

**Atf İçin:** Sağsöz, A. E., Caf, M. Yıldız, A. T. ve Polat, R. (2025). Türkiye'deki Jeotermal Suların Piper Diyagramı ile Sınıflandırılması ve Beton Üzerine Etkisi. *İğdır Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 15(1), 193-203.

**To Cite:** Sağsöz, A. E., Caf, M. Yıldız, A. T. & Polat, R. (2025). Classification of Geothermal Waters in Turkey with Piper Diagram and Its Effect on Concrete. *Journal of the Institute of Science and Technology*, 15(1), 193-203.

### **Türkiye'deki Jeotermal Suların Piper Diyagramı ile Sınıflandırılması ve Beton Üzerine Etkisi**

Arif Emre SAĞSÖZ<sup>1\*</sup>, Murat CAF<sup>2</sup>, Ahmet Tuğrul YILDIZ<sup>3</sup>, Rıza POLAT<sup>4</sup>

#### **Öne Çıkanlar:**

- Jeotermal Sular
- Beton
- Durabilite

#### **Anahtar Kelimeler:**

- Jeotermal Sular
- Beton
- Durabilite
- Sürdürülebilirlik
- Piper Diyagram

#### **ÖZET:**

Dünyada teknolojik gelişmeler, artan nüfus, daha iyi yaşam tarzı arzusu ile eş zamanlı olarak enerji ihtiyacı da artmaktadır. Artan enerji ihtiyacı fosil yakıtlardan kaynaklı CO<sub>2</sub> emisyonlarının artmasını da tetiklemektedir. Bu durumun önüne geçmek için sürdürülebilir, temiz, yenilenebilir enerji kaynaklarına yönelik talep gündeme gelmektedir. Güneş, rüzgâr, deniz, biokütle, jeotermal vb. kaynaklardan elde edilen enerjiler CO<sub>2</sub> emisyonlarından kaynaklı sorunları azaltmakta ve daha sürdürülebilir ortam oluşturmaktadır. Jeotermal kaynaklar bakımından en zengin ülkelerden biri olan Türkiye'deki sular, sıcaklık, pH ve kimyasal içeriklerinden dolayı farklılık göstermektedir. Bu farklılıklar ise jeotermal suların kullanıldığı tesislerde beton esaslı malzemelerin servis ömürlerini etkilediği hem mevcut jeotermal tesislerde yapılan incelemeler hem de literatür araştırmaları sonucunda görülmektedir. Bu amaçla, Türkiye de bulunan jeotermal suların sıcaklık, pH ve kimyasal içerik bakımından sınıflandırılması yapılmıştır. Sınıflandırmada su kimyası grafiksel yöntemlerinden biri olan Piper Diyagramı kullanılmıştır. Sonuç olarak, Türkiye de bünyesinde sodyum, klor ve bikarbonat tip su barındıran kuyuların daha fazla olduğu, genellikle pH değerlerinin 10'un altında ve 20-240°C arasında farklı sıcaklıklara sahip oldukları görülmüştür. Jeotermal sular farklı ısı ve kimyasal özelliklerinden dolayı beton üzerinde genel olarak olumsuz olmak üzere küreme, aşındırma, çökelme gibi farklı etkilere sahip olduğu değerlendirilmiştir.

### **Classification of Geothermal Waters in Turkey with Piper Diagram and Its Effect on Concrete**

#### **Highlights:**

- Geothermal waters
- Concrete
- Durability

#### **Keywords:**

- Geothermal waters
- Concrete
- Durability
- Sustainability
- Piper Diagram

#### **ABSTRACT:**

The need for energy is increasing simultaneously with technological developments, increasing population and the desire for a better lifestyle. Increasing energy demand also triggers an increase in CO<sub>2</sub> emissions from fossil fuels. In order to prevent this situation, the demand for sustainable, clean, renewable energy sources is on the agenda. Solar, wind, sea, biomass, geothermal, etc. energies obtained from sources reduce the problems caused by CO<sub>2</sub> emissions and create a more sustainable environment. In Turkey, which is one of the richest countries in terms of geothermal resources, the temperature, pH and chemical content of the waters differ. These differences affect the service life of concrete-based materials in the facilities where geothermal waters are used, both as a result of the investigations carried out in existing geothermal facilities and as a result of literature research. For this purpose, geothermal waters in Turkey have been classified in terms of temperature and chemical content. Piper Diagram, one of the graphical methods of water chemistry, was used in the classification. As a result, it was observed that the wells containing sodium, chlorine and bicarbonate type water in Turkey are more abundant, generally have pH values below 10 and have different temperatures between 20-240°C. It has been observed that geothermal waters have different effects on concrete such as curing, abrasion, precipitation, etc., which are generally negative due to their different temperature and chemical properties.

<sup>1</sup>Arif Emre SAĞSÖZ ([Orcid ID: 0000-0002-2388-1280](https://orcid.org/0000-0002-2388-1280)), Atatürk Üniversitesi, Pasinler Meslek Yüksekokulu, İnşaat Bölümü, Erzurum, Türkiye, Atatürk Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü

<sup>2</sup>Murat CAF ([Orcid ID: 0009-0000-6020-9154](https://orcid.org/0009-0000-6020-9154)), Atatürk Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Erzurum, Türkiye

<sup>3</sup>Ahmet Tuğrul YILDIZ ([Orcid ID: 0000-0003-1622-2022](https://orcid.org/0000-0003-1622-2022)), Atatürk Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Erzurum, Türkiye

<sup>4</sup>Rıza POLAT ([Orcid ID: 0000-0002-8990-035X](https://orcid.org/0000-0002-8990-035X)), Atatürk Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Erzurum, Türkiye.

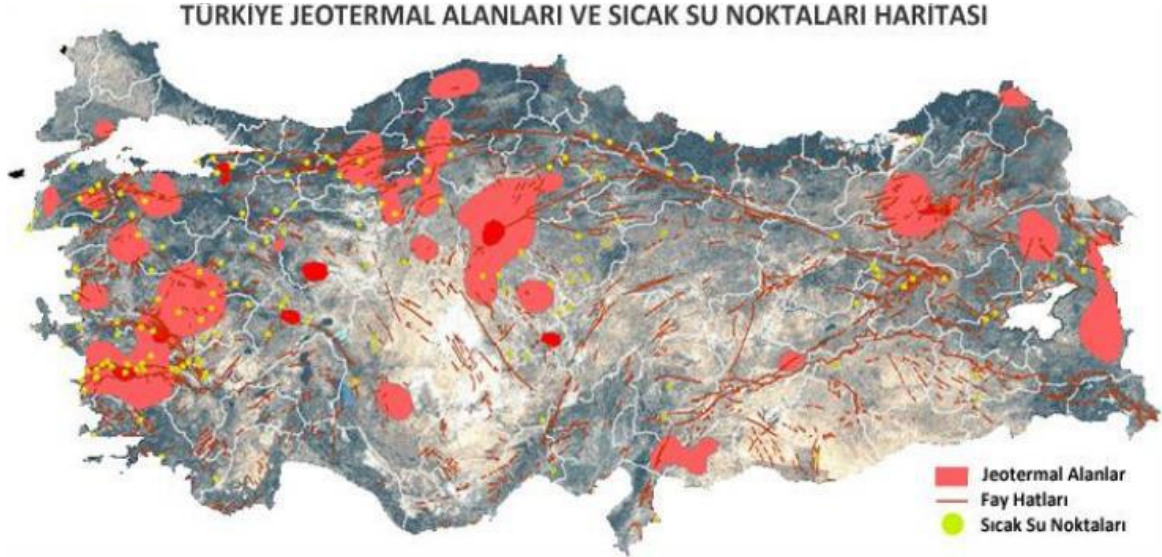
\*Sorumlu Yazar/Corresponding Author: Arif Emre SAĞSÖZ, e-mail: aesagosz@atauni.edu.tr

## GİRİŞ

Jeotermal enerjinin kullanımı Antik dönemlere dayanmaktadır (Fridleifsson, 2001). İnsanlar kaplıcaları banyo yapmak ve çamaşır yıkamak için kullanmışlardır. Dünyanın birçok yerinde medeniyetin temelleri ortak gelişmiştir. Etrüskler, Romalılar, Yunanlılar, Kızılderililer, Çinliler, Meksikalılar ve Japonlar, sıcak su kullandıklarına dair kanıtlar bırakmışlardır. Ayrıca antik çağlarda bu suların şifalı olduğuna inanılmıştır. MS 8. yüzyıldan bu yana Japonlar termal suları ruhun arındırılmasında ilk adım olan beden arındırılmasında kullanmışlardır. Romalılar kaplıcaları eğlence amaçlı kullanmışlardır (Kaygusuz & Kaygusuz, 2004). Jeotermal buhardan elektrik üretimi ilk olarak 1913 yılında İtalya'nın Lodrello kentinde yapılmıştır (Fridleifsson, 2001). Ülkemizdeki ilk jeotermal sondaj kuyusu İzmir Balçova'da açılmıştır. Daha sonra Denizli Kızıldere'deki jeotermal alanın bulunması ile elektrik amaçlı ilk tesis 1963 yılında kurulmaya başlanmıştır.

Jeotermal enerji kaynakları günümüzde farklı kullanım alanlarına sahiptir. Teknolojik gelişmelere paralel olarak elektrik üretimi, özellikle son yıllarda yeni santral türleri ve uygulamaları ile hızla gelişen bir sektör haline gelmiştir. Dünya toplam kurulu güç kapasitesi 2000 yılında 10.000 MW civarında iken 2020 yılında iki kat artarak 20.000 MW düzeyine ulaşmıştır. Elektrik üretimi açısından jeotermalden yararlanan ilk beş ülke; ABD, Endonezya, Filipinler, Türkiye ve Kenya'dır (Huttrer, 2020). Yeni Zelanda, Meksika, İtalya, İzlanda ve Japonya ise elektrik üretimi için jeotermal enerji santrallerini kullanan diğer ülkelerdir (Şener ve ark., 2023).

Şekil 1'de Ülkemizde bulunan jeotermal kaynaklar görülmektedir. Jeotermal kaynakları en yüksek potansiyele sahip bölgeler; Marmara, Ege ve Anadolu'nun iç batı kısımlarıdır (Çetin, 2014).



**Şekil 1.** Ülkemizdeki Jeotermal Alanlar ve Sıcak Su Noktaları (Kılıç ve Kılıç, 2013)

Jeotermal enerji, mevcut enerjinin en temiz formlarından biridir ve yüksek bir ticari değere sahiptir (Dickson & Fanelli, 2018). Jeotermal enerjinin kullanımı, asit yağmuru sorunlarını önler, sera gazı emisyonlarını ve diğer hava kirliliği türlerini önemli ölçüde azaltır (US Energy Information Administration). Bu olumlu yönlerinin yanı sıra başta su kimyasından kaynaklı bazı sorunlar ortaya çıkmaktadır. Jeotermal tesislerde kullanılan yapı malzemeleri, klor, sülfat, sıcaklık, pH dengesi vb. etkilerden dolayı kalıcılık sorunu (Şekil 2) yaşamaktadır. Başta inşaat çeliği ve beton elemanlarda

yaşanan korozyon, aşınma ve renk değişimi gibi sorunlar tesislerin servis ömrünü kısaltmakta ve sürdürülebilir olmaktan çıkarmaktadır.



Şekil 2. Jeotermal Suyun Hasar Oluşturduğu Yapılar

Farklı su içeriklerinin çimento esaslı malzemelere etkisi hakkında ülkemizde TS EN 206+A2 ve TS 13515'te aşınma ve klor etkisi gibi konulara yer verilmiştir. Fakat su hızının sabite yakın olacak derecede yavaş olması ve yer altı suyunun 5°C-25°C arasında sıcaklığa sahip olması esas alınarak değerlendirilmiştir (Baradan & Aydın, 2013). Hâlbuki jeotermal sular farklı kimyasal içeriklere, sıcaklıklara (yaklaşık 20°C-240°C) ve hareket hızlarına sahiptirler.

Jeotermal suların kuyulardan çıkarılması, taşınması, depolanması, hizmete sunulması ve tahliyesi gibi kullanım aşamalarında çimento/beton esaslı yapı elamanları/malzemelerin kullanılması kaçınılmazdır. Dolayısıyla çimento esaslı malzemelerin, jeotermal suların kimyasal içerikleri, pH değerleri ve sıcaklıklarından etkilenme durumlarından dolayı tesis-yapılarında bu suların içeriklerine göre kullanılacak betonların tasarımının yapılması gerekmektedir. Bu durum ülkemizdeki jeotermal tesislerin durabilite açısından korunması ve sürdürülebilirliğinin sağlanması açısından önem arz etmektedir. Bu amaçla MTA envanterinden alınan jeotermal tesisler/kaynaklar/kuyulardaki sulara ait kimyasal analiz sonuçları verileri üzerinden daha önce yapılmamış farklı bir sınıflandırma yöntemi olan Piper Diyagramı ile ülkemizdeki jeotermal suların kimyasal olarak sınıflandırılması yapılmış ve ülkemizdeki jeotermal su içerikleri ayrıca sıcaklık ve pH açısından da değerlendirilmiştir. Sınıflandırma daha önce Langelier-Ludwig (Kare Diyagram) ve Üçgen Diyagram gibi farklı yöntemlerle 220 jeotermal kaynak/kuyu suları (toplam kuyu sayısının 1/3 kadar örneklem olarak) için yapılmıştır. Fakat bu çalışmada kimyasal içeriklerin yansın pH ve sıcaklık açısından ülkemizdeki toplam 686 adet jeotermal su için sınıflandırma yapılmıştır.

Jeotermal kaynakların etkin kullanılması için tesislerde kullanılacak malzemelerin iyi tespit edilmesi gerekmektedir. İlk yatırım maliyeti yüksek olan bu tesislerin işletme maliyetleri de artarak mühendisliğin temel parametrelerinden biri olan ekonomi koşulunu devre dışı bırakacaktır. Jeotermal su tiplerinin bilinmesi, mineral miktar yoğunluklarının belirlenmesi açısından ve yapı malzemelerinin davranışı açısından yol gösterici olacaktır.

## JEOTERMAL SULARIN KİMYASAL, pH VE SICAKLIK AÇISINDAN SINIFLANDIRILMASI

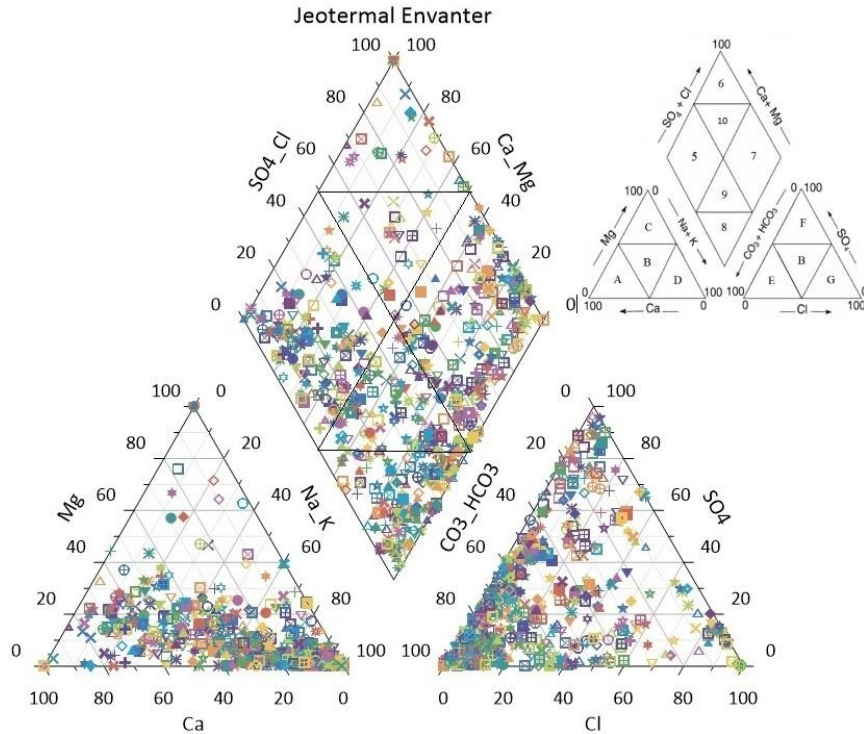
### • Kimyasal Olarak Sınıflandırılması

Yüksek sıcaklıklara sahip volkanik ve tektonik kuşaklardaki sular, baskın anyonlarına göre sınıflandırılırlar (Eroğlu & Aksoy, 2003). Literatürde, sınıflandırmalar için birçok grafiksel yöntem kullanılmaktadır. Bunlardan bazıları Stiff Diyagramı, Işınsal Diyagram, Schoeller Diyagramı, Üçgen Diyagram ve Piper Diyagramı’dır.

Bu çalışmada en son yayımlanan 2005 MTA jeotermal envanter verileri kullanılarak, su kimyası grafiksel yöntemlerinden biri olan Piper Diyagramı ile sınıflandırılma yapılmıştır. Piper Diyagramlarında 6 temel sınıf bulunmaktadır (Piper, 1944).

5. Bölge - Magnezyum Bikarbonat Tip Su
6. Bölge - Kalsiyum Klor Tip Su
7. Bölge - Sodyum Klor Tip Su
8. Bölge - Sodyum – Bikarbonat Tip Su
9. Bölge - Kalsiyum – Magnezyum – Klor Tip Su
10. Bölge - Kalsiyum – Sodyum – Bikarbonat Tip Su

Bu çalışma kapsamında Türkiye’de bulunan 686 adet jeotermal kaynak suları kimyasal özelliklerine göre Piper Diyagramları yardımı ile sınıflandırılmıştır. Şekil 3’de görüldüğü gibi ülkemizde 6 farklı bölgede de jeotermal sular mevcuttur.



Şekil 3. Piper Su Sınıflama Yöntemi İle Türkiye’de Bulunan Jeotermal Kuyuların Sınıflandırılması (MTA 2005)

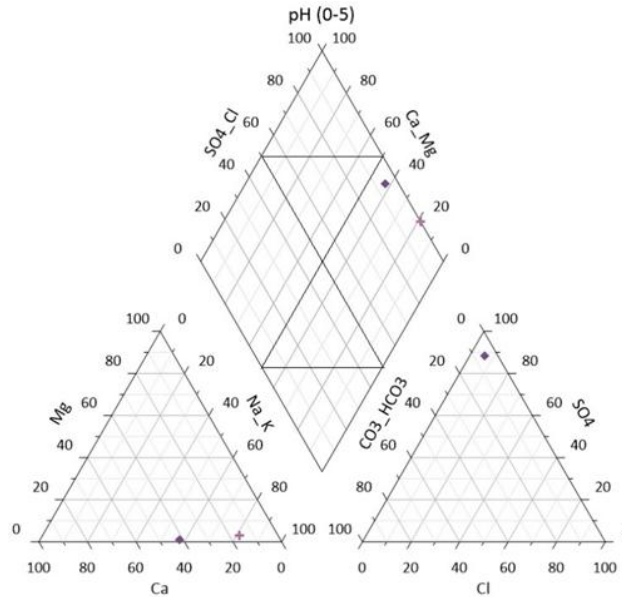
Piper diyagramında sınıflandırma yapılırken suyun kimyasal yapısı ilk olarak anyon ve katyon olarak ayrılır. Kalsiyum-Magnezyum, Kalsiyum-Sodyum, Sodyum-Kalsiyum, Sodyum-Potasyum

grupları katyonlar olarak kabul edilir. Klor-Sülfat, Klor-Sülfat-Bikarbonat, Bikarbonat-Klor-Sülfat, Bikarbonat grubu da anyonlar olarak sınıflandırılır. Şekil 3’te görüldüğü üzere Türkiye’de jeotermal su kaynaklarının anyonlara göre yapılan sınıflandırılmasında Na-K içeriğinin yüksek olduğu, katyonlara göre yapılan sınıflandırılmada ise özellikle  $\text{CO}_3\text{-HCO}_3$ ’in yoğun olduğu ve sırasıyla  $\text{SO}_4^-$  ve  $\text{Cl}^-$  içeren kaynaklarında varlığı görülmektedir.

Diğer taraftan anyon ve katyon üçgen grafiklerinin birleştirilmesi ise elde edilen elmas grafiğe bakıldığı zaman 7 (Sodyum Klor Tip Su) ve 8 (Sodyum – Bikarbonat Tip Su) nolu bölgelerin kaynak sularının sayıları fazla olmasına rağmen sırasıyla 5 (Magnezyum Bikarbonat Tip Su), 9 (Kalsiyum – Magnezyum – Klor Tip Su), 10 (Kalsiyum – Sodyum – Bikarbonat Tip Su) ve 6 (Kalsiyum Klor Tip Su) nolu bölgelerde de mevcut olduğu görülmektedir.

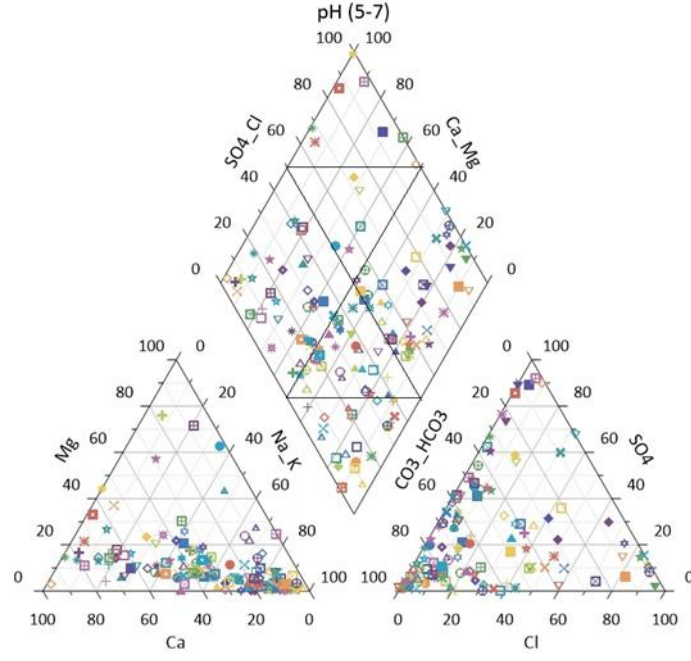
#### • pH Açısından Sınıflandırılması;

Deniz suları, serbest  $\text{CO}_2$  veya  $\text{H}^+$  iyonu içeren sular, endüstriyel atıkların, kanalizasyonların karıştığı sular, sülfat ve klor içeren yer altı suları zararlı reaksiyonlara sebep olabilirler. Jeotermal sular, 4.5 ve altında bir pH’a sahipse asit saldırısı çok şiddetli, pH değeri 5.5 ve altındaysa şiddetli gerçekleşir. Ancak sıvının beton içinde taşınım hızı da önemli bir faktördür (Baradan & Aydın, 2013). Ülkemizde bulunan jeotermal kuyuların pH’larına göre sınıflandırılması Şekil 4 - Şekil 7’de gösterilmektedir. Bu kuyuların içinde 2 adet pH’ı 5’in altında olan kuyu bulunmaktadır (Şekil 4). Bu kuyular, Ordu Yalnızdam Maden Suyu ve Aksaray Güzelyurt Sivrihisar Kükürtlü Kaynağı olarak geçmektedir. Bu sular “Sodyum Klor Tip Su” olarak sınıflandırılmaktadır.

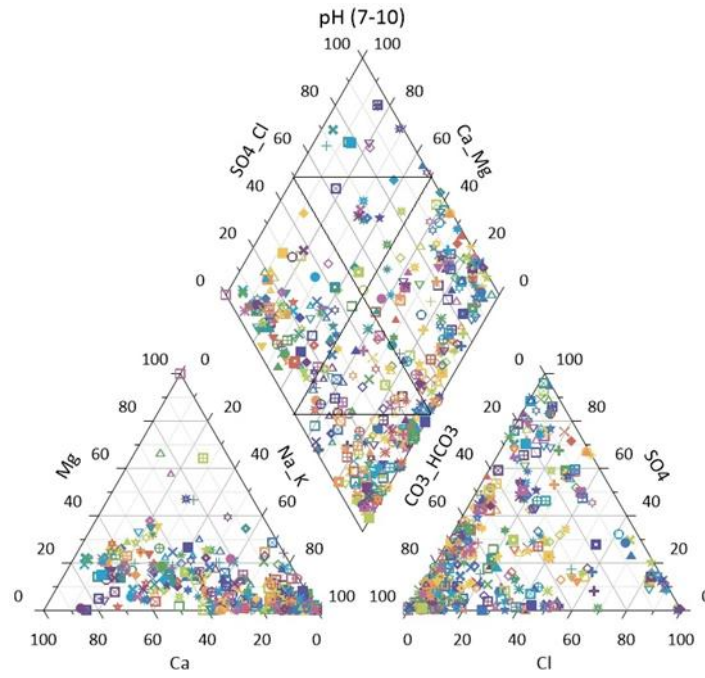


Şekil 4. Piper Diyagramına Göre Türkiye’de pH’ı 5’in Altında Olan Kuyular

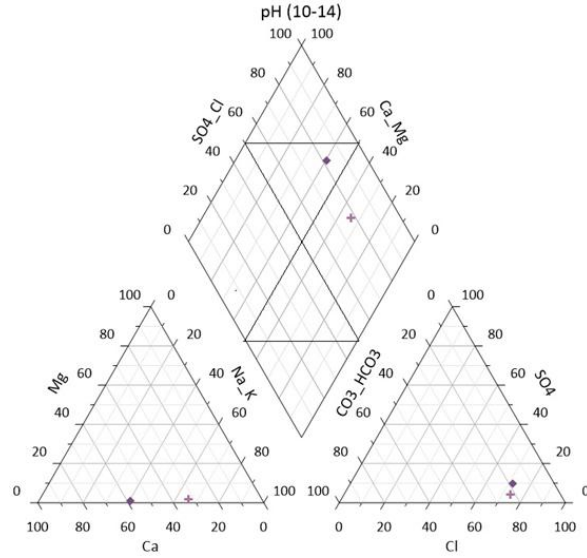
Şekil 6’da Türkiye’de pH’ı 7-10 arasında olan kuyuların en büyük oranı oluşturduğu görülmektedir. Bu aralıktaki pH’ların 7,3-7,7 arasında olduğu tespit edilmiştir Şekil 7’deki Piper diyagramından görüldüğü gibi, pH’ı 10’un üstünde olan 2 tane kuyu bulunmaktadır. Bunlar Gaziantep Kartal Köprü Kaynağı ve Hatay Tahta Köprü jeotermal su kuyularıdır ve bu kuyuların su içeriklerinde  $\text{Cl}^-$  açısından diğer kuyulara göre daha zengin olduğu fakat  $\text{Mg}^{+2}$  miktarının daha düşük olduğu ve “Sodyum Klor Tip Su” ve “Kalsiyum – Sodyum – Bikarbonat Tip Su” oldukları görülmektedir.



Şekil 5. Piper Diyagramına Göre Türkiye'de pH'ı 5-7 Arasında Olan Kuyular



Şekil 6. Piper Diyagramına Göre Türkiye'de pH'ı 7-10 Arasında Olan Kuyular



Şekil 7. Piper Diyagramına Göre Türkiye'de pH'ı 10-14 Arasında Olan Kuyular

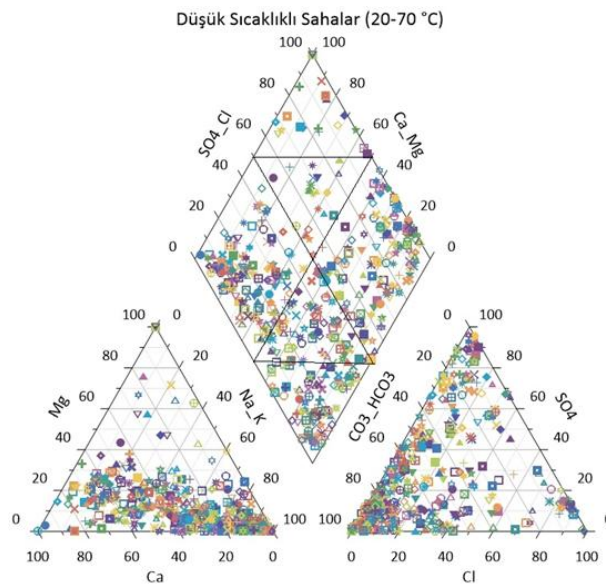
- **Sıcaklık Açısından Sınıflandırılması;**

Sıcaklık seviyesi açısından bakıldığında, sıcaklığın kimyasal reaksiyon hızını artırdığı bilinen bir gerçektir. Her 10°C'lik artışın, reaksiyon hızını 2 kat artırdığı basit bir kural olarak kabul edilebilir. Yalnızca bu faktör, tropik iklimleri korozyon ve diğer etkileri açısından daha olumsuz kılmaktadır. Nem ile beraber, nem içinde zararlı madde varlığı ve sıcaklık herhangi bir ortamın durumunu şekillendirmek için dikkate alınması gereken en önemli parametrelerdir (Baradan ve ark., 2010b).

Jeotermal kaynaklar genellikle bulunduğu ülkelere göre veya kökenlerine göre farklı olarak sınıflandırılırlar. Sıcaklığa göre sınıflandırma aşağıdaki gibidir (Külekçi, 2009).

- Düşük Entalpili Jeotermal Kaynaklar (20-70°C)
- Orta Entalpili Jeotermal Kaynaklar (70-150°C)
- Yüksek Entalpili Jeotermal Kaynaklar (150°C'den yüksek)

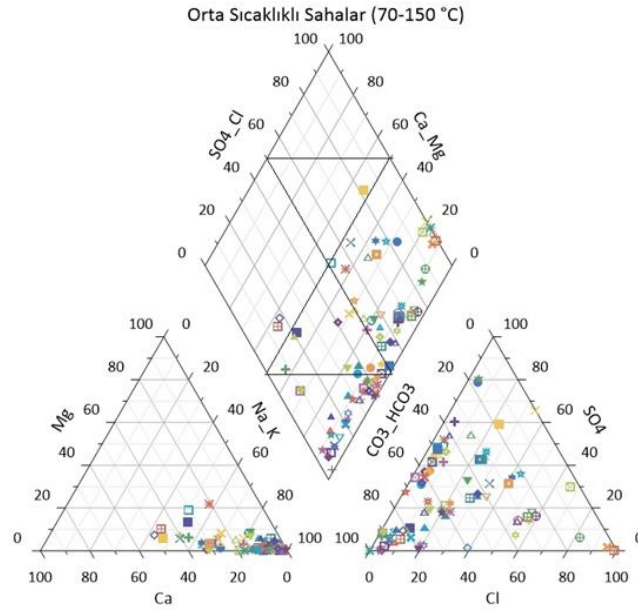
Aşağıdaki grafiklerde ülkemizdeki sıcaklık dağılımları bulunmaktadır (Şekil 8-Şekil 10).



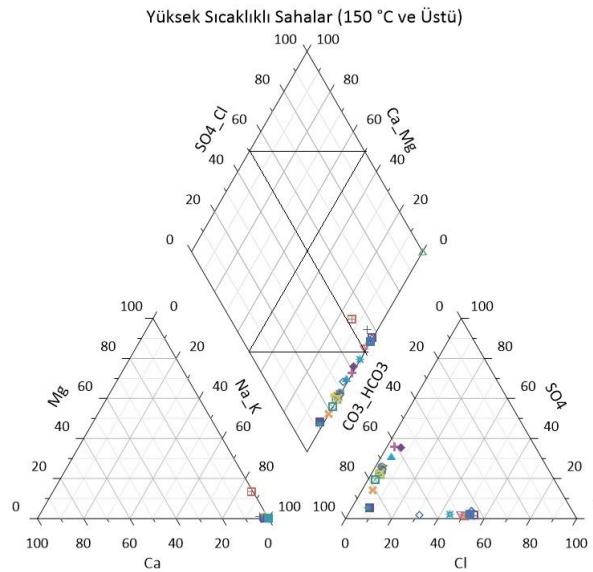
Şekil 8. Piper Diyagramına Göre Türkiye'de Sıcaklığı 20-70°C Arasında Olan Kuyular

Şekil 8'de görüldüğü üzere ülke genelinde olan kuyuların büyük çoğunluğu 20-70°C sıcaklık aralığında bulunmaktadır. 70-150°C aralığındaki Orta Entalpili Jeotermal kaynakların ise Sodyum Klor Tip Su, Sodyum – Bikarbonat Tip Su, Kalsiyum – Magnezyum – Klor Tip Su sınıflarında olduğu görülmektedir (Şekil 9). 150°C'den yüksek olan (Yüksek Entalpili Jeotermal Kaynaklar) 2 su tipine rastlanmaktadır. Bu tipler, Şekil 10' da Sodyum Klor Tip Su ve Sodyum – Bikarbonat Tip Su olarak ortaya çıkmaktadır. Çoğunluk ise Sodyum- Bikarbonat Tip su alanında kalmaktadır. Bu su tiplerinin hepsi Ege Bölgesi'nde bulunmaktadır. Kuyu sıcaklık ortalaması en yüksek olan bölge 80,39 °C ortalama ile Ege Bölgesi, en az olan bölge ise 37,04 °C ile Akdeniz Bölgesi'dir.

Diğer taraftan 50-100°C arasında olan kuyularda Na<sup>+</sup> ve K<sup>+</sup> miktarı artarken, Ca<sup>+</sup> miktarının azaldığı görülmektedir. 100°C'nin üzerinde ise Ca<sup>+</sup> miktarı eser miktarda bulunmaktadır. Sıcaklık artıkça Cl<sup>-</sup> oranının azaldığı tespit edilmiştir.



Şekil 9. Piper Diyagramına Göre Türkiye'de Sıcaklığı 70-150°C Arasında Olan Kuyular



Şekil 10. Piper Diyagramına Göre Türkiye'de Sıcaklığı 150°C ve Üstü Olan Kuyular

- **Jeotermal Suyu Maruz Kalan Beton Davranışı;**



Jeotermal suların içinde klor, sülfat, bikarbonat, magnezyum vb. mineraller bulunmaktadır. Bu ürünlerin de en çok kullanılan yapı malzemesi olan betona olumsuz etkileri bulunmaktadır. Beton temel malzemesi olarak kullanılan Portland çimentosunun alkali olması sebebiyle, güçlü asit etkilerine karşı dayanıksız olduğu bilinmektedir (Baradan ve ark., 2010).

Jeotermal etkiyi incelemek için sahada ve laboratuvarda farklı araştırmalar yapılmaktadır. Fakat, jeotermal ortamlarda yapılan deneylerde farklı zorluklar yaşandığı bilinmektedir. Kuyularda yapılan ölçümlerde, su sıcaklıklarının yüksek olması ve kuyulardaki suların basınçlı olması sebebiyle yapılacak ölçümler zorlaşmaktadır (Nogara & Zarrouk, 2018). Jeotermal saha tesislerine kolayca ulaşım sağlanamaması gibi sorunlar da ortaya çıkabilmektedir.

Jeotermal suların betona etkisi üzerine yapılan çalışmalardan, Al-Obaidi ve ark. (2022), jeotermal su etkisini incelemek için, alümino nanofiber ve selüloz nano kristal katarak ultra yüksek dayanımlı beton elde etmişlerdir. 7x22 m ebatlarında havuz yaparak bu betonu 2 yıl jeotermal su etkisine maruz bırakmışlardır. Büzülme ve çatlaklar oluşmasına rağmen şahit numunelere kıyasla katkılı karışımlarda beton boşluk yapısında azalma sağlanarak iyileşme sağlandığı ifade edilmiştir. Chen ve ark. (2009), Tayvan'da 40°C ile 90°C arasında değişen üç farklı termal tesiste, termal buhar kütleme etkisini belirlemek için çimento esaslı yapı malzemelerini teste tabi tutmuşlardır. Beton karışımında referans numunelere ek olarak %30 a kadar puzolanik katkı maddesi kullanılan karışımlar üretmişlerdir. Sıcak jeotermal su ile kür edilen numunelerin erken yaş basınç dayanımında artış gözlemlendiği, ilerleyen yaşlarda ise normal kür edilen numunelere göre daha düşük dayanım görüldüğü belirtilmiştir. Bu durum, öncelikle erken yaşlarda yüksek sıcaklığın hızlandırılmış hidrasyon etkisi nedeniyle daha yüksek dayanım elde edildiği, ancak hidrasyonun hızlı reaksiyonu, düzensiz bir kristal faz oluşumundan kaynaklı ilerleyen yaşlarda dayanım artışının azalmasına neden olduğu şeklinde açıklanmıştır. İkinci olarak ise erken yaşlarda betonda yüksek miktarda bulunan Cl<sup>-</sup>'nin çimento hamurundaki silikat bileşiklerinin çözünmesini hızlandırması ve daha fazla C-S-H jeli oluşturan hidrasyon reaksiyonunu kolaylaştırmasından kaynaklı dayanım artışı olduğu, ancak daha sonraki yaşlarda betondaki Cl<sup>-</sup>, C-S-H jeli ile reaksiyona girerek yüksek çözünme seviyesine sahip kalsiyum klorür oluşturabileceği, bunun da daha fazla açık gözenek oluşturarak betonun dayanımını azaltabileceği şeklinde ifade edilmiştir.

Shatat (2014), tarafından yapılan çalışmada metakaolin ve silis dumanı eklenerek elde edilen numuneler 180 °C sıcaklıkta 2, 4, 6, 12 ve 24 saatlik sürelerde çıkarılmak üzere hidrotermal küremenin etkisine bakılmıştır. Betonun genel olarak tüm özelliklerine paralel kabul edilen basınç dayanımı yanı sıra kimyasal yapı ve geçirgenlik üzerine testlere tabi tutulmuştur. İçeriğinde metakaolin bulunan numunelerin 6 saatten sonraki dayanımlarında artış tespit edilmiştir. Bu durumu, boşluk yapısının minimum olduğu numunelerde basınç dayanımının daha yüksek olduğu şeklinde açıklamıştır.

Yıldız (2020), tarafından yürütülen çalışmada katkısız ve üç farklı mineral katkı (uçucu kül, yüksek fırın cürufu ve silis dumanı), üç farklı oranda (%5, %10, %15) çimento ile ikame edilerek üretilen harç numuneleri, Erzurum Nene Hatun, Pasinler ve Ilıca Termal Tesislerinde jeotermal suya maruz kalacak şekilde yerleştirilmiştir. 3, 6 ve 9 aylık zaman dilimlerinde jeotermal tesislerden çıkarılan numunelere fiziksel ve mekanik deneyler yapılarak 28 günlük basınç dayanımı, laboratuvar ortamı numunelerin dayanımı ve farklı zaman dilimlerindeki numunelerin dayanımları karşılaştırılmıştır. Yapılan deney sonuçları mineral katkıların 3 aylık periyotta dayanımı artırdığı ancak uzun sürede dayanıma etkisinin olumsuz olduğunu göstermiştir. Ancak bu çalışmada daha sağlıklı veri elde etmek için deney sürelerinin daha uzun olması gerektiği tavsiye edilmiştir. Güçlü (2022), Erzurum Nenehatun ve Pasinler Jeotermal Tesisleri'ndeki jeotermal sulara maruz bıraktıkları numunelerde çimento ağırlığının belli (%10-%20-%30) oranlarında yüksek fırın cürufu ve ferrokrom cürufu kullanmışlardır.

9 ay süre ile jeotermal suya maruz bıraktıktan sonra jeotermal sularda bulunan yüksek kükürt sebebi ile numunelerin kristal yapılarının bozulduğunu ve dayanımlarının düştüğünü belirtmiştir. Kars (2023), Erzurum Nenehatun ve Pasinler Jeotermal tesislerinde yapmış olduğu çalışmada, farklı tür ve oranlarda mineral katkıları (uçucu kül ve silis dumanı, %10, %20, %30) kullanmış ve 270 gün jeotermal sularda bekletmiştir. Mineral katkılı karışımlar kullanılarak elde edilen numunelerin basınç dayanımının referans numunelere kıyasla daha yüksek dayanım elde ettiğini beyan etmiştir. Elde edilen en yüksek basınç dayanımının, %20 uçucu kül, %10 ise silis dumanı katkılı numunelerde olduğunu belirtmiştir.

Çomaklı (2021), jeotermal suların farklı tip çimentolar ile üretilmiş harçların durabilitesine etkisini incelemiştir. Çalışmada 10 farklı çimento tipi kullanılmıştır. Numuneler, 28 günlük kürlenme işlemi sonrası 3 ayrı jeotermal tesiste ve laboratuvarında bekletilmiştir. 3-6-9 aylık periyotlarla ölçümler yapılmıştır. Bazı çimento gruplarının basınç dayanımında düşüş görülürken bazı gruplarda şahit numunelere kıyasla basınç dayanımlarına eş değerde sonuç elde edildiği veya artış olduğu gözlenmiştir.

Dolayısıyla, jeotermal sulara maruz kalan beton üzerine yapılan çalışmalar göstermiştir ki; beton basınç dayanımı ya da paralel diğer özellikleri, betonun jeotermal suya maruz kalma süresi, suyun sıcaklığı, pH'ı ve kimyasal içeriği, kullanılan çimento tipi, mineral katkı ilavesi gibi parametreler ile farklılık göstermektedir. Jeotermal sulara maruz kalan çimento esaslı malzemelerde sıcaklığın etkisiyle erken yaşlarda dayanım artışı görülse bile ileri yaşlarda düşüşlerin meydana geldiği, bu dayanım azalmalarının ise kimyasal etkileşimlerden ve düşük pH'lardan kaynaklandığı ifade edilebilir.

## SONUÇ

Türkiye'deki jeotermal suların sınıflandırılması ve beton özelliklerine etkisinin değerlendirilmesi hakkında elde edilen sonuçlar aşağıda sunulmuştur:

- Betonun jeotermal suya maruz kalma süresi, suyun sıcaklığı, pH'ı ve kimyasal içeriği, kullanılan çimento tipi, mineral katkı ilavesi gibi parametreler betonun teknik özelliklerinde farklılık göstermesine sebep olmaktadır.
- MTA verilerine ülkemizde 686 adet jeotermal su kaynağı mevcuttur.
- Piper Diyagramına göre Türkiye'deki suların genellikle sodyum bikarbonat ve klor içerikli sular olduğu anlaşılmaktadır.
- 50-100°C arasında olan kuyularda  $Na^+$  ve  $K^+$  miktarı artarken,  $Ca^+$  miktarının azaldığı görülmektedir. 100°C nin üzerinde ise  $Ca^+$  miktarı eser miktarda bulunmaktadır. Sıcaklık artıça  $Cl^-$  oranının azaldığı tespit edilmiştir.
- pH'ı 10'un üstünde olan 2 tane kuyu bulunmaktadır. Bunlar Gaziantep Kartal Köprü Kaynağı ve Hatay Tahta Köprü jeotermal su kuyularıdır. Bu kuyuların su içeriklerinde  $Cl^-$  açısından diğer kuyulara göre daha zengin olduğu fakat  $Mg^{+2}$  ve  $SO_4^-$  miktarlarının daha düşük olduğu görülmektedir.
- pH açısından ülkemizdeki jeotermal su kaynaklarının genelinin 7,3-7,7 aralığında olduğu tespit edilmiştir.
- Jeotermal suların sıcaklık açısından, 80,39 °C ile ortalaması en yüksek olan bölge Ege Bölgesi, 37,04 °C ile en düşük bölge Akdeniz Bölgesi'dir.

Jeotermal suya maruz kalan betonların özelliklerindeki değişim için yapılan çalışmalarda tek tek, sıcaklık, pH, kimyasal etki gibi kavramlar üzerine araştırmalar yapılmış fakat çoklu etki (pH+sıcaklık+kimyasal içerik) oluşturacak şekilde bir etki incelenmemiştir. Jeotermal sulara maruz kalan yapılarıdaki çimento esaslı malzemelerindeki özelliklerindeki değişimin farklı parametreler göz önünde bulundurularak araştırılması gerekmektedir.

## Çıkar Çatışması

Makale yazarları aralarında herhangi bir çıkar çatışması olmadığını beyan ederler.

## Yazar Katkısı

Yazarlar makaleye eşit oranda katkı sağlamış olduklarını beyan eder.

## KAYNAKLAR

- Al-Obaidi, S., Davolio, M., Monte, F. L., Costanzi, F., Luchini, M., Bamonte, P., & Ferrara, L. (2022). Structural validation of geothermal water basins constructed with durability enhanced ultra high performance fiber reinforced concrete (Ultra High Durability Concrete). *Case Studies in Construction Materials*, 17, e01202.
- Baradan, B. (2012). Yazıcı H, Aydın S, BETON. *Dokuz Eylül Üniversitesi Müh. Fak. Yayınları*.
- Baradan, Bülent, & Aydın, S. (2013). Betonun Durabilitesi (Dayanıklılık, Kalıcılık). *Beton 2013 Hazır Beton Kongresi*, 265-288.
- Chen, H.-J., Yang, T.-Y., & Tang, C.-W. (2009). Strength and durability of concrete in hot spring environments. *Comput. Concrete*, 6(4), 269-280.
- Çetin, A. (2014). Ülkemizin jeotermal enerji kapasitesi ve yapılabilecekler. *Geleceği Önemseyenler Derneği. Ankara*.
- Çomaklı, S. (2021). *Jeotermal suların farklı tip çimentolar ile üretilmiş harçların durabilitesine etkisinin incelenmesi* (Yüksek Lisans). Atatürk Üniversitesi.
- Dickson, M. H., & Fanelli, M. (2018). What is geothermal energy? İçinde *Renewable Energy* (s. Vol1\_302-Vol1\_328). Routledge. Geliş tarihi gönderen <https://www.taylorfrancis.com/chapters/edit/10.4324/9781315793245-25/geothermal-energy-mary-dickson-mario-fanelli>
- Eroğlu, A., & Aksoy, N. (2003). Jeotermal Suların Kimyasal Analizi. *VI. Ulusal Tesisat Mühendisliği Kongresi ve Sergisi, Bildiriler Kitabı*, 143-183.
- Fridleifsson, I. B. (2001). Geothermal energy for the benefit of the people. *Renewable and sustainable energy reviews*, 5(3), 299-312.
- Güçlü, B. (2022). *Farklı cürufların kullanıldığı betonlarda jeotermal suların etkileri*. Atatürk Üniversitesi, Yök Tez.
- Hutter, G. (2020). Geothermal power generation in the world 2015–2020 update report. *Proceedings of the world geothermal congress, Reykjavik, Iceland*, 26.
- Kars, T. (2023). *Jeotermal sulara maruz kalan uçucu kül ve silis dumanı içeren betonların özelliklerinin incelenmesi*. Atatürk Üniversitesi, Yök Tez.
- Kaygusuz, K., & Kaygusuz, A. (2004). Geothermal energy in Turkey: The sustainable future. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 8(6), 545-563.
- Külekçi, Ö. C. (2009). Yenilenebilir enerji kaynakları arasında jeotermal enerjinin yeri ve Türkiye açısından önemi. *Ankara Üniversitesi Çevre Bilimleri Dergisi*, 1(2), 83-91.
- MTA Genel Müdürlüğü. (2005). *Türkiye Jeotermal Kaynaklar Envanteri*.
- Nogara, J., & Zarrouk, S. J. (2018). Corrosion in geothermal environment Part 2: Metals and alloys. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 82, 1347-1363.
- Piper, A. M. (1944). A graphic procedure in the geochemical interpretation of water-analyses. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, 25(6), 914-928. <https://doi.org/10.1029/TR025i006p00914>
- Shatat, M. R. (2014). Effect of hydrothermal curing on the hydration characteristics of artificial pozzolanic cement pastes placed in closed system. *Applied Clay Science*, 96, 110-115. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2014.04.032>
- Şener, M. F., Öztürk, M. Z., & Baba, A. (2023). A review of the geothermal system evolution and distribution in the Central Anatolian Crystalline Complex (Türkiye). *Turkish Journal of Earth Sciences*, 32(6), 703-720.
- Yıldız, A. T. (2020). *Jeotermal Suların Mineral Katkılı Harçların Kalıcılık Özelliklerine Etkisi* (Yüksek Lisans). Atatürk Üniversitesi.