim elektrik enerjisi karşılığında 4 birimlik ısı elde edilmektedir. COP termal yüke, bina tipine, tedarik edilecek sıcaklığa, giren su sıcaklığına, iklimsel koşullara, ısı dönüştürücünün boyuna, malzemesine, tipine bağlı olarak değişmektedir (Sanner vd., 2003; Yalçın ve Yetemen, 2009). Ayrıca; ısı pompasının COP katsayısı giren suyun sıcaklığına göre artış göstermektedir (Boyd ve Lineau, 1995; Sanner vd., 2003). Dolayısıyla; rezervuar sıcaklığının yüksek olması COP değerini arttıracak, bu da sistem maliyetini düşürecektir.

Allen vd. (2003)'e göre, 12°C yeraltısuyu sıcaklığına sahip 1 metre kalınlığındaki çakıl akiferde

sığ jeotermal sistemin kullanılması durumunda, yıllık 2 GWh enerji tasarrufu sağlanmaktadır. Aynı araştırmacıya göre; 12°C yeraltısuyu sıcaklığına ve 20 l/s verime sahip bir kuyuda 4,5:1 COP değeri ile çalıştırılan bir ısı pompası 865 kW ısı üretebilmektedir. Yıllık ortalama yeraltısuyu sıcaklığının $3,5$ ile $6,6^{\circ}\text{C}$ arasında değiştiği Finlandiya'da (Mäkki ve Soveri 1986; Oikari, 1981), 3,5 COP değerine sahip su kaynaklı ısı pompaları aracılığıyla ısınma ihtiyacı için 55 - 60 MW arasında enerji sağlanabileceği belirtilmiştir (Arola vd., 2014). Bir önceki kısımda belirtildiği gibi Kütahya şehir merkezi, kırsal alanlar ile kentsel alanlar arasında $+1,63^{\circ}\text{C}$ 'lık yeraltısuyu sıcaklığı farkı ile kentsel ısı adası etkisinin görüldüğü bir bölgedir. Kütahya ili şehir merkezinde kentsel ısı adası etkisi neticesinde yeraltısuyu sıcaklıklarının artması, yeraltısuyu sıcaklığının yıllık ortalama $13,02^{\circ}\text{C}$, toprak sıcaklığının ise son 10 yıl verilerine göre yıllık ortalama $13,68^{\circ}\text{C}$ sıcaklıkta olması, yeraltısuyu taşıyan akiferlerin sığ derinlikte yer alması ve yeraltısuyu seviyesinin de yüzeye yakın olması

Kütahya şehir merkezinde sıg jeotermal sistemlerin uygulanabilirliğini artıran faktörlerdir. Bu bağlamda, çalışma kapsamında elde edilen veriler, önceki çalışmalarda sonuçlarla karşılaştırıldığında (Allen vd., 2003; Arola vd., 2014; Zhu vd., 2010) Kütahya’da hem açık hem de kapalı sıg jeotermal sistemlerin kurulumu noktasında oldukça ümit verici bir tablo ortaya çıkmaktadır.

6. Kütahya Şehir Merkezindeki Alüvyon Akiferin Enerji Potansiyeli

Sıg akiferlerde yer alan ısı enerjisinin, sıg jeotermal sistemler aracılığıyla konut ısıtma ve/veya soğutma işlemlerinde kullanılması, son yıllarda özellikle Avrupa’da gittikçe yaygınlaşmaktadır. Kentsel ısı adası etkisiyle artan yeraltısuyu ve toprak sıcaklıkları, sıg akiferlerin jeotermal rezervuar olarak değerlendirilmesine imkân tanımak ve sıg jeotermal sistemler ile bu ısı konut ısıtmasında kullanılmaktadır. Bu sebeple; Kütahya ili şehir merkezinde yeraltısuyu taşıyan alüvyon akiferin teorik ısı kapasitesi Çizelge 4’teki veriler kullanılarak Balke (1977) tarafından düzenlenen aşağıdaki eşitlik aracılığıyla hesaplanmıştır.

$$Q = Q_w + Q_s = V n C_w \Delta T + V (1 - n) C_s \Delta T$$

Burada Q (kJ) akiferin teorik olarak toplam ısı içeriği, V (m³) akifer hacmi, n porozite, C_w ve C_s (kJm⁻³K⁻¹) su ve zeminin teorik ısı kapasitesi, Q_w ve Q_s (kJ) yeraltısuyunda ve zeminde depolanan ısıyı ifade etmektedir. Alman Mühendisler Birliği (Verein Deutscher Ingenieure, VDI) tarafından yayınlanan VDI 4640/1 (2010) kılavuzuna göre su için C_w değeri 4.150 kJm⁻³K⁻¹’dir. C_s değeri ise sediman tipine bağlı olarak değişmekte olup, Torino Teknik Üniversitesi

(POLITO) laboratuvarlarında gerçekleştirilen deneyler neticesinde elde edilen sonuçlara göre; Kütahya şehir merkezinde 1.934 ile 2.216 kJm⁻³K⁻¹ arasında değişmektedir. ΔT akifer boyunca gözlenen sıcaklık düşüşü olup, 2 ile 6 °C arasında değişmektedir. Burada seçilen ΔT değerlerinin, yine Alman Mühendisler Birliği (Verein Deutscher Ingenieure, VDI) tarafından yayınlanan VDI 4640/4 (2004) kılavuzunda belirlenen sınırlar içerisinde olmasına özen gösterilmiştir. Alüvyon akiferin kalınlığı Devlet Su İşleri (DSİ) ve özel mühendislik büroları tarafından günümüze kadar yapılan birçok sondaj verisi kullanılarak tespit edilmiş olup, Kütahya’da 10 ile 64 m arasında değişmektedir. Bir diğer parametre olan alüvyon akiferin çalışma alanı içerisindeki hacmi, alınan sondaj verileri kullanılarak *Surfer 14 (Golden Software, LLC, 2017)* ve *ArcMap 10.7 (ESRI, 2019)* yazılımları aracılığıyla hesaplanmıştır.

Elde edilen sonuçlara göre, Kütahya ili şehir merkezinde yer alan alüvyon akiferler, teorik olarak 1,64×10¹³ kJ K⁻¹ ile 5,55×10¹³ kJ K⁻¹ arasında ortalama 3,50×10¹³ kJ K⁻¹ gibi ciddi bir ısı potansiyeline sahiptir. Alüvyon akifer içerisindeki bu ısının akifer verimliliği, akiferin hidrolik iletkenliği, yıllık yeraltıyusu bütçesi, ısı transferi modelleri gibi faktörler ile sıg jeotermal sistemler açısından uygunluğu tam olarak ortaya koyulduktan sonra, konut ve/veya ticari binaları ısıtma işlemlerinde kullanılabileceği öngörülmektedir. Bugüne kadar dokunulmamış bu “saklı hazine”nin sıg jeotermal sistemler yardımıyla ortaya çıkarılmasıyla birlikte fosil yakıtların tüketiminin azalmasıyla çevre sağlığına, ithal edilen enerji miktarının azalması ve yenilenebilir öz kaynaklarımıza dönmemiz ile ülke ekonomisine önemli katkıda bulunulabileceği öngörülmektedir.

Çizelge 4- Kütahya ili alüvyon akiferi içerisindeki ısı içeriği hesabı.

Parametreler	En Düşük	En Yüksek	Ortalama
Akifer Kalınlığı (m)	10	64	28
Akifer hacmi, V (m ³)	2,87×10 ⁹		
Porozite, n	0,42	0,52	0,47
Suyun hacimsel ısı kapasitesi, C _w (kJ m ⁻³ K ⁻¹)*	4,150		
Yeraltısuyunun potansiyel ısı, Q _w (kJ K ⁻¹)	1×10 ¹³	3,72×10 ¹³	2,24×10 ¹³
Zeminin hacimsel ısı kapasitesi, C _s (kJ m ⁻³ K ⁻¹)	1.934	2.216	2.075
Zeminin potansiyel ısı, Q _s (kJ K ⁻¹)	6,44×10 ¹²	1,83×10 ¹³	1,26×10 ¹³
Sıcaklık farkı, ΔT (°C)	2	6	4
Yeraltındaki ısı potansiyeli (kJ)	1,64×10 ¹³	5,55×10 ¹³	3,50×10 ¹³

* VDI 4640/1 (2000) kılavuzunda tavsiye edilen değer baz alınmıştır.

7. Tartışma

Kentsel ısı adası etkisinin yeraltı ve çevresine etkilerinin incelendiği çeşitli çalışmalarda (Taniguchi vd., 1999; Changnon, 1999; Ferguson ve Woodbury, 2004; Taniguchi, 2006; Taniguchi, 2007) bu etkinin yeraltı sıcaklığı üzerinde güçlü bir etkiye sahip olduğu ispat edilmiştir. Bu çalışmada da bir yıl boyunca ölçülen yeraltısuyu sıcaklığı değerleri kullanılarak, Kütahya şehir merkezindeki kentsel ısı adası etkisi ortaya çıkarılmıştır. Oluşturulan kentsel ısı adası haritalarında Kütahya’da yeraltısuyu sıcaklığı değerlerinin kentsel ve endüstriyel alanlara doğru artış gösterdiği net bir şekilde gözlenmiştir.

Kentsel ısı adası etkisi neticesinde sıcaklığı artan yeraltısuyu, sığ jeotermal sistemler ile konutların ısınma/soğutma ihtiyacında kullanılabilir. Bu sistemler Avrupa’da 2000’li yılların başından beri yaygınlaşmış ve gittikçe popüler hale gelmiştir. 2019 yılından Sanner (2019) tarafından yayınlanan Avrupa Jeotermal Kongresi (European Geothermal Congress) raporuna göre, Avrupa’da hali hazırda kullanılmakta olan yaklaşık 1,9 milyon adet sığ jeotermal sistem bulunmaktadır. Aynı rapora göre, sığ jeotermal enerji Avrupa’daki jeotermal kullanımın %66,5’ini oluşturmakta ve söz konusu sistemler ile Avrupa ülkelerinde elde edilen enerji toplam 26.900 MWth (megawatt termal) kapasiteye ulaşmıştır (Sanner, 2019). Buna karşın, ülkemizde sığ jeotermal enerji sistemlerin halen yaygın olmayışı bu alanda ciddi bir eksiklik olarak göze çarpmaktadır. Bu sebeple, çalışma kapsamında Kütahya şehir merkezinde kentsel ısı adası etkisinin varlığının, buna bağlı olarak sığ derinliklerde yer alan akiferlerde sıcaklık artışının tespiti amaçlanmıştır. Yapılan yeraltısuyu sıcaklığı ölçümleri sonucunda oluşturulan ısı adası haritaları neticesinde Kütahya şehir merkezinde kentsel ısı adası etkisinin varlığı tespit edilmiştir. Sonrasında kentsel ısı adası etkisi ile sıcaklığı artan alüvyon akiferin ısı potansiyeli belirlenmiştir. Elde edilen sonuçlara göre bu akiferin teorik olarak ortalama $3,50 \times 10^{13} \text{ kJ K}^{-1}$ ısı potansiyeline sahip olduğu ortaya konmuştur. Bu veri nüfus yoğunluğunun yüksek olduğu şehir merkezlerinde büyük miktarlarda termal enerji depolandığını göstermektedir. Zhu vd. (2010) tarafından Köln (Almanya) ve Winnipeg (Kanada) şehirlerinde gerçekleştirilen çalışmada bu değer; Köln için $2,90 \times 10^{13} \text{ kJ}$, Winnipeg için $4,10 \times 10^{13} \text{ kJ}$ şeklindedir. Araştırmacı bu enerjinin Köln kentinin yıllık ısınma ihtiyacının 2,5 katına karşılık gelecek

kadar büyük bir miktar olduğunu vurgulamıştır. Kütahya şehir merkezinde alüvyon akifer içerisinde hesaplanan potansiyel enerji, Köln kentindeki enerjinin 1,2 katıdır. Bayer vd. (2019) bir şehrin/bölgenin sığ jeotermal potansiyelini “teorik potansiyel”, “teknik potansiyel” ve “ekonomik potansiyel” olmak üzere üç kategoriye ayırmıştır. Araştırmacıya göre yeraltında fiziksel olarak bulunan mevcut toplam enerji “teorik potansiyeli” ifade eder. Bir sonraki alt kategori olan “teknik potansiyel”, teorik potansiyelin mevcut teknolojilerle kullanılabilecek kısmıdır. Teknik olarak çıkarılabilir enerjinin ekonomik olarak sadece bir kısmı makul olduğundan, diğer kategori “ekonomik potansiyel” olarak tanımlanmaktadır. Bu çalışma kapsamında hesaplanan enerji teorik potansiyeli ifade etmektedir.

Çalışma kapsamında elde edilen yeraltısuyu sıcaklıkları ve Kütahya Meteoroloji İstasyonu’ndan alınan toprak sıcaklığı değerleri sığ jeotermal sistem için uygun değerlerdir. Yer in sığ derinliklerinde yer alan bu gizli hazinenin ortaya çıkarılması hem Kütahya hem de fosil yakıt tüketiminin ve enerji ithalatının yüksek olduğu ülkemiz ekonomisi açısından oldukça önem arz etmektedir.

Bundan sonrası için alüvyon akiferin altında sığ derinliklerde yer alan diğer akiferler de dahil edilerek, Kütahya’nın kentsel, endüstriyel ve kırsal bölgeler bazında sığ jeotermal enerji potansiyelinin teorik olarak belirlenmesi ve haritalandırılması gerektiği düşünülmektedir. Kentsel ısı adası haritaları ve akiferlerin ısı potansiyeli hesapları, sığ jeotermal sistemlerin, gelecekte Kütahya şehir merkezinde ve/veya ülke genelinde uygulanabilirliğinin değerlendirilmesinde önemli veriler sağlayabilirler. Jeolojik, hidrojeolojik ve alansal koşullara göre sığ jeotermal sistemlerden açık veya kapalı sistem tercih edilebilir ve söz konusu sistemler ile şehrin ısınma ihtiyacının bir kısmı karşılanabilir. Böylelikle yenilenebilir milli bir enerji kaynağı ile ülke ekonomisine, fosil yakıt tüketiminin azalması ile de çevre sağlığına katkıda bulunulabilir.

8. Sonuçlar

Yeraltısuyu sıcaklık dağılımının, kentleşme ve endüstrileşmeye bağlı olarak bölgelere göre değişkenlik gösterdiği Kütahya ili şehir merkezinde, yeraltısuyu sıcaklığı anomalileri şehrin merkezine doğru net bir artış göstermektedir. Yeraltısuyu

sıcaklığına insan kaynaklı faktörlerin etkisinin minimum düzeyde olduğu kırsal alanlarda yeraltısuyu sıcaklığı değerleri, kentsel alanlara göre daha düşük çıkmıştır. Kentleşmenin ve insan kaynaklı diğer faktörlerin yoğun olduğu bölgelerde ise yeraltısuyu sıcaklığı değerlerinin kırsal alanlara göre 1,63 °C daha yüksek olduğu gözlenmiştir. Bu anlamda çalışma sonuçları, kentsel ısı adası etkisi odaklı önceki çalışmalarla uyumluluk göstermektedir. Bu durumun ana sebebi, şehir merkezinde yoğun yapılaşma, yeşil alanların azlığı, yeraltı otoparkları, hava almayan kapalı yüzeyler, kanalizasyon sistemleri, binaların tabanından yeraltına termal iletim yoluyla yayılan ısıların etkileriyle, yıllardır birikmiş olan ve halen birikmeye devam eden termal enerjidir. Yıllık hava sıcaklığı ile yıllık yeraltısuyu sıcaklığı değerleri de karşılaştırıldığında, bu iki parametrenin ilişkili olduğu ve yeraltı sıcaklığını hava sıcaklığının kontrol ettiği gözlenmiştir.

Kütahya ili şehir merkezi altındaki alüvyon akiferin ısı potansiyeli sayısal olarak hesaplanmış ve bu akiferin teorik olarak en az $1,64 \times 10^{13}$ kJ K⁻¹, en fazla $5,55 \times 10^{13}$ kJ K⁻¹, ortalama $3,50 \times 10^{13}$ kJ K⁻¹ ısı potansiyeline sahip olduğu ortaya konmuştur.

Kent alanındaki sıcaklık anomalileri incelendiğinde, kentsel alandaki yeraltısuyu sıcaklığının, kırsal alanlara göre daha fazla değişkenlik gösterdiği gözlenmiştir. Bir başka ifadeyle; kırsal bir alanda yeraltısuyu sıcaklığı bir kuyuda başka bir kuyuya göre çok fazla değişkenlik göstermezken, kentsel bir alan içerisinde bu değerler kuyudan kuyuya daha fazla değişim göstermektedir. Bu durumun kent merkezindeki binalar arasındaki boşlukların boyutlarından kaynaklandığı düşünülmektedir. Kent merkezinde bazı binalar çok sık sıralanmışken bazı binalar ise daha seyrek bir dağılım göstermektedir. Seyrek dağılımın gözlemlendiği kentsel alanlarda binalar arasındaki boş alanlar yeşil alanlardan ya da doğal toprak yüzeylerden oluşmaktadır. Bu da yeraltısuyu sıcaklığının alanlara göre değişim göstermesine sebep olmaktadır. Bu durumdan yeraltısuyu sıcaklığının kırsal alanlarda homojen, kentsel alanlarda ise heterojen bir dağılım gösterdiği sonucu çıkarılabilir.

Kent merkezinin haricinde yeraltısuyu sıcaklığı değerleri, endüstriyel alanlarda da kırsal bölgelere göre daha yüksektir. Fabrikalar tarafından akifer içerisine sıcak atık su boşalımı olabileceği ve

yeraltısuyu sıcaklığını fabrika yapılaşmasının yanı sıra bu boşalımın da artırabileceği düşünülmektedir.

Kentsel ısı adası etkisinin sadece hava sıcaklığı değerlerinde değil aynı zamanda yeraltı ve çevresi üzerinde de etkisi olduğu kanıtlanmıştır. İnsan kaynaklı yapıların hapsedip yeraltına yaydıkları termal enerji neticesinde, yeraltısuyu ve toprak sıcaklığı değerleri değişmekte ve kentsel ısı adası etkisi ortaya çıkmaktadır.

Kütahya ili şehir merkezinde ölçülen yeraltısuyu sıcaklığı değerleri, sene boyunca tüm kırsal ve kentsel alanlar dahil edildiğinde 7,60°C ile 17,55°C arasında değişmekte, yıllık ortalama yeraltısuyu sıcaklığı 13,02 °C'dir. Bu değerler Kütahya'da sığ jeotermal sistem hususunda oldukça ümit verici değerlerdir. Ancak; sistemin uygulanabilirliği konusunda sıcaklık değerleri tek başına yeterli değildir. Sistemin uygunluğunun tam anlamıyla ortaya koyulması için akifer verimliliği, akiferin hidrolik iletkenliği, yıllık yeraltısuyu bütçesi gibi faktörlerin de tespit edilmesi gerekmektedir. Buna ek olarak sistemin uygulanması durumunda, akifer içerisinde ve akiferler arasında meydana gelecek ısı transferi modellerinin oluşturulması sistem sağlığı ve zaman içerisinde akiferlerde meydana gelebilecek termal etkinin/kirliliğin gözlenmesi, bu sayede sistem sürdürülebilirliğinin değerlendirilmesi açısından oldukça önemlidir.

Gerek Kütahya'da gerekse Türkiye'deki kentleşme hızı ve buna bağlı olarak artan enerji ihtiyacı dikkate alındığında sığ jeotermal enerji gibi yenilenebilir enerji kaynaklarının yaygınlaştırılması ülke ekonomisi ve çevre sağlığı açısından oldukça önem arz etmektedir. Bu tarz yenilenebilir öz kaynakların kullanılmasının yerli enerji potansiyelinin artmasında ve enerji konusunda dışa bağımlılığın azaltılması noktasında önemli rol oynaması beklenmektedir.

Katkı Belirtme

Çalışma kapsamında termal analizlerin gerçekleştirilmesi için Torino Teknik Üniversitesi (POLITO) laboratuvarlarını kullanıma açan öğretim üyesi Dr. Alessandro Casasso'ya, çalışmada kullanılan bazı verilerin temin edilmesinde desteklerinden dolayı Kütahya Meteoroloji Müdürlüğü'ne, Jeofizik Mühendisi Serkan Azdiken ve Jeoloji Yüksek Mühendisi Turgay Eser özelinde Devlet Su İşleri (DSİ) 3. Bölge Müdürlüğü'ne ve Zemin Mühendislik (Kütahya) firmasına teşekkür ederiz.

Değerlendirilen Belgeler

- Allen, A., Milenic, D., Sikora, P. 2003. Shallow gravel aquifers and the urban 'heat island' effect: a source of low enthalpy geothermal energy. *Geothermics* 32, 569-578.
- Ampofo, F., Maidment, G. G., Missenden, J. F. 2004. Underground railway environment in the UK Part 2: investigation of heat load. *Applied Thermal Engineering* 24, 633-645.
- Arola, T., Korkka-Niemi, K. 2014. The effect of urban heat islands on geothermal potential: examples from Quaternary aquifers in Finland. *Hydrogeology Journal* 22, 1953-1967.
- Aye, L., Charters, W. W. S. 2003. Electrical and engine-driven heat pumps for effective utilisation of renewable energy resources. *Applied Thermal Engineering* 23, 1295-1300.
- Balke, K. D. 1977. Das Grundwasser als Energieträger. Brennstoff - Wärme - Kraft 29, 191-194.
- Banks, D. 2010. An introduction to thermogeology: ground source heating and cooling. Blackwell, Oxford.
- Bayer, P., Attard, G., Blum, P., Menberg, K. 2019. The geothermal potential of cities. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 106, 17-30.
- Boyd, L. T., Lienau, P. J. 1995. Geothermal heat pump performance. *Geothermal Resources Council Annual 1995*, 8-11 October, Reno, NV, USA.
- Casasso, A., Pestotnik, S., Rajver, D., Jez, J., Prestor, J., Sethi, R. 2017. Assessment and mapping of the closed-loop shallow geothermal potential of Cerkno (Slovenia). *Energy Procedia* 125, 335-344.
- Changnon, S. A. 1999. A rare long record of deep soil temperatures defines temporal temperature changes and an urban heat island, *Climatic Change* 42, 531- 538.
- Curtis, R., Lund, J., Banner, B., Rybach, L., Hellstrom, G. 2005. Ground source heat pumps - geothermal energy for anyone, anywhere: current worldwide activity. *Proceedings of the World Geothermal Congress-2005*, 24-29 April 2005, Antalya, Turkey.
- Devlet Su İşleri Genel Müdürlüğü (DSİ), 2003. Kütahya Ovası Karst Hidrojeolojisi Ara Raporu.
- EGEC, 2018. 2018 EGEN Geothermal Market Report. Dumas, P., Garabetian, T., Serrano, C., Pinzuti, V. (editors). European Geothermal Energy Council (EGEC), Brussels.
- ESRI, 2019. ArcGIS Desktop 10.7. Redlands, CA: Environmental Systems Research Institute.
- Ezber, Y., Sen, O.L., Kindap, T., Karaca, M. 2007. Climatic effects of urbanization in Istanbul: a statistical and modeling analysis. *International Journal of Climatology* 27, 667-679.
- Ferguson, G., Woodbury, A. D. 2004. Subsurface heat flow in an urban environment, *Journal of Geophysical Research* 109, B02402, doi:10.1029/2003JB002715.
- Ferguson, G., Woodbury, A. D. 2007. Urban heat island in the subsurface. *Geophysical Research Letters* 34 (23).
- Francisco, Pinto, J., Carrilho, da Graça, G. 2018. Comparison between geothermal district heating and deep energy refurbishment of residential building districts. *Sustainable Cities and Society* 38, 309-324.
- Gallo, K. P., Owen, T. P. 1999. Satellite-based adjustments for the urban heat island bias. *Journal of Applied Meteorology and Climatology* 38, 806-813.
- Howard, L. 1883. *Climate of London*. 3rd Edition, Harvey and Darton, London.
- Huang, S. 2012. Geothermal energy in China. *Nature Climate Change* 2, 557-560.
- Huang, S., Taniguchi, M., Yamano, M., Wang, C. 2009. Detecting urbanization effects on surface and subsurface thermal environment - a case study of Osaka. *Science of the Total Environment* 407, 3142-3152.
- Karaca, M., Anteplioglu, U., Karsan, H. 1995. Detection of urban heat island in Istanbul, Turkey. *Nuovo Cimento* 18C (N1), 49-55.
- Kataoka, K., Matsumoto, F., Ichinose, T., Taniguchi, M. 2009. Urban warming trends in several large Asian cities over the last 100 years. *Science of the Total Environment* 407, 3112-3119.
- Kerl, M., Runge, N., Tauchmann, H., Goldscheider, N. 2012. Hydrogeologisches Konzeptmodell von München: Grundlage für die thermische Grundwassernutzung (Conceptual hydrogeological model of the City of Munich, Germany, as a basis for geothermal groundwater utilisation). *Grundwasser* 17, 127-135.
- Klysik, K., Fortuniak, K. 1999. Temporal and spatial characteristics of the urban heat island of Lodz, Poland. *Atmospheric Environment* 33, 3885-3995.
- Krarti, M., Lopez-Alonzo, C., Claridge, D. E., Kreider, J. F. 1995. Analytical model to predict annual soil surface temperature variation. *Journal of Solar Energy Engineering* 117, 91-99.
- Kottmeier, C., Bieger, C., Corsmeier, U. 2007. Effects of urban land use on surface temperature in Berlin.

- Journal of Urban Planning and Development 133, 128-137.
- Köppen, W., Geiger, R. 1954. *Klima der erde* (Climate of the earth). Wall Map 1:16 Mill. Klett-Perthes, Gotha.
- Kütahya Meteoroloji Müdürlüğü. 1970-2019 yılları arasında Kütahya Meteoroloji İstasyonu'ndan ölçülen Kütahya ili şehir merkezine ait aylık/yıllık hava sıcaklığı, 100 cm toprak sıcaklığı değerleri.
- Landsberg, H. 1956. The climate of towns. In *Man's Role in Changing the Face of the Earth*, Edited by W. L. Thomas Jr., pp. 584-603, University of Chicago Press, Chicago, III.
- Landsberg, H. E. 1981. *The urban climate*. Academic Press, New York.
- Lee, J. S., Kim, H. C., Im, S. Y. 2017. Comparative analysis between district heating and geothermal heat pump system. *Energy Procedia* 116, 403-406.
- Mälikki, E., Soveri, J. 1986. Pohjavesi (Groundwater). In: Mustonen S (ed) *Sovellettu hydrologia* (Applied hydrology). Vesiyhdistys ry (Water Association). Mäntän kirjapaino (Mäntän printing house), Mänttä.
- Menberg, K., Bayer, P., Zosseder, K., Rumohr, S., Blum, P. 2013a. Subsurface urban heat islands in German cities. *Science of the Total Environment* 442, 123-133.
- Menberg, K., Blum, P., Schaffitel A., Bayer, A. 2013b. Long-term evolution of anthropogenic heat fluxes into a subsurface urban heat island. *Environmental Science and Technology* 47, 9747-9455.
- Montavez, J. P, Rodriguez, A., Himenez, J. I. 2000. A study of the urban heat island of Granada. *International Journal of Climatology* 20, 899-911.
- Murtha, G. G., Williams, J. 1986. Measurement, prediction and interpolation of soil temperature for use in soil taxonomy: Tropical Australian experience, *Geoderma* 37, 189-206.
- Nitoiu, D., Beltrami, H. 2005. Subsurface thermal effects of land use changes. *Journal of Geophysical Research* 110, F01005, doi:10.1029/2004JF000151.
- Oikari, H. 1981. Pohjaveden lämpötila Etelä - ja Keski-Suomessa vuosina 1975-1978 (Groundwater temperature in southern and central Finland in 1975 - 1978). *Vesihallituksen lähde- ja pohjavesiputkihavaintoihin perustuva selvitys* (Report based on the Water Board's spring and groundwater pipe observations), Pro gradu-tutkielma (Master's thesis). Maantieteen Laitos (Department of Geography), Luonnonmaantiede (Natural Geography), Helsingin Yliopisto (University of Helsinki), Helsinki, 65.
- Oke, T. R. 1973. City size and the urban heat island. *Atmospheric Environment* 7, 769- 779.
- Oke, T. R. 1987. *Boundary layer climates*. Routledge, London.
- Oke, T. R. 1988. The urban energy balance. *Progress Physical Geography* 12, 471-508.
- Özburan, M. 2009. Kütahya ve çevresinin neotektonik incelenmesi. Doktora Tezi, Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 227.
- Perrier, F., Le Mouel, J.L., Poirier, J.P., Shnirman, M.G. 2005. Long-term climate change and surface versus underground temperature measurements in Paris. *International Journal of Climatology* 25, 1619-1631.
- Pinho, O. S., Manso Orgaz, M. D. 2000. The urban heat island in a small city in coastal Portugal. *International Journal of Biometeorology* 44, 198-203.
- Pollack, H. N., Huang, S. P., Shen, P. Y. 1998. Climate change record in subsurface temperatures: a global perspective. *Science* 282, 279-281.
- Pophillat, W., Bayer, P., Teyssier, E., Blum, P., Attard, G. 2020. Impact of groundwater heat pump systems on subsurface temperature under variable advection, conduction and dispersion. *Geothermics* 83.
- Popiel, C. O., Wojtkowiak, J., Biernacka, B. 2001. Measurements of temperature distribution in ground. *Experimental Thermal and Fluid Science* 25, 301-309.
- Rafferty, K. 2000. Scaling in geothermal heat pump systems. *Geo - Heat Center Quart Bull.* 21(1), 11-15.
- Rees, S. 2016. *Advances in ground - source heat pump systems*. Amsterdam: Woodhead Publishing.
- Reiter, M. 2006. Vadose zone temperature measurements at a site in the northern Albuquerque Basin indicate ground-surface warming due to urbanization, *Environmental and Engineering Geoscience* 12, 353-360.
- Rybach, L., Sanner, B. 2000. Ground - source heat pump systems: the European experience. *Geo-Heat Center Quart Bull* 21(1), 16-26.
- Sanner, B. 2019. Summary of EGC 2019 Country Update Reports on Geothermal Energy in Europe, European Geothermal Congress 11-14 June 2019, Den Haag, The Netherlands.
- Sanner, B. 2001. Shallow geothermal energy. *Geo-Heat Center Quart Bull* 22 2), 19-25.
- Sanner, B., Karytsas, C., Mendrinos, D., Rybach, L. 2003. Current status of ground source heat pumps and underground thermal energy storage in Europe. *Geothermics* 32, 579-588.

- Soltani, M., Kashkooli, F. M., Dehghani-Sani, A. R., Kazemi, A. R., Bordbar, N., Farschi, M. J., Elmi, M., Gharali, K., Dusseault, M. B. 2019. A comprehensive study of geothermal heating and cooling systems. *Sustainable Cities and Society* 44, 793-818.
- Spronken-Smith, R. A., Oke, T. R. 1999. The thermal regime of urban parks in two cities with different summer climates. *International Journal of Remote Sensing* 19, 2085- 2104.
- Stauffer, F., Bayer, P., Blum, P., Giraldo, N. M., Kinzelbach, W. 2013. *Thermal use of shallow groundwater*. CRC Press.
- Taniguchi, M. 2006. Anthropogenic effects on subsurface temperature in Bangkok. *Climate of Past Discussions* 2, 831-846.
- Taniguchi, M., Uemura, T. 2005. Effects of urbanization and groundwater flow on the subsurface temperature in Osaka, Japan. *Physics of the Earth and Planetary Interiors* 305-313.
- Taniguchi, M., Shimada J., Tanaka, T., Kayane, I., Sakura, Y., Shimano, Y., Kawashima, S. 1999. Disturbances of temperature-depth profiles due to climate change and subsurface water flow: 1. An effect of linear increase in surface temperature caused by global warming and urbanization in the Tokyo metropolitan area, *Water Resour. Res.* 35, 137- 152.
- Taniguchi, M., Uemura, T., Jago-on, K. 2007. Combined effects of urbanization and global warming on subsurface temperature in four Asian cities, *Vadose Zone Journal* 6, 591-596.
- Taniguchi, M., Shimada, J., Fukuda, Y., Yamano, M., Onodera, S., Kaneko, S., Yoshikoshi, A. 2009. Anthropogenic effects on the subsurface thermal and groundwater environments in Osaka, Japan and Bangkok, Thailand. *Science of Total Environment* 407, 3153-3164.
- Türkiye İstatistik Kurumu (TÜİK), 2019. İl ve ilçelere göre il/ilçe merkezi, belde/köy nüfusu ve yıllık nüfus artış hızı verileri.
- VDI (Verein Deutscher Ingenieure), 2004. VDI 4640/4 Thermal Use of the Underground-Direct Uses.
- VDI (Verein Deutscher Ingenieure), 2010. VDI 4640 Thermal Use of Underground, Blatt 1: Fundamentals, Approvals, Environmental Aspects.
- Yalçın, T., Yetemen, O. 2009. Local warming of groundwaters caused by the urban heat island effect in İstanbul, Turkey. *Hydrogeology Journal* 17, 1247-1255.
- Zhu, K., Blum, P., Ferguson, G., Balke, K-D., Bayer, P. 2010. The geothermal potential of urban heat islands. *Environmental Research Letters* 5, 6.