

ISSN: 1012 - 0726 (Baskı)
ISSN: 1308 - 2477 (Online)



SAYI: 113

DEVLET SU İŞLERİ
GENEL MÜDÜRLÜĞÜ

DSİ TEKNİK BÜLTENİ

DSİ TEKNİK BÜLTENİ

Sahibi

DEVLET SU İŞLERİ
GENEL MÜDÜRLÜĞÜ
Adına
Akif ÖZKALDI

Sorumlu Müdür

M. Fatih KOCABEYLER

Yayın ve Hakem

Kurulu

Yakup DARAMA
Tuncer DİNÇERGÖK
Ali KILIÇ
Nurettin PELEN
Ali SARANER
Kemal ŞAHİN

Haberleşme Adresi

DSİ Teknik Araştırma ve
Kalite Kontrol (TAKK)
Dairesi Başkanlığı
06100 Yücecepe -
Ankara

Tel (312) 399 2793

Faks (312) 399 2795

bulten@dsi.gov.tr

Basıldığı Yer

Destek Hizmetleri
Dairesi Başkanlığı
Basım ve Foto-Film
Şube Müdürlüğü
Etlik - Ankara

SAYI : 113

YIL : EKİM 2011

Yayın Türü

Yaygın süreli yayın
Üç ayda bir yayınlanır

ISSN

1012 - 0726 (Baskı)

1308 - 2477 (Online)

İÇİNDEKİLER

YERALTI SULARINDAKİ BAZI KİMYASAL PARAMETRELERİN DOĞAL ARKA PLAN SEVİYELERİNİN VE EŞİK DEĞERLERİNİN BELİRLENMESİ Müfit Şefik DOĞDU	1
GEBZE ATIKSU ARITMA TESİSİ ALANI İÇİN ZEMİN İYİLEŞTİRME YÖNTEMLERİNİN KARŞILAŞTIRILMASI Fatma Ebru YILDIZ, Murat ŞAHİN	15

DSİ TEKNİK BÜLTENİ'NİN AMACI

DSİ Teknik Bülteni'nde, su ile ilgili konularda, temel ve uygulamalı mühendislik alanlarında gönderilen bildirimler yayınlanır. Bildirimler, ilk önce konunun uzmanı tarafından incelenir ve değerlendirilir. Daha sonra, Hakem Kurulu uzman görüşünü de esas alarak bildirin yayınlanıp yayınlanmamasına karar verir. Bildirimlerin tamamı veya büyük bir kısmı diğer yayın organlarında yayınlanmamış olması gereklidir.

DSİ TEKNİK BÜLTENİ BİLDİRİ YAZIM KURALLARI

1. Gönderilen yazılar kolay anlaşılır dilde ve Türkçe kurallarına uygun şekilde yazılmış olmalıdır.
2. Yazıların teknik sorumluluğu yazarına aittir (yazılardaki verilerin kullanılması sonucu oluşabilecek maddi ve manevi problemlerde muhatap yazardır).
3. Yayın Kurulu, bildirimler üzerinde gerekli gördüğü düzeltme ve kısaltmaları yapar.
4. Bildirimler bilgisayarda Microsoft Word olarak bir satır aralıkla yazılmalı ve Arial 10 fontu kullanılmalıdır. Bildirimler A4 normundaki kâğıdın her kenarından 25 mm boşluk bırakılarak yazılmalıdır.
5. Sadece ilk sayfada, yazı alanı başlangıcından sola dayalı olarak, italic 10 fontunda Arial kullanılarak ilk satıra "*DSİ Teknik Bülteni*" yazılmalıdır.
6. Konu başlığı: Yazı alanı ortalanarak, "*DSİ Teknik Bülteni*" yazısından sonra dört satır boş bırakıldıktan sonra Arial 12 fontu kullanılarak büyük harflerle koyu yazılmalıdır.
7. Yazar ile ilgili bilgiler: Adı (küçük harf), soyadı (büyük harf), yazarın unvanı ile bağlı olduğu kuruluş (alt satıra) ve elektronik posta adresi (alt satıra) başlıktan iki boş satır sonra ilk yazardan başlamak üzere Arial 10 fontu ile yazı alanı ortalanarak yazılmalıdır. Diğer yazarlar da ilk yazar gibi bilgileri bir boşluk bırakıldıktan sonra yazılmalıdır.
8. Türkçe özet, elektronik posta adresinden dört boş satır sonra, özetten bir boş satır sonra ise anahtar kelimeler verilmelidir. Aynı şekilde, Türkçe anahtar kelimelerden iki boş satır sonra İngilizce özet, bir boş satır sonra ise İngilizce anahtar kelimeler verilmelidir.
9. Bölüm başlıkları yazı alanı sol kenarına dayandırılarak Arial 10 fontu kullanılarak koyu ve büyük harfle yazılmalı. Bölüm başlığının üzerinde bir boş satır bulunmalıdır.
10. Ara başlıklar satır başında başlamalı, üstlerinde bir boş satır bulunmalıdır. Birinci derecedeki ara başlıktaki bütün kelimelerin sadece ilk harfi büyük olmalı ve koyu harflerle Arial 10 fontunda yazılmalıdır. İkinci ve daha alt başlıklar normal harflerle Arial 10 fontu ile koyu yazılmalıdır.
11. Yazılar kâğıda iki sütün olarak yazılmalı ve sütün aralarındaki boşluk 10 mm olmalıdır.
12. Paragraf sola dayalı olarak başlamalı ve paragraflar arasında bir boş satır bırakılmalıdır.
13. Eşitlikler bilgisayarda yazılmalı ve numaralandırılmalıdır. Eşitlik numaraları sayfanın sağına oturmali ve parantez içinde yazılmalıdır. Her eşitlik alttaki ve üstteki yazılardan bir boş satır ile ayrılmalıdır. Eşitliklerde kullanılan bütün semboller eşitlikten hemen sonraki metinde tanımlanmalıdır.
14. Sayısal örnekler verildiği durumlarda SI veya Metrik sistem kullanılmalıdır. Rakamların ondalık kısımları virgöl ile ayrılmalıdır.
15. Yararlanılan kaynaklar metinde kaynağın kullanıldığı yerde köşeli parantez içerisinde numaralı veya [Yazarın soyadı, basım yılı] olarak belirtilmelidir. Örneğin: "..... basamaklı dolusavaklar için geometri ve eşitlikler [1]" veya "..... basamaklı dolusavaklar için geometri ve eşitlikler [Aktan, 1999]" gibi.
16. Kaynaklar yazar soyadlarına göre sıralanmalı, listelenirken yazar (veya yazarların) soyadı, adının baş harfi, yayın yılı, kaynağın ismi, yayınlandığı yer ve yararlanılan sayfa numaraları belirtilerek, köşeli parantez içerisinde numaralandırılmalı ve yazarken soldan itibaren 0,75 cm asılı paragraf şeklinde yazılmalıdır. Makale başlıkları çift tırnak içine alınmalı, kitap isimlerinin altı çizilmelidir. Bütün kaynaklara metin içinde atıf yapılmalıdır.
17. Çizelgeler, şekiller, grafikler ve resimler yazı içerisine en uygun yere gelecek şekilde yerleştirilmelidir. Fotoğraflar net çekilmiş olmalıdır. Şekil ve grafikler üzerine el yazısı ile ekleme yapılmamalıdır.
18. Bildirinin tamamı 20 sayfayı geçmemeli, şekil, çizelge, grafik ve fotoğraflar yazının 1/3'ünden az olmalıdır.
19. Sayfa numarası, sayfaların karışmaması için sayfa arkalarına kurşun kalem ile hafifçe verilmelidir.
20. Yazım kurallarına uygun olarak basılmış bildirin tam metni hem A4 kâğıda baskı şeklinde (2 adet) hem de dijital ortamda (CD veya DVD) yazışma adresine gönderilmelidir.
21. Yayımlanan bütün yazılar için "Kamu Kurum ve kuruluşlarınca ödenecek telif ve işleme ücretleri hakkındaki yönetmelik" hükümleri uygulanır.
22. Bildiriyi gönderen yazarlar yukarıda belirtilenleri kabul etmiş sayılırlar.
23. Yazışma adresi aşağıda verilmiştir:

DSİ TEKNİK BÜLTENİ

DSİ Teknik Araştırma ve Kalite Kontrol (TAKK) Dairesi Başkanlığı

06100 Yüce-tepe ANKARA

Tel (312) 399 2793

Faks (312) 399 2795

E-posta bulten@dsi.gov.tr

Web http://www.dsi.gov.tr/kutuphane/dsi_teknik_bulten.htm

YERALTISULARINDAKİ BAZI KİMYASAL PARAMETRELERİN DOĞAL ARKA PLAN SEVİYELERİNİN VE EŞİK DEĞERLERİNİN BELİRLENMESİ

Müfit Şefik DOĞDU

Dr., Hidrojeoloji Yük. Müh., DSİ Genel Müdürlüğü, Jeoteknik Hizmetler ve Yeraltıları Dairesi,
Karst Araştırma Şubesi, Devlet Mahallesi İnönü Bulvarı No:16 06100 Çankaya/ANKARA
mufitd@dsi.gov.tr

(Makalenin geliş tarihi: 20.10.2011, Makalenin kabul tarihi: 14.02.2012)

ÖZET

Yeraltısuyundaki kimyasal parametrelere ait doğal arka plan seviyelerin ve eşik değerlerin belirlenmesiyle yeraltısuyu kütlesinin kalite değerlendirilmesi yapılabilmektedir. Yeraltısuyu kütlesinin kalite açısından iyi durumda sayılabilmesi için, bünyesindeki kimyasal parametre derişimlerinin belirlenmiş olan değerleri (standart ve/veya eşik değer) aşmaması gerekmektedir. Sunulan bu çalışmada: Konya Kapalı Havzası'nda yer alan yeraltısularındaki kimyasal parametrelere ait doğal arka plan seviyeleri ve eşik değerlerin belirlenmesi amacıyla, Avrupa Birliği üye ülkelerince BRIDGE (*Background cRiteria for the IDentification of GRoundwater ThrEsholds*) başlıklı proje ile geliştirilen yöntem kullanılmıştır. Havzadaki yeraltısularına ait her bir kimyasal parametre derişimi için normal olasılık dağılımı kullanılarak 97,7'lik yüzdelik dilim ($P_{97,7}$) hesaplanmıştır. İlgili kimyasal parametrenin $P_{97,7}$ değerine karşılık gelen derişim doğal arka plan seviyesi olarak kabul edilmiştir. Belirlenen doğal arka plan seviye değeri ve BRIDGE projesinde verilmiş olan varsayımlar kullanılarak o parametreye ait eşik değer hesaplanmıştır. Yeraltısularına ait kimyasal parametre derişimlerinin hesaplanan eşik değerlerle karşılaştırılması sonucu: havzadaki tüm yeraltısularının ~%7'sindeki bazı kimyasal parametre derişimlerinin eşik değeri aştığı ve dolayısıyla kalite açısından zayıf durumda olduğu belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Doğal arka plan seviyesi, eşik değeri, Konya Kapalı Havzası, yeraltısuyu kalitesi

THE NATURAL BACKGROUND LEVELS AND THRESHOLD VALUES DETERMINATION OF SOME CHEMICAL PARAMETERS IN GROUNDWATERS

ABSTRACT

Groundwater quality evaluation can be realized by determination of the natural background levels and thresholds values of the chemical parameters in the groundwater body. In order to accept that groundwater body quality is in good condition, chemical parameters' concentration in groundwater body should not exceed the determined limit (standards and/or thresholds values). In this presented study: method, which was developed by member states of European Union's in the scope of BRIDGE (*Background cRiteria for the IDentification of GRoundwater ThrEsholds*) titled project, has been used to determine the natural background levels and thresholds values of chemical parameters in Konya Closed Basin's groundwaters. The 97,7 percentile ($P_{97,7}$) of each chemical parameters of the groundwater has been calculated by using of the normal probability distribution. Concentration value of the relevant chemical, determined by $P_{97,7}$, has been accepted as natural background level and then thresholds value has been calculated according to the determined natural background level and some assumptions given in BRIDGE project. Comparison of the chemical parameters' concentrations with calculated thresholds values has showed that some chemical parameters' concentrations exceed the thresholds values in ~7% of the groundwaters. This situation states that the ~7% of the groundwaters is in poor quality condition in the basin.

Keywords: Natural background level, threshold value, Konya Closed Basin, groundwater quality

1 GİRİŞ

Bazı element veya türlerin yeraltısularındaki doğal arka plan (DAP, natural background) seviyeleri jeokimyacılar tarafından birçok uygulamada kullanılmaktadır [Panno vd., 2006]. DAP seviyesi, [USGS, 2004]'in temel su terimler sözlüğüne göre "belirli bir çevrede insan kaynaklı (antropojenik) etkiden en az seviyede etkilenmiş derişim" olarak tanımlanmaktadır.

DAP seviyesi için başka bir tanımlama ise şöyledir: "büyük oranda insani faaliyetlerden türememiş, genelde jeolojik, biyolojik veya atmosferik kaynaklardan etkilenmiş sudaki element, tür veya kimyasal madde derişimi" ([Shand vd., 2007], [Wendland vd., 2008]).

Yeraltısularındaki kimyasal parametrelere ait arka plan seviyelerinin belirlenmesinin temel nedeni, kimyasal parametrelere ait eşik değer (threshold) (ED)'lerin saptanmasıdır. Eğer yeraltısuyu örneğindeki ilgili kimyasal parametre derişimi belirlenmiş olan ED'den yüksek ise o yeraltısuyunun etki (antropojenik veya doğal kirlilik) altında kaldığından bahsedilebilmektedir.

Yeraltısuyunun kimyasal durumunu vadoz zon, yeraltısuyunu bünyesinde bulunduran kayaçların (akiferlerin) hidrokinamik, hidrojeolojik ve petrolojik özellikleri belirlemektedir. Bu doğal etkenlerin yanı sıra arazi kullanımındaki değişiklikler, atmosferden veya tarımsal faaliyetlerden kaynaklanan yayılı veya noktasal girdiler vb. gibi insan kaynaklı nedenler de yeraltısularının kimyasal durumunu etkileyebilmektedir [Wendland vd., 2005].

Avrupa Birliği'ne üye tüm devletler 2015 yılına kadar miktar (çekim ve beslenme) ve kalite açısından iyi durumda yeraltısuyunu sağlamak için bütün yeraltısuyu kütlelerini korumak, geliştirmek ve iyileştirmek zorundadırlar [Quevauviller, 2005]. Bu amaca ulaşmak için Avrupa Birliği üyeleri 2000 yılında Su Çerçeve Direktifi (Water Framework Directive (WFD))'ni [Directive 2000/60/EC] yürürlüğe koymuşlardır. Su Çerçeve Direktifi'nin 17.maddesinde iyi durumdaki bir yeraltısuyu külesinin sahip olması gerektiği özellikler ayrıntısıyla verilmiştir.

Yeraltısuyunun kalite açısından iyi durumda sayılabilmesi için: genel olarak bünyesindeki kimyasal parametrelerin belirlenmiş olan değerleri (standart ve/veya eşik değerleri) aşmaması, yeraltısuyunun hidrolojik olarak ilişkide olduğu yüzey suyu ve direkt olarak yeraltısuyuna bağımlı karasal ekosistemin kalitesini kötüleştirmeyecek durumda olması gerekmektedir. Su Çerçeve Direktifi'nin yanı

sıra Yeraltısuyu Direktifi (Groundwater Directive (GWD)) [Directive 2006/118/EC]'nde yeraltısuyunun kimyasal durumunun (kalitesinin) iyi, zayıf veya belirsiz gibi tanımlarla belirlenmesinde kullanılacak olan ve üye devletlerce tespit edilecek olan standart ve eşik değerlere vurgu yapılmaktadır [Marandi ve Karro, 2008].

Su Çerçeve Direktifi ve Yeraltısuyu Direktifi yeraltısuyu kalitesinin korunması için bir dizi düzenlemeler getirmektedir ve bu koruma 3 ana hedefe dayanmaktadır [Coetsiers vd., 2009]. Bunlar: 1) 2015 yılına kadar iyi yeraltısuyu kalitesine ulaşmak, 2) Yeraltısuyuna kirleticileri girişini önlemek veya sınırlandırmak, 3) Yeraltısuyundaki kirlenme derişiminde olabilecek artışı engelleyici önlemleri almak ve uygulamaktır.

Üye devletler, yeraltısularındaki değişik kimyasal parametreler için eşik değer (ED)'lerin belirlenebilmesi amacıyla Avrupa Birliği 6.Çerçeve Programı kapsamında "Yeraltısuyu Eşik Değerlerinin Tespiti İçin Arka Plan Kriterleri (BRIDGE, Background cRiteria for the Identification of Groundwater ThrEsholds)" başlıklı proje ile bir yöntem (metodoloji) ortaya koymaya çalışmışlardır. Bu projeye 19 Avrupa Birliği üyesi ülkeden 27 ortak katılmış ve proje 2 yılda tamamlanabilmiştir. Bu proje ile oluşturulan arka plan (DAP) seviye değerlerini belirleme yönteminin uygulanabilirliği ve geçerliliği nehir havzası veya yeraltısuyu külesi seviyesinde 14 örnekte denenmiştir [Wendland vd., 2008].

Sunulan bu çalışmada, ülkemiz yeraltısularındaki bazı kimyasal parametrelerin DAP ve ED'lerinin belirlenmesine bir örnek verilmiştir. Bu örnekte, 53850 km²'lik yağış alanı ile ülkemizdeki dördüncü büyük havza olan Konya Kapalı Havzası'nda yer alan yeraltısularının kimyasal analiz sonuçları kullanılmıştır. Bu örneğin seçilmesinin nedeni, böyle bir çalışmayı yapabilecek yeterli sayıda su kimyası verisi içermesidir.

2 DOĞAL ARKA PLAN SEVİYESİ VE EŞİK DEĞERLERİN TÜRETİLME YÖNTEMİ

2.1 Doğal Arka Plan Seviyesi

BRIDGE projesinde geliştirilen ve sudaki kimyasal maddelere ait doğal arka plan (DAP) seviyelerinin türetilmesi kısaca: bir akiferdeki doğal yeraltısuyu kimyası verilerinden dikkatli seçilmiş veri setinde 90 ve 97,7'lik olasılık yüzdelik dilime (percentile (P₉₀ ve P_{97,7})) karşılık gelen değerlerin DAP seviyesi olarak tespit edilmesi ilkesine dayanmaktadır.

P₉₀ ve P_{97,7} değerlerinin seçilmesi kimyasal verinin kalitesine ve miktarına bağlıdır. Yüksek sayıda (>60 örnekleme noktası), antropojenik etkinin olmadığı, doğal içeriği temsil edici yeraltısuyu kimyası verisi varsa genelde P_{97,7} değerine karşılık gelen derişim DAP seviyesi olarak kabul edilir [Shand ve Edmuns, 2008].

Eğer veri seti boyu küçükse ve antropojenik etki veriden tam olarak arındırılmıyorsa P₉₀ değerine karşılık gelen derişim DAP seviyesi olarak önerilmektedir [Müller vd., 2006].

Su kimyası analiz verileri DAP seviyesi açısından değerlendirilmeden önce ön elemeye tabi tutulmaktadır. Bu ön eleme başlıca nedeni, DAP seviye değerinin belirlenmesinde verisi kullanılacak su kimyası değerlerinde antropojenik etkinin olmaması gerekliliğidir.

DAP seviyesinin belirlenmesinde aşağıda belirtilen özelliklere sahip su kimyası verileri kullanılmamaktadır [Müller vd., 2006].

- İyonik denge hatası %10'un üzerinde olan yeraltısuları,
- Tamamen antropojenik etki altında olan yeraltısuları (ör.: pestisit, PAH (polycyclic aromatic hydrocarbon), vb. antropojen kaynaklı maddeler içeren yeraltısuları),
- Hidrotermal kökenli yeraltısuları,
- Tuzlu akiferlerdeki (Na+Cl>1000 mg/L) yeraltısuları,
- Nitrat (NO₃) değeri 10 mg/L'den büyük, yükseltgen ortamlarındaki yeraltısuları,
- Amonyum (NH₄) değeri 0,5 mg/L'den büyük, indirgen ortamlarındaki yeraltısuları.

2.2 Eşik Değer

BRIDGE projesi kapsamında yeraltısuyu kütlesinin kimyasal açıdan (kalite açısından) durumunu belirlemek için akış şeması hazırlanmıştır (Şekil 1). Yeraltısuyu kütlesinin kimyasal durumunu belirlemede en önemli parametreler doğal arka plan (DAP) seviyesi ve eşik değer (ED)'dir.

Şekil 1'de verilmiş olan akış şeması; yeraltısuyuna bağlı ekosistemler (bk. Şekil 1, 1-4 numaralı basamaklar) ve sadece yeraltısuyu sistemleri için (bk. Şekil 1, 1-2a numaralı basamaklar) yapılacak işlem ve değerlendirmeleri göstermektedir.

Sadece yeraltısuyu sistemi için; DAP seviyesinin seçilen bir referansa (REF) (*bu standart içme suyu standardı, ekotoksikolojik değer vb. olabilir*) göre karşılaştırılmasıyla aşağıdaki üç durum (Şekil 2) dikkate alınarak ED hesaplaması yapılmaktadır ([Wendland vd., 2008], [Müller vd., 2006], [Hart vd., 2006]).

1.Durum:

Eğer belirli bir kimyasal madde için DAP seviyesi referans (REF) değere eşit veya küçük ise ED, DAP seviyesi ile REF değer arasında olur:

$$DAP \leq REF \rightarrow ED = (REF+DAP)/2 \quad (1)$$

2.Durum:

Eğer belirli bir kimyasal madde için DAP seviyesi referans (REF) değerinin 1/3'ünden küçük ise ED, DAP seviyesinin 2 katı olur:

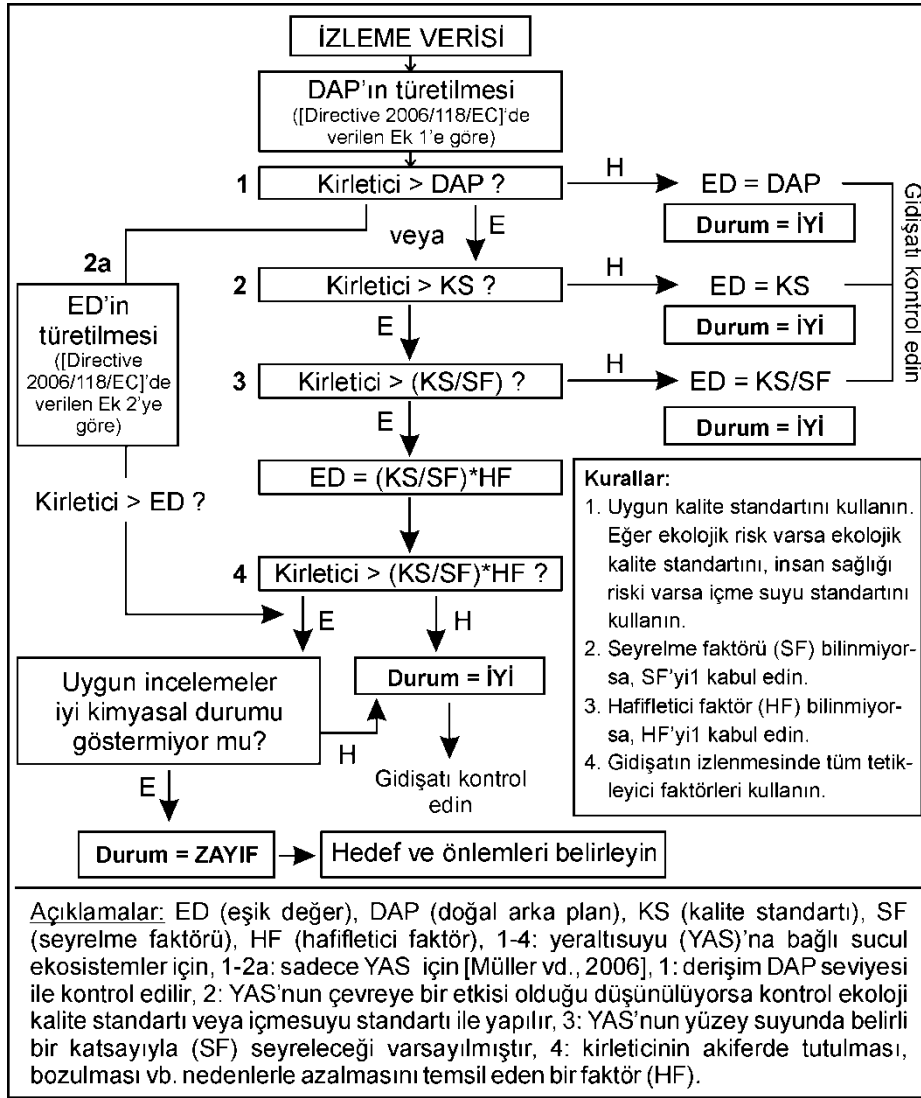
$$DAP < \frac{1}{3} * REF \rightarrow ED = 2 * DAP \quad (2)$$

3.Durum:

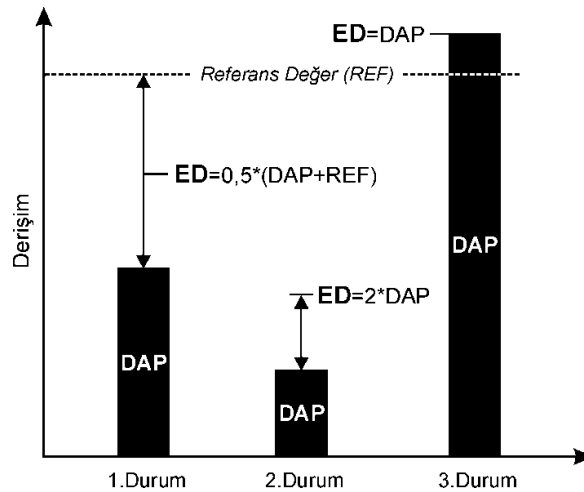
Eğer belirli bir kimyasal madde için DAP seviyesi referans (REF) değerden büyük ise ED, DAP seviyesine eşit olur:

$$DAP > REF \rightarrow ED = DAP \quad (3)$$

Yukarıda verilmiş durumlardan ikincisi özellikle DAP seviyesinin çok düşük olduğu durumlarda yüksek ED'lerle karşılaşılmamasını (1.durum gibi) önlemek için türetilmiştir. Her ne kadar BRIDGE Projesi'nin son raporunda bu seçenek çıkartılmış olmasına rağmen genelde ikinci durum el değmemiş akifer (yeraltısuyu) şartlarını korumak için dikkate alınmaktadır [Coetsiers vd., 2009].



Şekil 1. Eşik değer (ED)'lerin türetilmesi ve yeraltısuyunun kalite açısından durumunun ortaya konmasında BRIDGE projesinde belirlenen yöntem ([Coetsiers, 2009]'dan değiştirilerek alınmıştır)



Şekil 2. Eşik değer (ED) türetmede karşılaşılan durumlar ([Wendland vd., 2008]'den değiştirilerek alınmıştır)

Yeraltısularının fiziksel ve kimyasal özelliklerine ait 18 parametrenin aritmetik ortalama, standart sapma, mod (tepe değer), medyan (ortanca değer), en büyük ve en küçük gibi istatistiksel değerleri hesaplanmıştır (Çizelge 1). Çizelge 1'de verilmiş ortalama değerlere göre: yeraltısularının büyük bir bölümü kalsiyum karbonat (CaCO₃) su tipinde ve elektriksel iletkenlik (EC) değeri ise 1000 µS/cm civarındadır.

Çözünmüş oksijen (ÇÖ) değeri ortalaması 6,58 mg/L'dir ve bu değer içme sularında olması gereken değer (>5 mg O₂/L) ile uyumludur. Yeraltısularındaki BOİ (biyokimyasal oksijen ihtiyacı) ortalama değeri 4,16 mg/L'dir (bu değer kirletilmemiş sulara ≤2 mg/L, kirletilmiş sulara ise ≥10 mg/L'dir). Verilerde dikkat çekici başka bir nokta ise yüksek demir (Fe) derişimi (3,01 mg/L) ortalamasıdır (içme suyu standardı [TS 266, 2005]'na göre limit değer 0,2 mg/L'dir).

Çizelge 1. Yeraltısuyu kimyasal verilerine ait bazı istatistiksel veriler

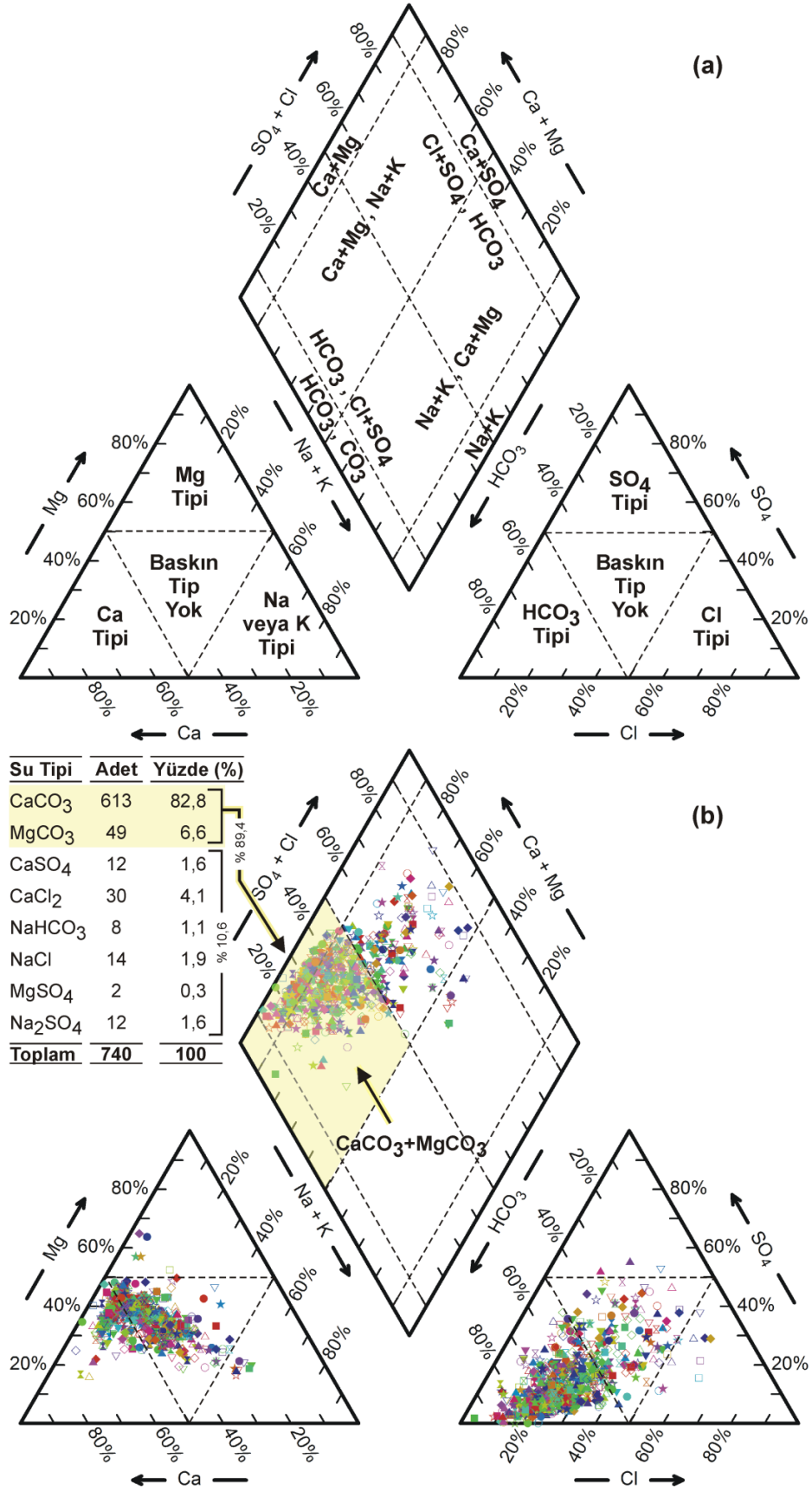
Parametre	Örnek Sayısı ⁽⁵⁾	Aritmetik Ortalama	Standart Sapma	Mod ⁽⁶⁾	Medyan ⁽⁷⁾	En Küçük	En Büyük
pH	740	7,28	0,36	7,00	7,27	6,10	8,24
EC (µS/cm) ⁽¹⁾	740	1095	792	500	950	128	7642
ÇÖ (mg/L) ⁽²⁾	337	6,58	1,12	7,10	6,80	0,00	8,98
Na (meq/L)	740	2,50	3,38	0,40	1,40	0,00	24,40
K (meq/L)	740	0,13	0,16	0,10	0,09	0,01	1,85
Ca (meq/L)	740	4,85	3,03	4,60	4,40	0,80	40,00
Mg (meq/L)	740	3,92	2,38	3,70	3,70	0,55	21,63
HCO ₃ (meq/L)	740	5,93	2,37	7,10	6,20	1,00	29,00
Cl (meq/L)	740	3,19	3,89	1,40	2,10	0,06	41,40
SO ₄ (meq/L)	740	2,28	3,37	0,30	1,20	0,00	30,00
NO ₂ (mg/L)	468	0,60	3,91	0,01	0,02	0,00	66,96
NO ₃ (mg/L)	468	0,63	1,10	0,01	0,27	0,00	8,68
NH ₃ (mg/L)	468	0,10	0,22	0,01	0,03	0,00	2,80
F (mg/L)	91	0,48	0,87	0,40	0,34	0,00	8,90
B (mg/L)	643	0,46	0,59	0,00	0,30	0,00	3,80
Fe (mg/L)	55	3,01	2,25	2,00	2,60	0,40	11,20
O-PO ₄ (mg/L) ⁽³⁾	330	0,31	0,38	0,10	0,20	0,02	3,65
BOİ (mg/L) ⁽⁴⁾	306	4,16	3,68	3,50	3,67	0,01	46,80

Açıklamalar: (1) EC (elektriksel iletkenlik), (2) ÇÖ (çözünmüş oksijen), (3) O-PO₄ (orto fosfat), (4) BOİ (biyokimyasal oksijen ihtiyacı), (5) Bazı su örneklerinde bazı kimyasal parametreler ölçülmemiştir, (6) Mod (tepe değer), (7) Medyan (ortanca değer).

Bu yüksek derişim değerinin nedeni insandan kaynaklanan (antropojenik) etki olabileceği gibi doğal faktörler (akifer malzemesinde bulunan Fe içeren minerallerin (ör.: pirit (Fe₂S)) çözünerek suya geçmesi) de olabilir.

Yeraltısularının hidrokimyasal fasiyes tiplerinin irdelenmesi amacıyla 740 adet yeraltısuyu kimyasal verisine ait Piper (üçgen) diyagramı oluşturulmuştur (Şekil 4). Piper (üçgen) diyagramına göre: yeraltısularının büyük bir bölümü (662 adet, %89,4) kalsiyum karbonat

(CaCO₃) ve magnezyum karbonat (MgCO₃) su ve hidrokimyasal fasiyes tipini temsil etmektedir. Bunların dışında kalan %10,6'lık (78 adet) kısım yeraltısuyu ise kalsiyum sülfat (CaSO₄), kalsiyum klorür (CaCl₂), sodyum bikarbonat (NaHCO₃), sodyum klorür (NaCl), magnezyum sülfat (MgSO₄) ve sodyum sülfat (Na₂SO₄) su ve hidrokimyasal fasiyes tipine sahiptir (bk. Şekil 4a ve Şekil 4b).



Şekil 4. a) Piper diyagramındaki hidrokimyasal fasiyeler [Back, 1961] ve b) bu çalışmada kullanılan 740 adet yeraltısuyu kimyasal örneğine ait Piper (üçgen) diyagramı, su tipi adetleri ve yüzdeleri

Kimyasal içerik olarak yeraltısularının büyük bir bölümünü oluşturan kalsiyum karbonat (CaCO₃) ve magnezyum karbonat (MgCO₃) fasiyesindeki sular diğer sulara göre nispeten daha düşük elektriksel iletkenlik (EC, ortalama 865 µS/cm, standart sapma ±377 µS/cm) değerleriyle sulama suyu açısından kaliteli sular grubundadır.

%10,6'lık kısma giren kalsiyum sülfat (CaSO₄), kalsiyum klorür (CaCl₂), sodyum bikarbonat (NaHCO₃), sodyum klorür (NaCl), magnezyum sülfat (MgSO₄) ve sodyum sülfat (Na₂SO₄) fasiyesindeki diğer sular ise nispeten yüksek elektriksel iletkenlik (EC, ortalama 2685 µS/cm, standart sapma ±989 µS/cm) değerleriyle kalitesi düşük sular grubundadır (*EC değeri 2000-3000 µS/cm arasında olan sular Su Kirliliği Kontrolü Yönetmeliği Teknik Usuller Tebliği'nde [13] yer alan Tablo 4: Sulama Sularının Sınıflandırılmasında Esas Alınan Sulama Suyu Kalite Parametreleri'ne göre "İhtiyatla Kullanılabilir" sular sınıfına girmektedir*).

Elektriksel iletkenlik (EC), Na, K, Ca ve Mg değerlerini kullanan ABD Sulama Suyu Sınıflaması'na göre [Richards, 1954] 740 adet yeraltısuyunun %33,2'si "Çok İyi, İyi (C₁₋₂S₁₋₂)", %59,1'i "Kullanılabilir (C₁₋₃S₁₋₃)" ve %7,7'si ise "İhtiyatla Kullanılabilir-Kullanılamaz (C₁₋₄S₁₋₄)" sınıfına girmektedir.

Yukarıda değişik parametrelere göre verilmiş olan değerlendirmelere göre: inceleme alanında yer alan ve bu çalışma kapsamında verileri kullanılan 740 adet kuyuya ait yeraltısuyunun büyük bir bölümü (~%90'i) sulama suyu kalitesi açısından iyi durumdadır.

4.2 Yeraltısularındaki Bazı Kimyasal Maddele Ait Doğal Arka Plan Seviyeleri ve Eşik Değerleri

Yeraltısularındaki kimyasal parametrelerin doğal arka plan (DAP) seviyeleri belirlenirken bu bildirinin "2 Doğal Arka Plan Seviyesi ve Eşik Değerlerin Türetilme Yöntemi" başlığı altında verilen kriterlere uymayan yeraltısuyu kimyasal verileri DAP seviyeleri hesaplamasında kullanılmamıştır. Toplam 747 adet veriden iyonik denge hatası %10'dan ve nitrat (NO₃) değeri 10 mg/L'den büyük olan 7 adet yeraltısuyu örneği DAP seviyesi hesaplamalarına katılmamıştır. Elenen 7 adet yeraltısuyu örneği tüm örnek sayısı (747) içinde ~%1'lik bir kısma karşılık gelmektedir.

Bu ~%1'lik yeraltısuyu kimyasal verisinin insan faktöründen (antropojenik etki) etkilendiği düşünüldüğü için DAP seviyesi hesaplamalarında kullanılmamıştır.

Doğadaki birçok olay ve bu olaylara ait veriler normal veya normale yakın bir dağılım göstermektedir. Çalışmada kullanılan su kimyası verilerinin de normal dağılıma uygun olduğu düşünülerek yeraltısuyu kimyasal parametrelerine ait normal dağılım olasılığı (f(x)) aşağıdaki fonksiyon kullanılarak hesaplanmıştır.

$$f(x) = \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} \quad (4)$$

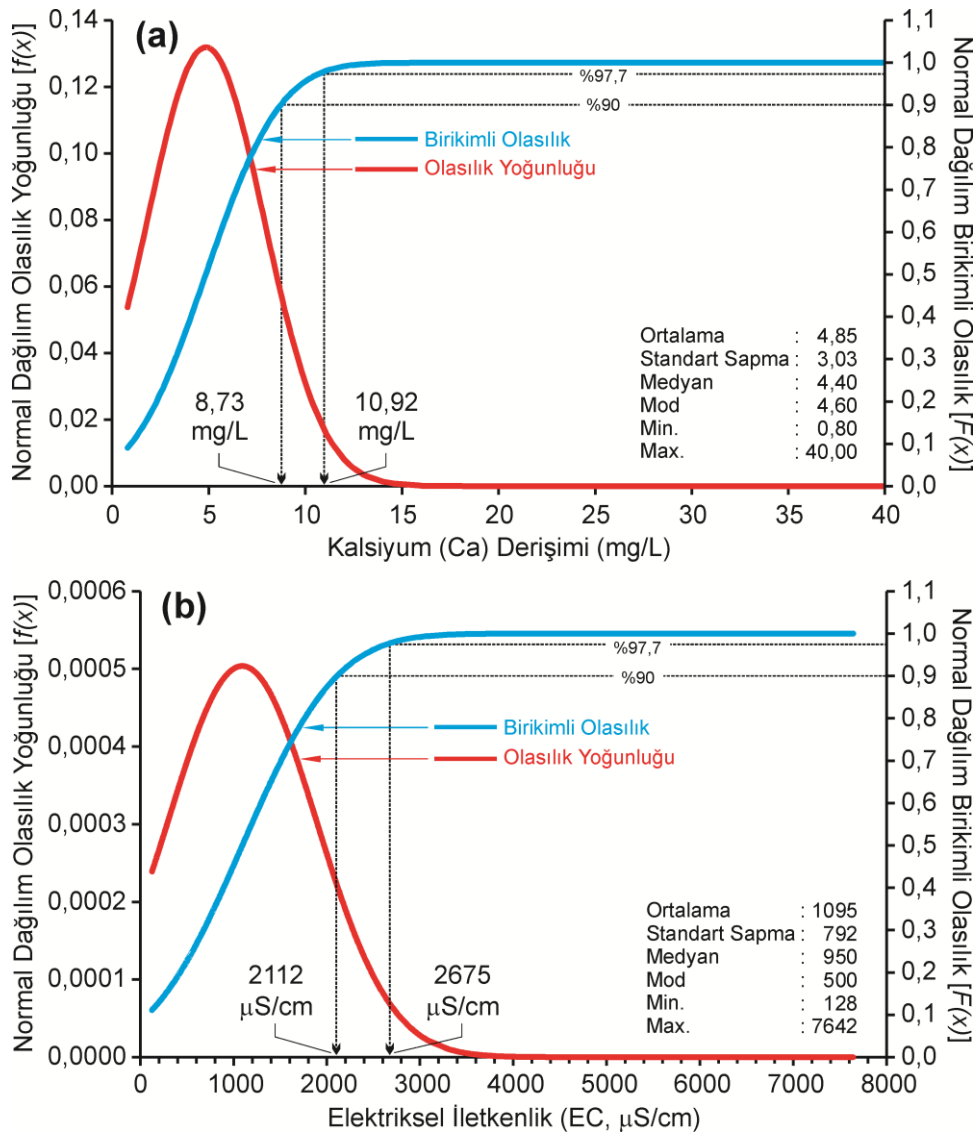
Burada:

f(x): normal dağılım olasılık yoğunluğu,
 µ : verilerin aritmetik ortalaması,
 σ : verilerin standart sapması,
 x : veri değeri (-∞ < x < +∞),
 π : 3,14159 ve
 e : 2,71828'dir.

Eşitlik 4'de verilmiş olan fonksiyon ile bu çalışmada kullanılan yeraltısuyu verilerine ait kalsiyum (Ca) derişimlerinin ve elektriksel iletkenlik (EC) değerlerinin hesaplanan normal dağılım olasılık yoğunluğu (f(x)) ve normal dağılım birikimli olasılık (F(x)) değerleri örnek olarak verilmiştir (Şekil 5a ve Şekil 5b). Hesaplanan birikimli olasılık (F(x)) değerleri aynı zamanda bu çalışma kapsamında olasılık yüzdelik dilim (percentile (P)) olarak kullanılmıştır.

740 adet yeraltısuyu kimyasal verisindeki Ca derişimi ve EC değerleri için 90 (P₉₀) ve 97,7'lik (P_{97,7}) olasılık yüzdelik dilimine (percentile) karşılık olarak sırasıyla: Ca için 8,73 mg/L ve 10,92 mg/L, EC için ise 2112 µS/cm ve 2675 µS/cm değerleri belirlenmiştir (bk. Şekil 5a ve Şekil 5b). Belirlenen P₉₀ ve P_{97,7}'ye karşılık gelen bu değerler yeraltısularındaki kalsiyum Ca ve EC için doğal arka plan (DAP) seviyeleridir.

Yukarıda kalsiyum (Ca) ve elektriksel iletkenlik (EC) için örnek olarak verilen DAP seviyesi hesaplaması pH, çözünmüş oksijen (ÇO), sodyum (Na), potasyum (K), magnezyum (Mg), bikarbonat (HCO₃), klorür (Cl), sülfat (SO₄), nitrit (NO₂), nitrat (NO₃), amonyak (NH₃), florür (F), bor (B), demir (Fe), orto fosfat (O-PO₄) ve biyokimyasal oksijen ihtiyacı (BOİ) parametreleri için de yapılmıştır (Çizelge 2).



Şekil 5. Yeraltısuyu kimyasal verilerine ait (a) kalsiyum (Ca) derişimlerinin ve b) elektriksel iletkenlik (EC) değerlerinin normal dağılım olasılık yoğunluğu $f(x)$ ve birikimli olasılık $F(x)$ değerleri

Kimyasal parametreler için belirlenen DAP seviye değerleri Eşitlik 1, 2, 3 ve Şekil 2'de verilmiş olan durumlarla karşılaştırılarak yeraltısularındaki kimyasal parametrelere ait eşik değer (ED)'ler hesaplanmıştır (Çizelge 2). Bu karşılaştırma yapılırken Eşitlik 1, 2, 3 ve Şekil 2'de yer alan referans (REF) değer olarak içme suyu standardında [TS 266, 2005] kimyasal parametreler için verilmiş olan limit değerler kullanılmıştır. Kimyasal parametreler için istatistiksel olarak hesaplanan DAP seviyelerinin P_{90} ve $P_{97,7}$ değerlerine karşılık gelen ED'ler (ED_1 ve ED_2) ayrı ayrı hesaplanmıştır (bk. Çizelge 2). Çözünmüş oksijen (ÇÖ), Ca, Mg vb. kimyasal parametrelerin içme suyu standardında herhangi bir limit değeri olmadığından dolayı bu

parametrelere için ED hesaplanmamıştır. Eşik değer (ED) belirlenirken genelde 1. ve 3. durum koşulu gerçekleşmiştir (bu durumlar için bk. eşitlik 1, 2, 3 ve Şekil 2). Yani, tüm yeraltısularındaki kimyasal parametre derişimleri ile saptanan DAP seviye değerleri referans (REF) değerden küçük (1.durum) veya büyük (3.durum) durumlar için ED hesaplanmıştır. Verisi kullanılan tüm yeraltısuyu örneklerinde içme suyu standardında limit değeri verilmiş olan kimyasal parametreler ile Çizelge 2'de verilmiş olan ED'ler karşılaştırılmış ve ED'i geçen parametreler ve yeraltısuyu örnek adedi belirlenmiştir (Çizelge 3).

Çizelge 2. Yeraltısularındaki bazı kimyasal maddeler için belirlenen doğal arka plan (DAP) seviyeleri ve eşik değerleri (ED)

Parametre ⁽¹⁾	DAP ₁ ⁽⁶⁾	DAP ₂ ⁽⁷⁾	REF ⁽⁸⁾	ED ₁ ⁽⁹⁾	ED ₂ ⁽¹⁰⁾	Durum ⁽¹¹⁾
	P ₉₀	P _{97,7}				
pH	7,74	8,00	6,50 - 9,50	7,12 - 8,62	7,25 - 8,75	1
EC (µS/cm) ⁽²⁾	2112	2675	2500	2306	2675	1, 3
ÇO (mg/L) ⁽³⁾	8,03	8,87				
Na (meq/L)	6,80	8,15	8,7	7,75	8,43	1
K (meq/L)	0,33	0,46				
Ca (meq/L)	8,73	10,92				
Mg (meq/L)	6,97	8,70				
HCO ₃ (meq/L)	8,97	10,72				
Cl (meq/L)	8,18	10,96	7,05	8,18	10,96	3
SO ₄ (meq/L)	6,60	9,03	5,21	6,60	9,03	3
NO ₂ (mg/L)	5,61	8,43	0,50	5,61	8,43	3
NO ₃ (mg/L)	2,05	2,84	50,00	4,10	5,68	2
NH ₃ (mg/L)	0,38	0,46	0,50	0,44	0,48	1
F (mg/L)	1,59	5,77	1,50	1,59	5,77	3
B (mg/L)	1,22	1,64	1,00	1,22	1,64	3
Fe (mg/L)	6,09	7,69	0,20	6,09	7,69	3
O-PO ₄ (mg/L) ⁽⁴⁾	0,80	1,09				
BOİ (mg/L) ⁽⁵⁾	8,91	11,85				

Açıklamalar: (1) İçme suyu standardı olmayan parametrelerin eşik değeri (ED) belirlenmemiştir, (2) EC (elektriksel iletkenlik), (3) ÇO (çözünmüş oksijen), (4) O-PO₄ (orto fosfat), (5) BOİ (biyokimyasal oksijen ihtiyacı), (6) DAP₁: 90 (P₉₀) olasılık yüzdelik dilimi için belirlenen doğal arka plan (DAP) seviyesi, (7) DAP₂: 97,7 (P_{97,7}) olasılık yüzdelik dilimi için belirlenen doğal arka plan (DAP) seviyesi, (8) REF: TS 266 (2005) İçme Suyu Standardı, (9) ED₁: 90 (P₉₀) olasılık yüzdelik dilimi için belirlenen eşik değer, (10) ED₂: 97,7 (P_{97,7}) olasılık yüzdelik dilimi için belirlenen eşik değer, (11) DAP₁, DAP₂, ED₁ ve ED₂'nin hesaplanmasında dikkate alınan kriterler (bk. "2.1 Doğal Arka Plan Seviyesi", "2.2 Eşik Değer" başlıkları altındaki açıklamalar, Eşitlik 1, 2, 3 ve Şekil 2).

Çizelge 3. Bazı kimyasal parametreler açısından ED'i aşan yeraltısuyu adedi ve yüzdeleri

Parametre	Örnek Sayısı	ED ₂ 'yi Aşan Örnek Sayısı	ED ₂ 'yi Aşan Örnek %'si
pH	740	0	0,0
EC (µS/cm)	740	35	4,7
Na (meq/L)	740	36	4,9
Cl (meq/L)	740	29	3,9
SO ₄ (meq/L)	740	40	5,4
NO ₂ (mg/L)	468	6	1,3
NO ₃ (mg/L)	468	3	0,6
NH ₃ (mg/L)	468	17	3,6
F (mg/L)	91	1	1,1
B (mg/L)	643	34	5,3
Fe (mg/L)	55	4	7,3

Genel olarak, kimyasal parametreler açısından tüm veriler (740 adet yeraltısuyu örneği) içinde ED'i aşan yeraltısuyu yüzdesi %7'den küçüktür.

Özellikle yeraltısularındaki demir (Fe) derişimi açısından ED'i aşan yeraltısuyu yüzdesi %7,3 gibi diğerlerine göre nispeten büyük bir değerdir. Bu yüksek değerlerin olası nedenleri aşağıda verilmiştir.

- Diğer verilere göre demir (Fe) parametresine ait verinin (55 adet yeraltısuyu örneği) azlığı,
- İnsan kaynaklı (antropojenik) kirlilik,
- Doğal kirlilik: akifer malzemesinde yer alan ve Fe'ce zengin minerallerin (ör.: götit (FeO(OH)), pirit (Fe₂S), demir hidroksit (Fe(OH)₃) vb.) yükseltgenme-indirgenme (redoks) vb. reaksiyonlarla çözünerek suya geçmesi [Coetsiers vd., 2009].

Yukarıdaki değerlendirmelerin ışığı altında: Çizelge 3'te verilmiş olan ve ED'i aşan ve yüzde miktarı %0,6 ile %7,3 arasında değişen yeraltısuları içme suyu kalitesi açısından, Şekil 1'de sunulmuş olan yöntem (2a) ve bu yöntemdeki kriterlere göre, zayıf (poor) durumdadır.

5 SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Konya Kapalı Havzası'nda yer alan 740 adet yeraltısuyunun kimyasal analiz sonuçları kullanılarak; yeraltısularının kimyasal kalitelerinin, bazı kimyasal parametrelerin doğal arka plan seviyelerinin ve eşik değerlerinin belirlenmesi amacıyla bu çalışma gerçekleştirilmiştir.

Hidrokimyasal fasiyes tiplerinin irdelenmesiyle: alandaki yeraltısularının ~%90'lık büyük bir bölümünün kalsiyum karbonat (CaCO₃) ve magnezyum karbonat (MgCO₃), geri kalan suların ise kalsiyum sülfat (CaSO₄), kalsiyum klorür (CaCl₂), sodyum bikarbonat (NaHCO₃), sodyum klorür (NaCl), magnezyum sülfat (MgSO₄) ve sodyum sülfat (Na₂SO₄) su tipinde olduğu belirlenmiştir.

Yeraltısularının büyük bir bölümünü oluşturan kalsiyum karbonat (CaCO₃) ve magnezyum karbonat (MgCO₃) fasiyesindeki sular diğer sulara göre nispeten daha düşük elektriksel iletkenlik (ortalama 865 µS/cm) değerleriyle sulama suyu açısından kaliteli sular grubunda, %10'luk kısma giren diğer sular ise nispeten yüksek elektriksel iletkenlik (ortalama 2685 µS/cm) değerleriyle kalitesi düşük sular grubunda yer almaktadır.

Hidrokimyasal fasiyes değerlendirmelerine ek olarak, değişik değerlendirme ve sınıflamalar (*Su Kirliliği Kontrolü Yönetmeliği Teknik Usuller Tebliği ve ABD Sulama Suyu Sınıflaması*) alanda yer alan yeraltısularının büyük bir bölümünün (~%90) sulama suyu kalitesi açısından iyi durumda olduğunu göstermiştir.

Avrupa Birliği 6.Çerçeve Programı kapsamında "Yeraltısuyu Eşik Değerlerinin Tespiti İçin Arka Plan Kriterleri (BRIDGE, **B**ackground **c**riteria for the **I**dentification of **G**roundwater **T**hresholds)" başlıklı proje ile geliştirilen yöntem Konya Kapalı Havzası'nda yer alan 740 adet yeraltısuyu kimyasal verisine uygulanmıştır.

Yeraltısularındaki bazı kimyasal parametrelere ait eşik değerlerin belirlenmesi için önerilen yöntem birçok majör iyon için iyi sonuçlar vermektedir fakat eşik değer tayini seçilen referansa göre farklılıklar göstermektedir. Bu bildiride eşik değerlerin belirlenmesinde "TS 266 İçme Suyu Standardı" kullanılmıştır.

Verisi kullanılan tüm yeraltısuyu örneklerinde içme suyu standardında limit değeri verilmiş olan kimyasal parametreler ile bu çalışma kapsamında belirlenen eşik değerler karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırma sonucu: genel olarak kimyasal parametreler açısından tüm veriler içinde eşik değeri aşan yeraltısuyu yüzdesi %0,6 ile %7,3 arasında değiştiği saptanmıştır. Eşik değeri aşan yeraltısuları (*her ne kadar bu yeraltısuları sulama amaçlı kullanılıyor olsa da*) içme suyu kalitesi açısından zayıf durumdadır.

Sunulan bu çalışmada varılan sonuca göre: içme suyu kalitesi açısından zayıf durumda olduğu görülen %0,6-7,3'lik yeraltısuyunun aşağıda belirtilen öneriler doğrultusunda daha ayrıntılı çalışılması gerekmektedir.

- Yeraltısularındaki kimyasal parametrelerin doğal arka plan seviyesi ve eşik değerlerinin türetilmesinden önce ülkemizdeki tüm yeraltısuyu kütleleri; akifer tipi, akiferi oluşturan litoloji, akiferin kullanım oranı vb. gibi faktörler göz önüne alınarak değerlendirilmeli ve yeraltısuyu kütleleri hassas bir şekilde belirlenmelidir.
- Yeraltısuyu kütlelerinin belirlenmesinden sonra bu kütleler üzerinde kütle temsil edici yeraltısuyu örnekleme ve analiz noktaları seçilmelidir.

- Bu çalışmada her ne kadar sulama suyu kalite değerlendirmesi için yapılan yeraltısuyu kimyasal analiz parametreleri (pH, EC, Ca, Mg, Na, K, CO₃, HCO₃, Cl, SO₄, NO₂, NO₃, B vb.) kullanılmış olsa da içme suyu standardında yer alan ve sağlık açısından önemli diğer kimyasal parametreler (ör.: ağır metaller (As (arsenik), Cd (kadmiyum), Pb (kurşun), Hg (civa) vb.)) de analiz edilmelidir.
- Yukarıda belirtilen oldukça zahmetli ve yoğun emek isteyen çalışmaların yapılmasından sonra yeraltısuyu kütlesinin kalite açısından durumu bu bildiriye açıklanmaya çalışılan yöntem (*doğal arka plan seviyesi ve eşik değerler*) veya bu yöntem benzeri çalışmalarla ortaya konulmalıdır.
- Kalite açısından olumsuzluklara karşılaşılması durumunda bunun nedeni (doğal veya insan kaynaklı (antropojenik) kirlilik) araştırılmalı ve ülkemizdeki yeraltısularının kalite açısından korunması, bu olumsuzlukların giderilmesi veya azaltılması için gerekli önlemlerin alınması gerekmektedir.

6 KATKI BELİRTME

Yazar, DSİ 4. Bölge Müdürlüğü (Konya) Jeoteknik Hizmetler ve Yeraltısuları Şube Müdürü Kemal OLGUN'a çalışmada kullanılan su kimyası verilerinin üretilmesinde göstermiş olduğu titizlik ve hassasiyetten ve yine aynı şubede görevli Cenk GÜNGÖR'e kuyu yerleri koordinat bilgilerinin sağlanmasında yapmış olduğu yardımlardan dolayı teşekkür eder.

7 KAYNAKLAR

- [1] Back, W., 1961, "Techniques for Mapping of Hydrochemical Facies", USGS (United States Geological Survey) Prof. Pap., 424-D, 380-392.
- [2] Coetsiers, M., Blaser, P., Martens, K. and Walraevens, K., 2009, "Natural Background Levels and Threshold Values for Groundwater in Fluvial Pleistocene and Tertiary Marine Aquifers in Flanders", Belgium, Environmental Geology, Vol. 57, 1155-1168.
- [3] Directive 2000/60/EC, Directive of The European Parliament and of The Council of 23 October 2000, Establishing a Framework for Community Action in The Field of Water Policy, Official Journal of the European Union L 327, 1-73.
- [4] Directive 2006/118/EC, Directive of The European Parliament and of The Council of 12 December 2006, The Protection of Groundwater Against Pollution and Deterioration, Official Journal of the European Union L 372, 19-31.
- [5] Hart, A., Müller, D., Blum, A., Hookey, J., Kunkel, R., Scheidleder, A., Tomlin, C. And Wendland, F., 2006, Preliminary Methodology to Derive Environmental Threshold Values, Specific Targeted EU Research Project BRIDGE (Contract No SSPI-2004-006538), Report: D15, www.wfd-bridge.net., Erişim tarihi: 05 Ağustos 2011.
- [6] Marandi, A. and Karro, E., 2008, "Natural Background Levels and Threshold Values of Monitored Parameters in The Cambrian-Vendian Groundwater Body, Estonia", Environmental Geology, Vol. 54, 1217-1225.
- [7] Müller, D., Blum, A., Hookey, J., Kunkel, R., Scheidleder, A., Tomlin, C. and Wendland, F., 2006, Final Proposal of A Methodology to Setup Groundwater Threshold Values in Europe, Specific Targeted EU Research Project BRIDGE (Contract No SSPI-2004-006538), Report: D18, www.wfd-bridge.net, Erişim tarihi: 19 Temmuz 2011.
- [8] Panno, S.V., Kelly, W.R., Martinsek, A.T. and Hackley, K.C., 2006, "Estimating Background and Threshold Nitrate Concentrations Using Probability Graphs", Groundwater, Vol. 44, No. 5, 697-709.
- [9] Quevauviller, P., 2005, "Groundwater Monitoring in The Context of EU Legislation: Reality and Integration Needs", Journal of Environmental Monitoring, Vol. 7, 89-102.
- [10] Richards, L. A., 1954, Diagnosis and Improvement of Saline and Alkali Soils, U.S. Department of Agriculture Handbook, Vol. 60, Washington D.C., USA, 160 p.
- [11] Shand, P., Edmunds, W. M., Lawrence, A. R., Smedley, P. L. and Burke, S., 2007, The Natural (Baseline) Quality of Groundwater in England and Wales, British Geological Survey Research Report No. RR/07/06, ISBN 978 085272595 5, 72 p.
- [12] Shand, P. and Edmunds, W.M., 2008, "The Baseline Inorganic Chemistry of European Groundwaters", In: Edmunds, W.M. and Shand, P. (eds.) Natural Groundwater Quality, Blackwell, Oxford, 22-58.
- [13] Su Kirliliği Kontrolü Yönetmeliği Teknik Usuller Tebliği, 2007, 07 Ocak 1991 tarih ve 20748 sayılı Resmi Gazete, Son güncelleme tarihi: 18 Eylül 2007.
- [14] TS 266, 2005, Sular-İnsanî Tüketim Amaçlı Sular, Türk Standardları Enstitüsü (TSE), ICS 13.060.20, Necatibey Caddesi No.112 Bakanlıklar, 10 s., Ankara.

- [15] USGS (The United States Geological Survey), 2004, Water Basic Glossary, http://water.usgs.gov/water-basics_glossary.html#B, Erişim tarihi: 17 Temmuz 2011.
- [16] Wendland, F., Hannappel, S., Kunkel, R., Schenk, R., Voight, H.J. and Wolter, R., 2005, "A Procedure to Define Natural Groundwater Conditions of Groundwater Bodies in Germany", Water Science & Technology, Vol. 51, No. 3-4, 249-257.
- [17] Wendland, F., Berthold, G., Blum, A., Elsass, P., Fritsche, J.G., Kunkel, R. and Wolter, R., 2008, "Derivation of Natural Background Levels and Threshold Values for Groundwater Bodies in The Upper Rhine Valley (France, Switzerland and Germany)", Desalination, Vol. 226, 160-168.

GEBZE ATIKSU ARITMA TESİSİ ALANI İÇİN ZEMİN İYİLEŞTİRME YÖNTEMLERİNİN KARŞILAŞTIRILMASI

Fatma Ebru YILDIZ
(Dr., İnş.Y.Müh.Teknik Uzman, İller Bankası Genel Müdürlüğü A.Ş.,Opera, ANKARA)
februyildiz@hotmail.com

Murat ŞAHİN
(İnş.Y.Müh. ANTRA Mühendislik Ltd.Şti. ANKARA)
msahin@antra.com.tr

(Makalenin geliş tarihi: 30.06.2011, Makalenin kabul tarihi: 02.03.2012)

ÖZET

Gebze atıksu arıtma tesisi sahası Kocaeli ili sınırları içinde olup yaklaşık 11 ha alan kaplamaktadır. 2007 tarihinde bu alanda zemin etütleri yaptırılmıştır. Jeolojik ve geoteknik zemin etütleri sonucunda Gebze atıksu arıtma tesisi sahasının taşıma gücünün düşük olduğu ve zeminde sıvılaşma riskinin bulunduğu belirlenerek bu proje sahasında zemin ıslah çalışmalarının yapılması gerektiği sonucuna varılmıştır. Proje sahasındaki zeminin yumuşak kil (balçık), katı killi kum ve kumlu kil olduğu ve zeminin emniyetli taşıma gücünün $0,02 \text{ kg/cm}^2$ ile $0,48 \text{ kg/cm}^2$ arasında değiştiği belirlenmiştir. Bu çalışmada detaylı bir araştırma yapılarak Gebze atıksu arıtma tesisi alanında uygulanabilecek olan zemin iyileştirme yöntemleri araştırılmış ve bu yöntemler teknik olarak irdelenerek hangi yöntemin Gebze atıksu arıtma tesisi alanının zemininin iyileştirilmesinde kullanılabileceği araştırılmıştır. Araştırmalar ve hesaplamalar sonucunda; taş kolon veya enjeksiyon yöntemlerinin Gebze atıksu arıtma tesisi alanında uygulanabileceği sonucuna varılmıştır. İlk yatırım maliyetleri göz önüne alındığında ise taş kolon yönteminin jet enjeksiyon yöntemine göre daha ucuz bir yöntem olduğu belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Zemin iyileştirme yöntemleri, jet enjeksiyon, taş kolon, Gebze atıksu arıtma tesisi

SOIL STABILIZATION METHODS FOR GEBZE WASTE WATER TREATMENT PLANT AREA

ABSTRACT

Gebze wastewater treatment plant area is located within the boundary of Kocaeli Province and covers approximately 11 ha area. Geotechnical investigations for this area were carried out in 2007. According to these geological and geotechnical investigations; it was determined that not only bearing capacity of the soil is very low but also there is liquefaction risk so it is determined that the soil stabilization is required. Bearing capacity of the soil varies between $0,02 \text{ kg/cm}^2$ and $0,48 \text{ kg/cm}^2$. After a detailed literature review; an applicable soil stabilization methods are compared technically and economically for Gebze wastewater treatment area within the content of this study. According to the research and computations; it is determined that stone column or jet grout methods are suitable for Gebze wastewater treatment area. Stone column method is cheaper than jet grout method when their initial investment costs are determined.

Keywords: Soil stabilization methods, jet grout, stone column, Gebze wastewater treatment plant

1 GİRİŞ

Gebze İlçesi Marmara Bölgesi'nde, Kocaeli İli sınırları içinde Kocaeli-İstanbul karayolu üzerinde bulunmaktadır. Gebze'nin doğusunda Körfez İlçesi, batısında İstanbul, kuzeyinde Şile ve güneyinde ise İzmit Körfezi bulunmaktadır. Gebze İlçesi Şekil 1'de verilen harita üzerinde gösterilmiştir.

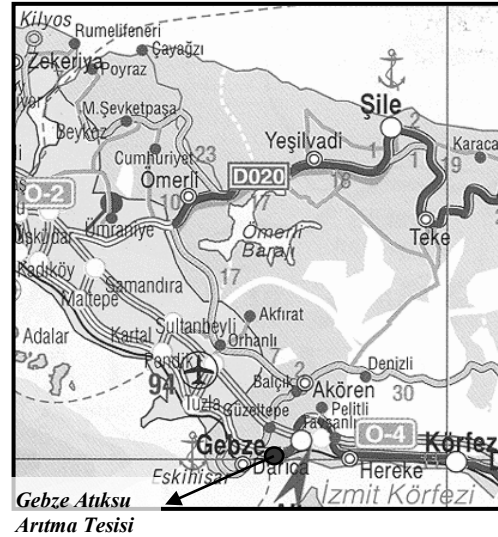
Gebze İlçesi sınırları içerisindeki evsel nitelikli atıksuların mevcut kanun ve yönetmeliklere uygun olarak arıtılması ve arıtılmış suyun Marmara Denizi'ne deşarj edilebilmesi amacıyla İller Bankası Genel Müdürlüğü tarafından, 2007 yılında Gebze (Kocaeli) Atıksu Arıtma Tesisi Kesin Projesi ihale edilmiş ve 2008 yılında onaylanmıştır. Proje sahası Gebze'nin güneybatı ucunda, İstanbul İli sınırında yer almaktadır. Jeomorfolojik olarak incelendiğinde Gebze'nin yüzeyi kuzey ve doğuda dağ ve dağ sırtlarından, kıyıya yakın bölümlerden oluşan batı ve güneyde ise düzlüklerden oluşmaktadır. Gebze atıksu arıtma tesisi alanı da düzlük üzerinde bulunmaktadır [1, 2].

Kesin proje kapsamında, 2007 yılında atıksu arıtma tesisi sahasında zemin etütleri yapılmıştır. Zemin etütleri sırasında, proje alanında toplam 185 m derinliğinde 8 adet sondaj yapılmış ve sondajlardan alınan zemin örnekleri üzerinde laboratuvar deneyleri yapılmıştır. Buna göre proje alanında kazı sınıfı %100 toprak olarak belirlenmiş, sondajlarda 1 m ile 4,6 m arasında değişen derinliklerde yeraltı suyuna rastlanmıştır. Araştırmalar sonucunda zeminin yumuşak kil (balçık), katı killi kum ve kumlu kil ardalanmasından oluştuğu görülmüştür. Atıksu arıtma tesisi ünitelerinden zemine aktarılacak tasarım gerilmeleri 0,5-1,0 kg/cm² arasında hesaplanmıştır. Ancak sondaj kuyularından alınan zemin örnekleri üzerinde yapılan laboratuvar deneyleri sonucunda, zeminin emniyetli taşıma gücünün 0,02 kg/cm² ile 0,48 kg/cm² arasında değiştiği belirlenmiştir.

Atıksu arıtma tesislerinde, üniteler arasında boru geçişleri olduğundan ünitelerde oturma olması durumunda atık su borularında kırılma ve çatlama meydana gelecektir. Bu nedenle atıksu arıtma tesisi ünitelerinde kabul edilebilir limitlerin üzerinde oturma olması istenmemektedir. Atıksu arıtma tesisi alanında zeminin emniyetli taşıma gücünün 0,02 kg/cm² ile 0,48 kg/cm² arasında olduğu göz önüne alındığında, zemin iyileştirmesi yapılmadan zeminin atıksu arıtma tesisi ünitelerini taşıması mümkün görülmemektedir.

Bu çalışma kapsamında, her sondaj kuyusunun bulunduğu alan için ilgili ünitenin temel boyutları dikkate alınarak yapılan oturma analizleri ile zemin iyileştirmesi öncesinde beklenen oturmalar hesaplanmış ve sonuçlar Çizelge 1'de verilmiştir. Çizelge 1'e göre zemin iyileştirmesi yapılmaması halinde zeminde 12,3 ile 29,1 cm arasında değişen oturmalar belirlenmiştir.

Diğer taraftan Gebze Atıksu Arıtma Tesisi proje alanı 1.derece deprem bölgesinde bulunmaktadır. Jeoteknik Etüd Raporu'na göre M=8 büyüklüğünde ve 0,4g yer ivmesi üreten bir deprem olması durumunda zeminde sıvılaşma olacağı ve sıvılaşma nedeniyle 80 cm'ye varan oturmalar olabileceği belirlenmiştir [1]. Sonuç olarak proje sahasında zemin taşıma gücünün düşük olması ve sıvılaşma riskinin bulunması nedeniyle atıksu arıtma tesisinin inşaatı öncesinde zemin iyileştirmesi yapılması gerektiğine karar verilmiştir.



Şekil 1. Çalışma alanının yer bulduru haritası

Çizelge 1. Gebze Atıksu Arıtma Tesisi alanında zemin iyileştirmesi yapılmaması durumunda statik durumda beklenen oturma miktarı

Sondaj Kuyusu No	Sondaj Derinliği (m)	Yeraltısu Seviyesi (m)	Oturma Miktarı (cm)
SK1	25,95	3,80	18,7
SK2	25,95	4,00	12,3
SK3	27,45	1,00	16,2
SK4	27,45	4,50	29,1
SK5	20,45	4,00	23,9
SK6	21,45	4,60	17,9
SK7	20,45	4,50	12,5
SK8	21,45	3,00	21,4

2 ÇALIŞMA ALANININ VE ÇEVRESİNİN JEOLJİSİ

Arazi etütleri sonucunda proje sahasında zeminin Kuvaterner yaşlı alüvyon çökellerden oluştuğu belirlenmiştir. Kuvaterner alüvyon, kil-kum ar dalanması ile gevşek, çok yumuşak kil ve balçık malzemesinden oluşmaktadır. Kil-kum ar dalanmasında mevcut olan killer kahverengi, deniz kabuğu içeren, düşük plastisiteli, kum tabakaları ise sarımsı bej renkli, gevşek-orta sıkı, yer yer çakıllı ve killidir. Balçık malzemesi ise yeşilimsi koyu gri renkli, yumuşak-çok yumuşak, siltli, yer yer az kumlu ve düşük plastisiteli kilden oluşmaktadır [1]. Gebze ilçesi ve çevresinin jeolojisi incelenecek olursa Kocaeli Yarımadası'nda jeolojik sıralanma en altta Paleozoyik yaşlı İstanbul formasyonu ile başlamakta, Triyas yaşlı Kocaeli formasyonu ile devam etmekte, Tersiyer ve Kuvaterner yaşlı güncel çökellerle son bulmaktadır. Ek olarak bu bölgede volkanik lav akıntılarıyla Çavuşbaşı Formasyonu (granodiyorit-kuvarsdiyorit) ile Gebze Granit Plütonları da yer almaktadır [2]. Paleozoyik yaşlı İstanbul Formasyonu kumtaşı-kiltaşı ar dalanmasından oluşmakta ve Hereke, Derince ve Kocaeli'nin güneyinde yayılım göstermektedir.

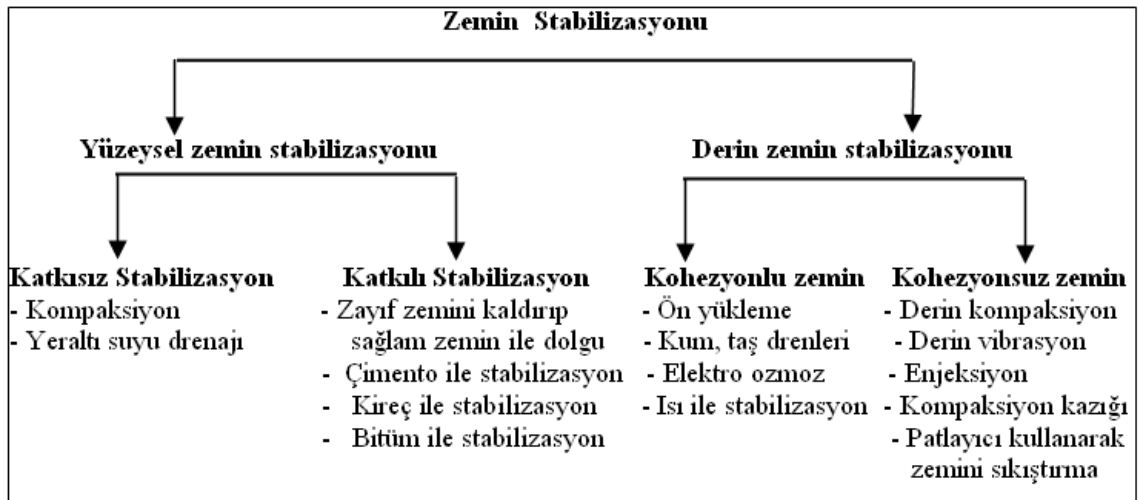
Triyas yaşlı Kocaeli Formasyonu Gebze ile Hereke'de geniş yayılım gösterir. Kocaeli Formasyonu'nun tabanında kumtaşı-silttaşı bantları bulunur, üstte ise bordo renkli ince tabakalı grovak bileşimleri bulunur. Kocaeli Formasyonu'nun üzerinde ise tabanda konglomera ile başlayıp kumtaşı-kireçtaşı ile devam eden Kretase yaşlı birimler bulunur.

Kretase yaşlı bu birim Akveren Formasyonu olarak isimlendirilmiştir [3]. Senozoyik yaşlı, kumtaşı-marn-kiltaşı ar dalanmasından oluşan Korucu Formasyonu ise Akveren Formasyonu'nu örtmektedir. Kocaeli İli ve çevresinde Tersiyer ve Kuvaterner yaşlı güncel çökeller de yüzeyde görülmektedir [1].

3 ZEMİN İYİLEŞTİRME YÖNTEMLERİ

Stabilizasyon zeminin özelliklerinin çeşitli yöntemlerle iyileştirilmesine verilen genel bir isim olup zemin ıslahı olarak da nitelendirilebilir [4]. Zemin iyileştirme yöntemleri Şekil 2'de gösterilmiştir.

Bir yapı altında kalacak olan zemin yumuşak kil, gevşek kum gibi yapı yükünü taşımaya uygun olmayan elverişsiz malzemelerden oluşmuşsa bu elverişsiz malzemenin yerinden kaldırılarak sağlam malzeme ile sıkıştırılmış geri dolgu yapılması veya mevcut zeminde yeraltı suyu drenajı, sıkıştırma veya enjeksiyon ile sertleştirilerek stabil hale getirilmesi zemin iyileştirme yöntemleri olarak sıralanabilir. Yapı altında kalacak olan elverişsiz zeminin iyileştirilmesi yerine elverişsiz zemini geçerek aşağıda bulunan sağlam kayaya kadar inen derin temeller de kullanılabilir. Kazıklı temeller taşıma gücü ve oturma bakımından yapıyı taşımaya elverişsiz zeminler için uygulanmaktadır. Sağlam zemin çok derinde ise taşıma kapasitesini beton kazık ile çevresindeki zemin arasındaki sürtünmeden alan yüzer kazıklar da kullanılabilir.



Şekil 2. Zemin iyileştirme yöntemleri [4]

4 GEBZE ATIKSU ARITMA TESİSİ ALANI İÇİN ZEMİN İYİLEŞTİRME YÖNTEMLERİNİN KARŞILAŞTIRILMASI

4.1 Kazıklı Temeller

Bu çalışma kapsamında zemin mekaniği literatüründe [5] verilen kazık taşıma gücü denklemleri kullanılarak ve her sondaj kuyusunda belirlenen kuyu logları ile zeminin cinsi belirlenmek sureti ile her bir atıksu arıtma tesisi ünitesi için kullanılabilir olan fore kazık adedi ve bu kazıkların emniyetli taşıma kapasitesi belirlenmiştir. Gebze atıksu arıtma tesisi alanında kullanılabilir olan fore kazıkların taşıma kapasitesi için aşağıdaki formüller kullanılmıştır:

$$Q_{sınırlı} = \sum f_s A_1 + f_b A_2 \quad (1)$$

$$Q_{em} = (Q_{sınırlı} \eta) / FS \quad (2)$$

$Q_{sınırlı}$: Kazığın nihai taşıma kapasitesi (kN),
 Q_{em} : Kazığın emniyetli taşıma kapasitesi (kN)
 A_2 : Kazık enkesit alanı (m^2) ($A^2 = \pi D^2 / 4$)
 f_s : Kazık ve zemin arasındaki sürtünme gerilmesi (kPa)
 A_1 : Kazık çevresinin alanı (m^2) $A_1 = \pi DL$
(L:Kazık boyu, D:Kazık çapı)
 f_b : Kazık uç direnci (kPa),
 η : Kazık grup verimi
(Converse-Labarre formülü ile bulunur)
FS: Emniyet katsayısı

Bu çalışmada emniyet katsayısı (FS) 2, kazık grup verimi (η) 0,7, kazık çapı (D) ise 0,8 m alınmıştır. Kazık ve zemin arasındaki sürtünme gerilmesi (f_s) ve kazık uç direnci (f_b) kohezyonlu zeminler için aşağıdaki şekilde bulunabilir:

$$f_s = \alpha c_u \quad (3)$$

c_u : Zeminin konsolidasyonsuz drenajsız kohezyonu (kPa)
 α : Adhezyon katsayısı

$c_u < 25$ kPa için $\alpha = 1$
 $25 < c_u < 90$ kPa için $\alpha = 1 - 0,00615 (c_u - 25)$
 $c_u > 90$ için α interpolasyonla bulunur.

Çizelge 2. c_u değerine karşılık gelen α değeri

c_u	α
90	0,60
100	0,58
150	0,42
200	0,35

$f_b = 9 c_u$ olarak alınabilir [6].

(f_s) kohezyonsuz zeminler için aşağıdaki şekilde hesaplanabilir:

$$f_s = K_s \tan \delta \sigma_v \quad (4)$$

K_s : Yatay zemin basıncı katsayısı (fore kazıklar için 0,5 alınır)

δ : Kazık ve zemin arasındaki sürtünme açısı ($\frac{2}{3} \phi$ alınabilir)

ϕ : İçsel sürtünme açısı (laboratuvar deneyleri ile bulunur)

σ_v : Zemin tabakasının ortasındaki düşey gerilme efektif gerilme

Kazık uç direnci (f_b) ise kohezyonsuz zeminler için aşağıdaki şekilde bulunabilir:

$$f_b = N_q \sigma_v \quad (5)$$

N_q : Taşıma kapasitesi faktörü

N_q Çizelge 3'de ϕ değerine bağlı olarak alınabilir.

Çizelge 3. ϕ değerine bağlı N_q değerleri

ϕ	N_q
20	4
25	5
28	8
30	12
32	17
34	22
36	30
38	40
40	60
42	80
45	115

Çizelge 4'de Gebze Atıksu Arıtma Tesisi zemininin iyileştirmesi amacıyla kullanılabilir olan fore kazık boyu ve adedi ile ilgili bilgiler verilmiştir. kazıklı temeller statik durumda düşey yüklere karşı yeterli taşıma kapasitesine sahiptir. Ancak geçirimsiz bir malzeme olan betondan imal edildikleri için olası bir depremde çevrelerindeki zayıf zeminde meydana gelecek aşırı boşluk suyu basınçlarını tahliye edemeyecekler ve bu tür zeminlerin sıvılaşmasının önüne geçemeyeceklerdir. Çevrelerindeki zeminin sıvılaşması sonucunda ise sürtünme kuvveti ile oluşan yanal desteklerini kaybetmeleri ve kesme kırılmasına uğramaları muhtemeldir. Gebze Atıksu Arıtma Tesisi alanı 1.deprem bölgesi içinde olup Kuzey Anadolu Fayı'ndan etkilenmektedir. Proje sahasının zemin yapısı genellikle kil ve balçık olmakla birlikte yer yer siltli ve ince kumlu seviyeler de mevcuttur. Ayrıca yeraltı suyunun yüzeye yakın olmasından dolayı arıtma tesisi alanında sıvılaşma riski bulunduğu, Çetin ve Moss [6] yöntemiyle yapılan analizlerle ortaya konmuştur. Bu bölgedeki sıvılaşma riski nedeniyle kazıklı temellerin Gebze atıksu arıtma tesisi alanında kullanılmalarının teknik olarak uygun olmadığı düşünülmüştür.

Çizelge 4. Gebze Atıksu Arıtma Tesisi alanına kazıklı temel yapılması ile ilgili teknik bilgiler

Tesisler	Sondaj No	Fore Kazık Adedi	Fore Kazık Emniyetli Taşıma Kapasitesi	Ortalama Derinlik	Toplam Fore Kazık Adedi	Toplam Fore Kazık İmalatı
		(Adet)	(kN)	(m)	(Adet)	(m)
Deniz Deşarjı Pompa İstasyonu (T114)	SK-1	63	448,7	16,5	63	1 040
Son Çökeltme Havuzları (T110-C-D-G-H)	SK-1 ve SK-2	266	485,9	16,8	1 064	17 822
Çamur Susuzlaştırma Ünitesi (B118)	SK-1 ve SK-2	114	485,9	16,8	114	1 910
Son Çökeltme Havuzu Dağıtım Yapısı (T109-B)	SK-2	159	514,9	16,8	159	2 663
Ön Çökeltme Havuzları (T113-A-B-C-D)	SK-3	138	384,0	15,0	552	8 280
Ön Çökeltme Havuzu Dağıtım Yapısı (T112)	SK-3	40	384,0	15,0	40	600
Son Çökeltme Havuzları (T110-A-B-E-F)	SK-4	175	761,1	15,0	700	10 500
Geri Devir Çamur Pompa İstasyonu (T111)	SK-4	41	761,1	19,5	41	800
Son Çökeltme Havuzu Dağıtım Yapısı (T109-A)	SK-4	119	761,1	15,0	119	1 785
Havalandırma Havuzu (T107-E-F-G-H)	SK-5	3 843	515,0	14,0	3 843	53 802
İzgara, Terfi İstasyonu, Kum Tutucu, Debimetre Röganı (T101-102-103-104-105)	SK-6	280	632,2	12,0	280	3 360
Kum Tutucu Blower Binası (B119)	SK-6	40	395,1	7,5	40	300
Havalandırma Havuzu (T107-A-B-C-D)	SK-7	3 558	552,4	14,0	3 558	49 812
İdare Binası (B120)	SK-6 ve SK-7	108	414,6	9,0	108	972
Bekçi Binası (B121)	SK-7	19	355,1	9,0	19	171
Blower Binası (B116)	SK-7	247	355,1	9,0	247	2 223
Trafo ve Jeneratör Binası (B117)	SK-7	62	355,1	9,0	62	558
Anaerobik Havuz (T106-A-B-C)	SK-8	573	475,5	16,0	573	9 168
Toplam					11 582	165 765

4.2 Zayıf Zemini Kaldırıp Sağlam Zemin İle Sıkıştırılmış Geri Dolgu Yapılması

Bu zemin iyileştirme yönteminde üstyapının oturacağı zeminde taşıma gücü zayıf ve konsolide olmamış zemin tamamen kazılmakta ve kazılan zeminin yerine temiz kum ve çakıllı malzeme, belirli bir gradasyonda ve belirli kalınlıklarda serilmekte ve optimum su içeriği sağlanacak şekilde iş makineleri ile sıkıştırılmaktadır. Üst yapı, sağlam zemin dolgusu üzerine oturtularak taşıma gücüne bağlı oturmalar ve sıvılaşma önlenmektedir. Zayıf zeminin kaldırılarak sağlam zemin ile dolgu yapılması yönteminin Gebze Atıksu Arıtma Tesisi Sahasına uygulanabilirliği araştırıldığında 11 ha alan kaplayan proje sahasında 25 m derinliğe kadar uzanan balçık ve killi zayıf zeminin kaldırılması ekonomik ve teknik açıdan çok zordur. Ek olarak Gebze Atıksu Arıtma Tesisi proje alanında yapılan arazi etütlerinde, Gebze Belediyesi'nden edinilen bilgiye göre kum-çakıl malzemenin temin edileceği kum-çakıl ocaklarının proje alanına 118 km uzakta bulunduğu öğrenilmiştir. Zayıf zeminlerin kazılarak sağlam zemin ile geri dolgu yapılması yöntemi, Gebze Atıksu Arıtma Tesisi Alanı'na uygulandığında 118 km uzaktan temin edilecek malzeme, nakliye masraflarının artmasına da sebep olacaktır. Bu yüzden bu yöntemin kullanımı uygun görülmemiştir.

4.3 Kum Drenleri İle Yeraltı Suyu Drenajı veya Ön Yüklemeli Kum Drenleri

Bu yöntemde zemin üzerinde belirli aralıklarla ve belirli bir yerleşim düzeninde belirli çaplarda düşey delgiler açılmakta ve bu delgiler temiz kum ile doldurularak zemindeki boşluk suyu drene edilmektedir. Ön yüklemeli kum drenleri yönteminde ise ön yükleme dolgusu yapılarak kum drenler ile zeminin boşluk suyu tahliye edilmektedir. Her iki yöntemde de zamana bağlı konsolidasyon oturmalarının çabuklaşması ve bu oturmaların inşaat süresi içinde kabul edilebilir makul seviyelere inmesi sağlanmaktadır [7]. Gebze Atıksu Arıtma Tesisi alanında bu yöntemin uygulanabilirliği düşünüldüğünde, 118 km uzaklıktan getirilerek drenlere doldurulacak olan kum malzemenin nakliyesi maliyetlerin artmasına sebep olacaktır. Öte yandan 11 ha'lık büyük alanda ön yükleme dolgusu yapılması inşaat maliyetini arttırdığı gibi boşluk suyunun kum drenlerden boşalarak zeminin konsolide olması için uzun bir bekleme süresini de gerektirecektir. Bununla birlikte bu proje alanında zeminin sadece oturmalara karşı değil stabilite yitimi ve taşıma gücü yetersizliği nedeniyle göçmelere karşı da ıslah edilmesi gerekmektedir. Tüm bu nedenlerden dolayı ön yükleme dolgusu ve kum drenler yardımıyla boşluk suyunun drene edilerek zeminin ıslah edilmesi yönteminin Gebze Atıksu Arıtma Tesisi alanı için uygun bir yöntem olmadığı sonucuna varılmıştır.

4.4 Taş Drenler (Kolonlar)

Taş kolonlar ile zemin ıslahı yönteminde kum drenlerinde olduğu gibi taş kolonlar ile de boşluk suyu drene edilerek zeminde oluşacak oturmalar azaltılmakta; bununla birlikte zeminin taşıma kapasitesi de arttırılmaktadır. Taş kolonlar ile zemin ıslahında oturmalar %50-%60 oranında azaltılabilmektedir. Taş kolonların rijit olmaları sebebiyle üst yapı yüklerinin hemen hemen tamamı temel altındaki taş kolonlar ile taşınmaktadır. Taş kolonların üzerine 0,3 m-1,0 m kalınlığında kum-çakıl serilerek taş kolonlardan yukarıya çıkan boşluk suyu, bu filtre tabakası ile toplanarak inşaat sahasından uzaklaştırılmaktadır. Ayrıca üst yapı yüklerinin, bu şekilde taş kolonlar üzerinde homojen olarak dağıtılması da mümkün olmaktadır [8]. Taş kolon uygulamalarında genellikle 0.6 – 1 m arasında değişen çaplarda taş kolonlar üçgen veya kare yerleşim düzeninde projelendirilmektedir. Drenaj malzemesi olarak dane büyüklüğü 2-10 cm boyutlarında olan temiz çakıl veya kırmataş kullanılmaktadır. Taş kolonların imalatında vibroflotasyon tekniği kullanılır. Bu teknik ile zemin su veya hava ile itilerek sıkıştırılır ve zeminin itilmesi ile oluşturulan kolonlar taş dolgu malzemeleri ile doldurulur. Bu teknik ile taş dolgu imalat süresinin kısaltılması yanında zayıf zeminin yanlara doğru büyük basınç altında sıkıştırılması ile zayıf zemin iyileştirilmektedir. Bu teknikte taş dolgu malzemesinin dren içinde tokmak ile sıkıştırılmasına da gerek kalmamaktadır [9]. Genellikle 1,5-3,5 m aralıklarla yapılan taş kolonlar 25 m kadar derinliğe indirilebilmektedir. Gebze Atıksu Arıtma Tesisi alanında zayıf zemin 5-25 m arasında derinliklere kadar inebildiğinden taş kolon yönteminin bu proje için kullanılması uygun görülmektedir [9]. Taş kolon yöntemi zemindeki boşluk suyunu drene ederek sıvılaşmayı önleyebildiği gibi zeminin taşıma gücünü de arttırmaktadır. Ayrıca taş dolgu malzemesinin Gebze'ye 7 km gibi daha yakın mesafeden temin edilmesi mümkün olduğu için bu yöntem Gebze Atıksu Arıtma Tesisi Alanı için kazıklı temel, zayıf zeminin kaldırılarak yerine sağlam malzemeyle geri dolgu yapılması ve kum drenleri yöntemlerine göre daha uygun bir yöntemdir. Proje alanında zayıf zeminlerin uzandığı derinlikler ve proje ekonomisi dikkate alınarak yapılan hesaplamalar sonucunda 80 cm çapında taş kolonların bu proje için yeterli olduğu sonucuna varılmıştır. Hesaplamalar sonucunda bir taş kolonun emniyetli taşıma gücü (q_{em}) 108 kPa olarak belirlenmiştir. Radye temel ile tolere edilebilecek şekilde zeminde 10 cm oturma olması kabulü yapılarak taş kolonlar projelendirilmiştir.

Gebze Atıksu Arıtma Tesisi Alanı'nın taş kolon yöntemi ile iyileştirilmesi ile ilgili yapılan hesaplamalar sonucunda elde edilen teknik bilgiler Çizelge 5'de verilmiştir. Çizelge 5'e göre Gebze Atıksu Arıtma Tesisi Alanında toplam yaklaşık 299000 m taş kolon imalatının yapılması gerekmektedir.

4.5 Enjeksiyon

Bu çalışmada Gebze Atıksu Arıtma Tesisi zemininin enjeksiyon yöntemiyle iyileştirilmesi de bir alternatif olarak araştırılmıştır. Enjeksiyon, mühendislik çalışmalarında birçok alanda kullanılan bir yöntemdir. Kayalarda, beton yüzeylerde ve yol kaplamalarında oluşan çatlakların kapatılması ve taşıma gücünün arttırılması için zemine dolgu maddesi enjekte edilmektedir.

Zayıf zeminlerin taşıma güçlerinin arttırılması için, yeraltı suyu seviyesinin yeryüzüne yakın olduğu yerlerde, yeraltı suyunun yüzeye sızmasını önlemek için enjeksiyon yapılarak ortamdaki boşluklar doldurulur. Kazı yapılan alanlarda da şev duraylılığının sağlanması, kazı sonrası zeminde çökme veya kayma olmaması için de enjeksiyon yapılmaktadır [10]. Örnek olarak çatlaklı bir kayadaki çatlakları doldurmak için su-çimento karışımı kullanılabilirken ince daneli zeminlerdeki boşlukların doldurulmasında, çimento daneleri zemin danelerinden büyük olduğu için boşluklar tam olarak doldurulamaz, bu tip zeminler için katı madde içermeyen, tamamen sıvı kimyasal enjeksiyon maddeleri kullanılmaktadır. Sodyum silikat kimyasal enjeksiyon maddelerine örnek verilebilir [11]. Çimento, bentonit kili, akrilamid, sodyum silikat ve uçucu kül enjeksiyon dolgu malzemesi olarak kullanılmaktadır. Türkiye'de enjeksiyon uygulamalarında genellikle çimento ve bentonit kili enjeksiyon malzemesi olarak kullanılmaktadır. Kimyasal enjeksiyon maddeleri yüksek maliyetleri nedeniyle Türkiye'de tercih edilmemektedir. Dört farklı yöntemle enjeksiyon uygulaması yapılmaktadır. Bunlar; emdirme (permeasyon), sıkıştırma (kompaksiyon), çatlatma ve jet enjeksiyonlarıdır.

Çizelge 5. 80 cm çaplı taş kolon imalatı ile ilgili teknik bilgiler

Tesisler	Sondaj No	Yapı Altında İyileştirilecek Alan	Taş Kolon Aralığı	Taş Kolon Adedi	Taş Kolon Emniyetli Taşınma Kapasitesi	Taş Kolon Derinlikleri	Ortalama Taş Kolon Derinliği	Toplam Taş Kolon Adedi	Toplam Taş Kolon İmalatı	Alan Değişim Oranı	Zemin Emniyet Gerilmesi	Yaklaşık/Tahmini Proje Gerilmesi
		(m ²)	(m)	(Adet)	(kN)	(m)	(m)	(Adet)	(m)	-	(kPa)	(kPa)
Deniz Deşarjı Pompa İstasyonu (T114)	SK-1	225	1,80	81	350,9	16,5	16,5	81	1 337	0,15	126,3	60,0
Son Çökeltme Havuzları (T110-C-D-G-H)	SK-1 ve SK-2	1 162	1,95	314	411,9	13,5-20,0	16,8	1 256	21 036	0,13	111,3	48,5
Çamur Susuzlaştırma Ünitesi (B118)	SK-1 ve SK-2	507	1,95	135	411,9	13,5-20,0	16,8	135	2 261	0,13	109,6	60,0
Su Deposu (T116)	SK-2	152	2,25	36	548,3	13,5-20,0	16,8	36	603	0,13	129,8	48,5
Son Çökeltme Havuzu Dağıtım Yapısı (T109-B)	SK-2	697	2,25	149	548,3	13,5-20,0	16,8	149	2 496	0,10	117,2	48,5
Ön Çökeltme Havuzları (T113-A-B-C-D)	SK-3	435	1,95	129	411,9	10,0-20,0	15,0	516	7 740	0,13	122,3	43,4
Ön Çökeltme Havuzu Dağıtım Yapısı (T112)	SK-3	137	1,95	37	411,9	10,0-20,0	15,0	37	555	0,13	111,3	43,4
Son Çökeltme Havuzları (T110-A-B-E-F)	SK-4	1 162	1,35	673	197,4	10,5-19,5	15,0	2 692	40 360	0,28	114,3	48,5
Geri Devir Çamur Pompa İstasyonu (T111)	SK-4	266	1,35	160	197,4	19,5	19,5	160	3 120	0,28	118,7	60,0
Son Çökeltme Havuzu Dağıtım Yapısı (T109-A)	SK-4	697	1,35	459	197,4	10,5-19,5	15,0	459	6 885	0,28	130,0	48,5
Havalandırma Havuzu (T107-E-F-G-H)	SK-5	18 070	1,50	8 121	243,7	9,0-19,0	14,0	8 121	113 694	0,22	109,5	55,3
İzgara, Terfi İstasyonu, Kum Tutucu, Debimetre Rögarı (T101-102-103-104-105)	SK-6	1 531	1,80	504	350,9	6,0-18,0	12,0	504	6 048	0,15	115,5	65,0
Kum Tutucu Blower Binası (B119)	SK-6	109	1,80	45	350,9	7,5	7,5	45	338	0,15	145,5	60,0
Havalandırma Havuzu (T107-A-B-C-D)	SK-7	18 070	1,85	5 302	370,7	8,0-20,0	14,0	5 302	74 228	0,15	108,8	55,3
İdare Binası (B120)	SK-6 ve SK-7	395	2,05	98	455,2	9,0	9,0	98	882	0,12	113,1	60,0
Bekçi Binası (B121)	SK-7	30	2,25	12	548,3	9,0	9,0	12	108	0,10	219,3	60,0
Blower Binası (B116)	SK-7	785	2,25	160	548,3	9,0	9,0	160	1 440	0,10	111,8	60,0
Trafo ve Jeneratör Binası (B117)	SK-7	193	2,25	40	548,3	9,0	9,0	40	360	0,10	113,9	60,0
Anaerobik Havuz (T106-A-B-C)	SK-8	2 408	1,60	982	277,3	11,0-21,0	16,0	982	15 712	0,20	113,1	58,8
Toplam								20 785	299 224			

Emdirme yönteminde düşük viskoziteli enjeksiyon maddesi düşük basınç altında zemine pompalanır, enjeksiyon maddesi zamanla sertleşerek zeminin mekanik ve hidrojeolojik özelliklerini değiştirir. Süspansiyon şeklindeki çimento şerbeti yada saf kimyasal enjeksiyon maddeleri bu tür enjeksiyon yönteminde kullanılmaktadır. Sıkıştırma (kompaksiyon) enjeksiyon yöntemi zayıf veya yumuşak zeminlerin sıkıştırılmasında kullanılır. Bu yöntemde çok katı enjeksiyon maddesi yüksek basınç altında (basınç 3,5 MPa'a kadar) zemine pompalanır. Çatlatma yönteminde zemine düşük viskoziteli enjeksiyon maddesi çok yüksek basınç (4 MPa) ile zemine verilir, bu yöntem ince daneli zeminlerde kullanılır. Jet enjeksiyonunda ise tasarım derinliğine kadar su kullanılarak delgi yapılmakta, zeminin delinmesinden sonra delgi aracı olarak kullanılan delici sondaj ucunun çok ince deliklerinden (nozül) çimento şerbeti yüksek basınç altında zemine gönderilmektedir [12]. Gebze Atıksu Arıtma Tesisi proje alanındaki zeminin iyileştirilmesi için alternatif olarak jet enjeksiyon yönteminin de uygulanabileceği düşünülmektedir. Her iki yöntemin ekonomik mukayesesinin yapılabilmesi için jet enjeksiyon ile oluşturulacak enjeksiyon kolonlarının çapı da taş kolonlarda olduğu gibi 80 cm alınmıştır. İmalat kolaylığı açısından ve zemin yüksek kil içeriği nedeniyle jet enjeksiyonun, emdirme (permeasyon), sıkıştırma (kompaksiyon), ve çatlatma enjeksiyon türlerine göre daha iyi bir yöntem olduğu düşünülmüştür. Jet enjeksiyon kolonlarının da taş kolonlarda olduğu gibi sıvılaşma riski olan zayıf zeminin yüzeyden olan derinliğine kadar indirilmesi gerekmektedir.

Taş kolon yönteminde olduğu gibi jet enjeksiyon imalatının tamamlanmasından sonra iyileştirilmiş zemin temel taban kotuna kadar kazılacak ve jet enjeksiyon kolonlarının üzerine radye temel inşa edilecektir. Zemin mekaniği literatüründe verilen denklemler [13] kullanılarak yapılan hesaplamalar sonucu elde edilen jet enjeksiyon (jet grout) ile ilgili teknik bilgiler Çizelge 6'da sunulmuştur. Hesaplamalar sonucunda Gebze Atıksu Arıtma Tesisi alanı için toplam yaklaşık 291500 m jet enjeksiyon kolonu imalatının yapılması gerekmektedir.

5 TAŞ KOLON VE JET ENJEKSİYON YÖNTEMLERİNİN EKONOMİK ANALİZİ

5.1 Taş Kolon Yönteminin Ekonomik Analizi

Taş kolon yönteminin imalatında kullanılacak olan ocak taşı, su ve çakılın nakliye mesafeleri Gebze Belediyesi'nden temin edilmiştir. Belediye'den alınan bilgiye göre kum-çakıl malzeme 118 km mesafedeki ocağın, ocak taşı da 7 km mesafeden alınacak, imalat aşamasında kullanılacak olan su 1 km mesafedeki şehir şebekesinden alınacaktır. Buna göre taş kolon yönteminin imalatı için hazırlanan keşif özeti Çizelge 7'de verilmiştir. Çizelge 7'ye göre taş kolon yönteminin imalat maliyeti 2011 yılı birim fiyatları ile 18 921 590 TL olmaktadır.

Çizelge 6. 80 cm çapında jet enjeksiyon kolonları ile ilgili teknik bilgiler

Tesisler	Sondaj No	Jet Grout Aralığı	Jet Grout Adedi	Jet Grout Derinlikleri	Ortalama Jet Grout Derinliği	Toplam Jet Grout Adedi	Toplam Jet Grout İmalatı
		(m)	(Adet)	(m)	(m)	(Adet)	(m)
Deniz Deşarjı Pompa İstasyonu (T114)	SK-1	1,90	64	16,5	16,5	64	1 056
Son Çökeltme Havuzları (T110-C-D-G-H)	SK-1 ve SK-2	1,50	533	13,5-20,0	16,8	2 132	35 711
Çamur Susuzlaştırma Ünitesi (B118)	SK-1 ve SK-2	1,50	228	13,5-20,0	16,8	228	3 819
Son Çökeltme Havuzu Dağıtım Yapısı (T109-B)	SK-2	1,50	326	13,5-20,0	16,8	326	5 461
Su Deposu (T116)	SK-2	1,50	72	13,5-20,0	16,8	72	1 206
Ön Çökeltme Havuzları (T113-A-B-C-D)	SK-3	2,70	69	20,0	20,0	276	5 520
Ön Çökeltme Havuzu Dağıtım Yapısı (T112)	SK-3	2,70	21	20,0	20,0	21	420
Son Çökeltme Havuzları (T110-A-B-E-F)	SK-4	1,65	419	10,5-19,5	15,0	1 676	25 140
Geri Devir Çamur Pompa İstasyonu (T111)	SK-4	1,65	104	19,5	19,5	104	2 028
Son Çökeltme Havuzu Dağıtım Yapısı (T109-A)	SK-4	1,65	286	10,5-19,5	15,0	286	4 290
Havalandırma Havuzu (T107-E-F-G-H)	SK-5	1,70	6 264	9,0-19,0	14,0	6 264	87 696
İzgara, Terfi İstasyonu, Kum Tutucu, Debimetre Röganı (T101-102-103-104-105)	SK-6	2,25	337	6,0-18,0	12,0	337	4 044
Kum Tutucu Blower Binası (B119)	SK-6	2,25	28	7,5	7,5	28	210
Havalandırma Havuzu (T107-A-B-C-D)	SK-7	1,65	6 653	8,0-20,0	14,0	6 653	93 142
İdare Binası (B120)	SK-6 ve SK-7	1,65	153	9,0	9,0	153	1 377
Bekçi Binası (B121)	SK-7	1,65	25	9,0	9,0	25	225
Blower Binası (B116)	SK-7	1,65	336	9,0	9,0	336	3 024
Trafo ve Jeneratör Binası (B117)	SK-7	1,65	77	9,0	9,0	77	693
Anaerobik Havuz (T106-A-B-C)	SK-8	1,55	1 024	11,0-21,0	16,0	1 024	16 384
Toplam						20 082	291 446

Çizelge 7. Taş kolon yöntemi ile ilgili ekonomik analiz

Gebze Atıksu Arıtma Tesisi Zemin İyileştirme Projesi					
Taş Kolon Yapılması Keşif Özeti					
DSİ/BB Birim fiyatları (TL) : 2011					
Poz. No.	Açıklama	Birim	Miktar	Birim Fiyat	Tutar
	TAŞ KOLON İMALATI				
Faturadan	Taş kolon delgisinin açılması ve malzeme yerleştirilmesi	m	299.224	45,00	13.465.080
	TAŞ KOLON İMALATI TOPLAMI				13.465.080
	MALZEME				
04.005/2	Kırmataş	m³	149.612	20,65	3.089.488
04.031	Su	m³	149.612	4,58	685.223
15.140/4	Makine ile tuvenan kum-çakıl temin edilip, serme, sulama ve sıkıştırma yapılması	m³	27.650	4,75	131.338
04.290/5B	Ø200 mm PVC drenaj borusu	m	5.000	7,41	37.050
	MALZEME TOPLAMI				3.943.098
	TAŞIMALAR				
B-07.D/3		m³	149.612	6,74	1.007.637
B-07.D/3		m³	149.612	2,55	380.852
B-07.D/3		m³	27.650	4,52	124.923
	TAŞIMALAR TOPLAMI				1.513.412
	GENEL TOPLAM				18.921.590
		7 km		Ocak taşı	
		1 km		Su	
		118 km		Kum-çakıl malzeme	

5.2 Jet Enjeksiyon Yönteminin Ekonomik Analizi

Jet enjeksiyonla enjeksiyon kolonlarının oluşturulması yönteminde 1 m³ imalat için 400 kg çimento kullanıldığı ve inşaat suyunun 1 km uzaklıktaki şehir şebekesinden temin edileceği kabul edilmiştir. Gebze Belediyesi'nde alınan

bilgiye göre enjeksiyonda kullanılacak çimentonun 7 km mesafedeki fabrikadan temin edileceği öğrenilmiştir. Buna göre jet enjeksiyon yönteminin imalatı için hazırlanan keşif özeti Çizelge 8'de verilmiştir. Çizelge 8'e göre jet enjeksiyon yönteminin maliyeti 2011 yılı birim fiyatları ile 20 126 911 TL olmaktadır.

Çizelge 8. Jet enjeksiyon yöntemi ile ilgili ekonomik analiz

Gebze Atıksu Arıtma Tesisi Zemin İyileştirme Projesi					
Jet Grout Yapılması Keşif Özeti					
Piyasa ve DSİ/BB birim fiyatları (TL) 2011					
Poz. No.	Açıklama	Birim	Miktar	Birim Fiyat	Tutar
	JET GROUT İMALATI				
Piyasadan	80 cm çapında jet grout delgisinin açılması ve kolonunun	m	291.446	45,00	13.115.070
	JET GROUT İMALATI TOPLAMI				13.115.070
	MALZEME				
04.008	Portland Çimentosu	ton	58.289	110,35	6.432.213
	MALZEME TOPLAMI				6.432.213
	TAŞIMALAR				
07.006/19	Çimento (f = 7,0 km)	ton	58.289	3,58	208.675
B-07.D/3	Su (f = 1,0 km)	m ³	145.723	2,55	370.952
	TAŞIMALAR TOPLAMI				579.628
	GENEL TOPLAM				20.126.911
		7 km	Çimento		
		1 km	Su		

6 SONUÇLAR

Bu çalışma kapsamında Gebze Atıksu Arıtma Tesisi alanında zemin iyileştirme yöntemleri teknik ve ekonomik olarak araştırılmıştır. 11 hektar büyüklüğünde olan Gebze Atıksu Arıtma Tesisi alanında 2007 yılında yapılan jeoteknik etütler sonucunda arazinin kazı klas değeri %100 toprak olarak belirlenmiş, sondajlarda 1 m ile 4,6 m arasında değişen derinliklerde yeraltı suyuna rastlanmıştır. Zemin yer yer yumuşak kil (balçık), katı killi kum ve kumlu kil aralanmasından oluşmaktadır. Atıksu arıtma tesisi ünitelerinin tasarım gerilmeleri 0,5-1,0 kg/cm² arasında olmalıdır ancak sondaj kuyularından alınan zemin örneklerine yapılan laboratuvar deneyleri sonucunda zeminin emniyetli taşıma gücünün 0,02 kg/cm² ile 0,48 kg/cm² değerleri arasında olduğu belirlenmiştir. Bu zeminin taşıma gücünün zayıf olması yanında zemin iyileştirilmesi yapılmaması durumunda oturma problemleri de kaçınılmazdır. Proje alanında zemin iyileştirme

çalışmaları yapılmaması durumu için oturma analizlerinde 12,3 ile 29,1 cm arasında değişen oturma miktarları tespit edilmiştir. Teknik araştırmalar ve hesaplamalar sonucunda Gebze Atıksu Arıtma Tesisi proje alanındaki zeminin iyileştirilmesi için taş kolon veya jet enjeksiyon (jet grout) yöntemlerinin kullanılmasının uygun olacağı sonucuna varılmıştır. Her iki yöntemde de imal edilecek taş kolon ve enjeksiyon kolonu çapları 80 cm olarak projelendirilmiştir. Ayrıca hesaplamalar zemin oturmaları radye temel ile tolere edilebilecek şekilde maksimum 10 cm olacak şekilde yapılmıştır. Her iki yöntem de zayıf zeminin taşıma gücünü arttırmakta ve sıvılaşma riskini ortadan kaldırmaktadır.

Ekonomik olarak ise 2011 yılı birim fiyatlarına göre taş kolon veya jet enjeksiyon imalat incelendiğinde ise taş kolon yönteminin jet enjeksiyona göre daha ucuz bir yöntem olduğu belirlenmiştir.

7 TEŞEKKÜR

Yazarlar Jeoloji Yüksek Mühendisleri Y.Doç.Dr. Sayın Mutluhan Akın'a, Dr.Aykan Mert'e ve Şenol Çömez'e bu makalenin yazımı sırasında bizimle paylaştığı değerli görüşlerinden dolayı teşekkür ederler.

8 SEMBOLLER

- q_{ult} : Kazığın nihai taşıma kapasitesi (kN)
 A_2 : Kazık enkesit alanı (m^2)
 f_s : Kazık ve zemin arasındaki sürtünme gerilmesi (kPa)
 A_1 : Kazık çevresinin alanı (m^2)
 f_b : Kazık uç direnci (kPa)
 q_{all} : Emniyetli taşıma kapasitesi (kN)
 η : Kazık grup verimi,
 FS : Emniyet katsayısı
 K_s : Yatay zemin basıncı katsayısı
 δ : Kazık ve zemin arasındaki sürtünme açısı
 \emptyset : İçsel sürtünme açısı (laboratuvar deneyleri ile bulunur)
 σ_v : Zemin tabakasının ortasındaki düşey gerilme efektif gerilme
 N_q : Taşıma kapasitesi faktörü

9 KAYNAKLAR

- [1] Kibaroğlu, A., Doğan, M., Aker, S., Damar, H., "Gebze Atıksu Arıtma Tesisi Kesin Projesi Jeoteknik Raporu", Petra Müh. Ankara, 2007.
- [2] Şahin, M., "Gebze Atıksu Arıtma Tesisi Kesin Projesi Zemin İyileştirme Raporu", Dolsar Mühendislik Ltd. Şti. Ankara, 2008.
- [3] Abdüselamoğlu, Ş., "Kocaeli Yarımadasının Jeolojisi", MTA Raporu, 1963.
- [4] Uzuner, B.A., "Temel Mühendisliğine Giriş", Derya Kitabevi, Trabzon, 1995.
- [5] Bowles, J. E., "Foundation Analysis and Design", A.B.D., 1997.
- [6] Seed, R.B., Çetin, K.O., "Recent Advances In Soil Liquefaction Engineering And Seismic Site Response Evaluation", University of Berkeley, A.B.D., 2000.
- [7] Ergun, M.U., "Ground Improvement Techniques Lecture Notes", METU, 2003.
- [8] Nalçakan M.S., "Problemler Zeminlerde Geoteknik Çözümler", İMO TMH Dergisi, Geoteknik 1, Sayı:430, Ankara, 2004.
- [9] Özkeskin, A., Settlement Reduction And Stress Concentration Factors In Rammed Aggregate Piers Determined From Full Scale Load Tests, Ph.D. Thesis, METU, 2004.
- [10] Yıldız, F.E., Özdemir, O.N., Ger, M., Mert, A., Çömez, Ş., Silikatlı Enjeksiyon Maddelerinin Yeraltı Suyu İle Birlikte Zemin İçindeki Hareketi İçin Bir Model, 3. Ulusal Su Mühendisliği Sempozyumu, İzmir, 2007.
- [11] Littlejohn, G.S., Chemical grouting 1, Ground Engineering, p 13-22, 1985.
- [12] Tunçdemir, F., Temel Zeminlerinin Enjeksiyon Tekniği ile İyileştirilmesi, İMO TMH Dergisi, Geoteknik 1, Sayı:430, s 59-64, 2004.
- [13] Durgunoğlu H. T., Yüksek Modüllü Kolonların Temel Mühendisliğinde Kullanımı, İMO TMH Dergisi, Geoteknik 2, Sayı:431, 2004.