

**SU KİMYASININ KİLLERİN DİSPERSİVİTESİ ÜZERİNDEKİ  
ETKİSİNİN ARAŞTIRILMASI VE DİSPERSİVİTENİN  
KESTİRİMİ İÇİN AMPİRİK İLİŞKİLERİN GELİŞTİRİLMESİ**

**INVESTIGATION OF EFFECT OF WATER CHEMISTRY ON  
CLAY DISPERSIVIT AND DEVELOPING EMPIRICAL  
RELATION FOR PREDICTION OF DISPERSIVITY**

**AYŞEGÜL TURGUT**

**Prof. Dr. K.ERÇİN KASAPOĞLU**

**Tez Danışmanı**

**Doç. Dr. NİHAT SİNAN IŞIK**

**İkinci Tez Danışmanı**

Hacettepe Üniversitesi

Lisansüstü Eğitim-Öğretim Sınav Yönetmeliğinin

Jeoloji Mühendisliği Anabilim Dalı İçin Öngördüğü

**DOKTORA TEZİ**

olarak hazırlanmıştır.

2013

# ETİK

Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- tez içindeki bütün bilgi ve belgeleri akademik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- görsel, işitsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçları bilimsel ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda ilgili eserlere bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunduğumu,
- atıfta bulunduğum eserlerin tümünü kaynak olarak gösterdiğimi,
- kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- ve bu tezin herhangi bir bölümünü bu üniversite veya başka bir üniversitede başka bir tez çalışması olarak sunmadığımı

beyan ederim.

**03 /07 / 2013**

**Ayşegül Turgut**

## ÖZET

# SU KİMYASININ KİLLERİN DİSPERSİVİTESİ ÜZERİNDEKİ ETKİSİNİN ARAŞTIRILMASI VE DİSPERSİVİTENİN KESTİRİMİ İÇİN AMPİRİK İLİŞKİLERİN GELİŞTİRİLMESİ

**AYŞEGÜL TURGUT**

**Doktora, Jeoloji Mühendisliği Bölümü**

**Tez Danışmanı: Prof. Dr. K. Erçin Kasapoğlu**

**İkinci Tez Danışmanı: Doç. Dr. Nihat Sinan Işık**

**Temmuz 2013, 113 sayfa**

Bu çalışma, killerde dispersivitenin tanımlanmasında farklı yöntemlerin araştırılması, su kimyasının dispersivite üzerindeki etkisinin ortaya konulması ve dispersivitenin kestirimine yönelik bazı yaklaşımların geliştirilmesi amacıyla yapılmıştır. Bu kapsamda; Ankara ve çevresindeki yer alan beş farklı lokasyondan derlenmiş yirmi dokuz adet örneğin fiziksel ve indeks özellikleri ile dispersivite dereceleri belirlenmiş, farklı toplam çözünmüş tuzlar değerine (TDS) sahip çözeltiler kullanılarak dağılma ve iğne deliği deneyleri yapılmış ve ağırlıklı puanlandırma yöntemiyle belirlenen dispersivite sınıflarının kestirimi için bazı istatistiksel modelleme yöntemleri kullanılmıştır. Bu çalışmalar sonucunda, killerin dispersivitesinin belirlenmesine yönelik belirsizliklerin giderilmesi ve tüm fiziksel ve kimyasal dispersivite deney yöntemlerinden elde edilen sonuçların birlikte ele alınarak daha güvenilir sonuçlara ulaşılması konusunda katkılar sağlanabileceği görülmüştür. Su kimyasının dispersivite üzerindeki etkisinin belirlenebilmesi amacıyla farklı TDS değerine sahip çözeltiler kullanılarak dağılma ve iğne deliği deneyleri yapılmış olup, sodyum yüzdesine bağlı olarak değişen TDS değerinin dispersivite sınıfını değiştirdiği saptanmıştır. Bunun yanı sıra, aynı kil örneği

üzerinde saf su kullanılarak gerçekleştirilen fiziksel ve kimyasal dispersivite deneylerinden elde edilen dispersivite sınıflarının farklılık gösterdiği belirlenmiştir. Bu farklılığın giderilip en güvenilir dispersivite sınıfının kestirilebilmesi amacıyla, tüm fiziksel ve kimyasal deneylerden belirlenen dispersivite sınıfları ağırlıklı puanlandırma sistemiyle değerlendirilmiş ve tüm örnekler için yeni dispersivite sınıfları elde edilmiştir. Çalışma kapsamında incelenen killerin boşluk suyu kimyasına ait sayısal parametreler kullanılarak dispersivite sınıflarının kestirimine yönelik istatistiksel modeller oluşturulmuştur. Bu amaçla karar ağacı, lojistik regresyon ve yapay sinir ağları gibi istatistiksel ve esnek hesaplama teknikleri kullanılmış olup, kestirim performansı yüksek tahminler yapılmıştır. İstatistiksel çözümler sonucunda, TDS ve sodyum yüzdesinin dispersivite derecesini büyük ölçüde etkilediği ve bu iki parametrenin dispersivitenin kestiriminde güvenilir sonuçlar verdiği anlaşılmıştır. Ayrıca; hem kestirim modelleri, hem de fiziksel ve kimyasal dispersivite deney sonuçları birlikte değerlendirilerek, dispersivitenin kestiriminde izlenecek aşamaları gösteren bir akım şeması önerilmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Dispersivite, kil, toplam çözünmüş tuz miktarı, sodyum yüzdesi, su kimyası, kestirim modelleri.

## **ABSTRACT**

### **INVESTIGATION OF EFFECT OF WATER CHEMISTRY ON CLAY DISPERSIVITY AND DEVELOPING EMPIRICAL RELATION FOR PREDICTION OF DISPERSIVITY**

**AYŞEGÜL TURGUT**

**Doctor of Philosophy, Department of Geological Engineering**

**Supervisor: Prof. Dr. K. Erçin KASAPOĞLU**

**Co-supervisor: Doç. Dr. Nihat Sinan IŞIK**

**July 2013, 113 pages**

This study aims to investigate the various factors used for definition of dispersivity, effects of water chemistry on dispersivity and also to develop some new approaches for prediction of dispersivity of clays. To achieve this purpose physical and index properties as well as degree of dispersivity of twenty nine clay sample taken from five different location in and around the city of Ankara were determined, crumb and pinhole tests were performed to asses effect of water chemistry on dispersivity and some statistical prediction models were used for prediction of new dispersivity classes obtained by weighting ranking method. It was thought that based on the results obtained from these tests some contribution to both determination of dispersivity and achivement of more reliable results would be provided. In order to determine the effect of water chemistry on dispersivity crumb and pinhole tests were performed by using solutions with different total dissolved salts values (TDS). The all test results showed that TDS values and sodium percentage of the water can change the degree of dispersivity. In addition, it is determined that dispersivity classes obtained from physical and chemical dispersivity tests performed on the same clay samples using distilled water are different from each other. To eliminate

these differences and to predict the most reliable dispersivity class, all dispersivity values obtained from whole physical and chemical dispersivity tests were reevaluated by weight- ranking system and new dispersivity classes were determined. In order to determine the dispersivity classes some statistical models were established by using numerical variables obtained from chemical analysis of pore water and physical property tests performed on clay samples. For this purpose, some prediction models and soft computing methods such as decision tree, logistic regression and artificial neural networks were used and a more reliable prediction models for high performance dispersivity prediction were suggested from the statistical analyses. It is concluded by that TDS values and sodium percentage remarkably effect the degree of dispersivity and the use of these two parameters gives more reliable results for determining dispersivity. Also, a follow chart showing the steps to be followed for predicting dispersivity by using prediction models and physical and chemical dispersivity test results is suggested.

**Key words:** Dispersivity, clay, TDS, sodium percentage, water chemistry, prediction models.

## TEŞEKKÜR

Tez çalışmamın her aşamasında bilgi ve tecrübelerinden yararlandığım, bilimsel katkı, öneri ve desteğini esirgemeyen değerli hocam ve tez danışmanım Prof. Dr. K. Erçin KASAPOĞLU'na,

Tez çalışmam boyunca değerli görüşlerinden yararlandığım tezimin şekillenmesinde büyük emeği olan ikinci tez danışmanım Doç. Dr. Nihat Sinan IŞIK'a,

Tez izleme komitesinde yer alan ve bu çalışmanın gelişimi ve derinleştirilmesi ile ilgili olarak görüş ve önerilerinden yararlandığım TİK üyeleri Prof. Dr. Erdal ÇOKÇA ve Prof. Dr. Reşat ULUSAY'a,

İstatistiksel çözümlenelerde destek aldığım Hacettepe Üniversitesi Biyoistatistik Bölümü'nden Araş. Gör. Erdal COŞGUN'a,

Öneri ve eleştirilerinden yararlandığım jüri üyeleri Prof. Dr. Harun SÖNMEZ ve Doç. Dr. Mustafa ÖZER'e,

012D06602001 numaralı Proje kapsamında gerçekleştirilen bu çalışma için maddi destek sağlayan Hacettepe Üniversitesi Bilimsel Araştırmalar Birimi'ne,

Saha ve laboratuvar çalışmalarındaki yoğun emek ve yardımlarından dolayı Hacettepe Üniversitesi Jeoloji Mühendisliği Bölümü Mühendislik Jeolojisi Laboratuvarı teknisyenleri Ahmet BAY ve Özgür EROL'a,

Tez çalışmam boyunca ilgi ve desteğini esirgemeyen çalışmamın her aşamasında bana yardımcı olan değerli dostum ve çalışma arkadaşım Dr. Elif AVŞAR'a,

Ayrıca tez çalışmam boyunca göstermiş oldukları maddi ve manevi her türlü destek, yoğun ilgi ve tükenmeyen sabırlarından dolayı AİLEM'e,

İÇTEN TEŞEKKÜRLERİMİ SUNARIM.

# İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖZET .....	i
ABSTRACT .....	iii
TEŞEKKÜR.....	v
İÇİNDEKİLER.....	vii
SİMGELER VE KISALTMALAR .....	x
1. GİRİŞ.....	1
1.1. Amaç ve Kapsam .....	1
1.2. Önceki Çalışmalar .....	5
2. DISPERSİF ZEMİNLER VE MÜHENDİSLİK AÇISINDAN ÖNEMİ .....	16
2.1. Killerin Dispersivitesi .....	16
2.2. Dispersiviteyi Etkileyen Faktörler.....	17
2.2.1. Kil Yüzdesi.....	18
2.2.2. Boşluk Suyundaki Çözünmüş Tuzlar .....	18
2.2.3. Kil Minerallerinin Türü .....	18
2.2.4. Atterberg Limitleri ve İndeks Özellikler .....	19
2.3. Dispersif Killerin Tanımlanması .....	21
2.3.1. Saha Tanımlamaları .....	21
2.3.2. Laboratuvar Deneyleri .....	22
2.3.2.1. Fiziksel Deneyler .....	22
2.3.2.1.1. Çift Hidrometre Deneyi .....	22
2.3.2.1.2. Dağılma Deneyi .....	24
2.3.2.1.3. İğne Deliği Deneyi .....	26
2.3.2.2. Kimyasal Deneyler .....	28
2.4. Dispersif Zeminlerin Mühendislik Açısından Değerlendirilmesi .....	31
3. KİLLERİN İNDEKS VE DISPERSİF ÖZELLİKLERİ .....	36

3.1. Örnekleme.....	36
3.2. Fiziksel Özellikler ve İndeks Deneyler .....	38
3.3. Kompaksiyon Deneyleri.....	41
3.4. Dispersivite Deneyleri.....	42
3.4.1. Fiziksel Dispersivite Deneyleri.....	43
3.4.1.1. Çift Hidrometre Deneyi .....	43
3.4.1.2. Dağılma Deneyi .....	43
3.4.1.3. İğne Deliği Deneyi .....	43
3.4.2. Kimyasal Dispersivite Deneyleri .....	46
3.5. Mineralojik Çözümlenmeler .....	51
4. DİSPERSİVİTE DENEY SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ.....	54
4.1. Fiziksel Deneyler .....	54
4.2. Kimyasal Deneyler .....	59
4.3. Mineralojinin Dispersiviteye Etkisi .....	60
5. SU KİMYASININ DİSPERSİVİTE ÜZERİNDEKİ ETKİSİ .....	63
5.1. Su Kimyası Değiştirilerek Yapılan Dağılma Deneyleri .....	63
5.2. Su Kimyası Değiştirilerek Yapılan İğne Deliği Deneyleri .....	67
5.3. Değerlendirme.....	70
6. DİSPERSİVİTENİN KESTİRİMİ .....	73
6.1. Killerin Dispersivitesinin Puanlandırma Sistemi Kullanılarak Yeniden Sınıflandırılması .....	73
6.2. Dispersivitenin Karar Ağacı Modeliyle Kestirimi .....	75
6.3. Dispersivitenin Lojistik Regresyon Modeliyle Kestirimi .....	83
6.4. Dispersivitenin Yapay Sinir Ağları Kullanılarak Kestirimi .....	88
6.5. Dispersivitenin Kestirimi İçin Önerilen Modellerin Karşılaştırılması .....	91
6.6. Tartışma .....	94
7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER .....	96

KAYNAKLAR.....	99
ÖZGEÇMİŞ .....	109
EKLER .....	111
EK 1. Lojistik Regresyon Ve Karar Ağacı Modellerine Ait Uygulama Örneği.....	111

## SİMGELER VE KISALTMALAR

### Simgeler

w (%)	Su içeriği
$\gamma$ (N/m <sup>3</sup> )	Birim hacim ağırlık

### Kısaltmalar

A	Aktivite
A	Dispersif zemin
A	Mekanik karıştırma ve dispersan madde kullanmadan 0,005 mm tane boyundan küçük tanelerin yüzdesi
ASTM	Amerikan Test ve Malzemeler Derneği
B	Dispersif değil
B	Mekanik karıştırma ve dispersan madde kullanılarak 0,005 mm tane boyundan küçük tanelerin yüzdesi
C	Ara zemin
CaCl <sub>2</sub>	Kalsiyum klorür
CEC	Katyon değişim kapasitesi
D <sub>15</sub>	Tane boyu dağılımı eğrisinde % 15'den büyük tane boyları
d <sub>85</sub>	Tane boyu dağılımı eğrisinde % 85'den küçük tane boyları
D1	Dispersif zemin
D2	Dispersif zemin
DSİ	Devlet Su İşleri
DY	Dispersiyon yüzdesi
ESP	Değişebilir sodyum yüzdesi
EC	Elektriksel iletkenlik

HD	Yüksek dispersif
I	Ara zemin
K1	Dispersif değil
K2	Orta derecede dispersif
K3	Dispersif
K4	Yüksek dispersif
KCL	Potasyum klorür
LL	Likit limit
MgSO <sub>4</sub>	Magnezyum sülfat
meq/l	milliequivalent/l
Na	Sodyum
NaCl	Sodyum klorür
NaOH	Sodyum hidroksit
ND	Dispersif değil
ND1	Dispersif değil
ND2	Dispersif değil
ND3	Orta derece dispersif
ND4	Orta derece dispersif
PI	Plastisite indeksi
PL	Plastik limit
SAR	Sodyum adsorbsiyon oranı
SL	Büzülme limiti

SP	Şişen zemin
SY	Sodyum yüzdesi
TDS	Toplam çözünmüş tuzlar değeri
USBR	United States Bureau of Reclamation

# 1. GİRİŞ

## 1.1. Amaç ve Kapsam

Geçmişte killi zeminlerin erozyona karşı dayanıklı olduğu bilinirken, son yıllarda doğada aşırı derecede erozyona uğrayabilen killi zeminlerin bulunduğu anlaşılmıştır. Dispersif killer (dağılgan killer) olarak tanımlanan bu tür killer boşluk suyunda çözülmüş sodyum iyonu yüzdesi yüksek olan ve su ile temas ettiğinde önemli derecede erozyona uğrayan killerdir. Bu killer, durgun su içerisinde de dağılmaya uğrayarak süspansiyon oluşturmaktadırlar [1, 2]. Dispersif özelliğe sahip bir kil suyun içine batırıldığı zaman, kil tanecikleri arasındaki elektrokimyasal çekim kuvvetleri azalmakta ve kil tanecikleri birbirlerinden uzaklaşarak bağımsız hareket etmektedirler. Bunun sonucu olarak, dispersif özelliğe sahip olan kil ortamda bulunan suyun da etkisiyle yayılma özelliği göstermektedir. Su ile beraber gelişen bu yayılma, oturma çatlakları, hidrolik kırık ya da yüksek geçirimsizliğe sahip bir zon boyunca gerçekleşmektedir. Bu nedenle özellikle hidrolik yapılar, dolgu tipi barajlar ve yol dolgularında dispersif killerin kullanımı ciddi mühendislik sorunlarına yol açabilmektedir [3].

Dispersif killer çoğunlukla yamaçlarda, nehir yatağı çökellerinde, lös ve taşkın ovası düzlükleri çökellerinde (kalıntı ve alüvyal killer) gözlenmektedirler. Bazı bölgelerde denizel çökeller olarak depolanmış kiltaşları ve şeyller de dispersif killerde olduğu gibi, boşluk suyunda yüksek miktarda tuz içeriğine sahip olduklarından bu zeminlerden türeyen kalıntı topraklar da dispersif özellik göstermektedirler [4]. Dispersif killerin gözlemlendiği eğimli topoğrafyaya sahip bölgelerde, yüzey erozyonu çıkıntılı, dolambaçlı sırtlar ve hızlı biçimde oluşan kanallar ve tünellerle karakterize edilmektedirler. Hafif engebeli ya da düzlük bölgelerde ise siltli kumlu birimlerden oluşan koruyucu örtü nedeniyle dispersif killer yüzeyde gözlenememektedirler. Dispersif killer kırmızı, kahverengi, gri, sarı ya da bu renklerin çeşitli kombinasyonları olarak izlenebilmektedirler. Yüksek miktarda organik bileşime sahip siyah topraklar dispersif özellik göstermemektedirler [3, 5].

Dispersivite ve dispersif killer yaklaşık yüz yıl kadar önce ortaya atılmış bir konu olmasına karşın, mühendislik uygulamalarında konunun incelenmesi 1960'lı yıllara rastlamaktadır. İlk kez Avustralya'da bir toprak dolgu barajda gözlenen borulanma türü yenilme sonucu bu konu incelenmeye başlanmıştır. Özellikle 1970' li yıllarda Sherard vd. [1, 6, 7, 8] dispersivite ile ilgili ayrıntılı çalışmalar yapmışlardır. Türkiye'de ise konunun incelenmesi Devlet Su İşleri tarafından yürütülen çalışmalarla başlamış olup, daha sonraları pek çok araştırmacı tarafından dispersif killerin tanımlanması, tanımlama yöntemleri ve bu tür killer üzerinde ya da içinde inşa edilen mühendislik yapıları üzerinde araştırmalar yapılmıştır [9, 10, 11, 12, 13].

Dispersif killerin tanımlanabilmesi için fiziksel ve indeks deneylerin yeterli olmadığı yapılan çalışmalar sonucunda ortaya konmuştur [1]. Dispersif killeri tanımlamak amacıyla fiziksel (dağılma deneyi, çift hidrometre deneyi, iğne deliği deneyi) ve kimyasal (boşluk suyu analizi) deneyler olmak üzere dört farklı deney yöntemi önerilmiştir. Söz konusu deneyler yapılarak örneklerin dispersivite dereceleri "dispersif değil", "ara", "dispersif" ve "yüksek dispersif" olmak üzere 4 farklı sınıfta belirlenmektedir [3]. Ancak, aynı kil örnekleri üzerinde yapılan deneyler sonucunda belirlenen dispersivite dereceleri arasında zaman zaman bazı uyumsuzluklar görülebilmektedir. Fiziksel deneylere göre daha güvenilir sonuçlar veren kimyasal deneyler uzun ve hassas ölçümler gerektiren deneyler olup, maliyetleri de oldukça yüksektir [14]. Bu deney yöntemlerinden hangilerinin daha güvenilir olduğu ve değerlendirme aşamaları konusundaki belirsizlikler halen devam etmektedir.

Son yıllarda yapılan araştırmalar dispersivite deneylerinde kullanılan suyun kimyasının da killerin dispersivite derecesinin değişiminde önemli olduğunu göstermiştir. Fernando [15], su kimyasının dispersivite üzerindeki etkisini belirlemeye yönelik bir çalışma yapmış ve incelediği örneklerin dispersif sınıftan dispersif olmayan sınıfa geçişini kontrol eden bir parametre olan toplam çözünmüş tuzlar (TDS) değeri için bir eşik değer belirlemiştir. Araştırmacı dispersif örneklerin dispersif olmayan örnek sınıfına geçiş gösterdiği TDS eşik değerini belirlemek için dispersif olduğu bilinen sahadan örnekler alarak değişen TDS içeriklerinde dağılma deneyi yapmıştır. Deneylere saf su ile başlayan araştırmacı daha sonra değişen TDS değerlerinde deneylere devam etmiş ve aykırı değerler veren 3 örnek dışında tüm örneklerin belirli bir TDS değerinden sonra dispersif olmayan zemin sınıfına

geçtiğini gözlemlemiştir. Fernando [15]'nin çalışması, su kimyasının dispersivite üzerindeki etkisini göstermesi açısından önem taşımaktadır. Ancak, söz konusu çalışmada TDS değerinin belirlenme ve değiştirilme şekline değinilmemiştir. Bununla birlikte Fernando [15], dispersivitenin tayini amacıyla sadece dağılma deneyleri yapmış ve sodyum yüzdesinin dispersivite üzerindeki etkisinin belirlenmesine yönelik herhangi bir değerlendirmede bulunmamıştır.

Yukarıda kısaca belirtilen ve önceki çalışmalar bölümünde ayrıntısına değinilecek olan dispersif killer ve bu killeri tanımlama yöntemleri konusunda yapılmış çalışmalar oldukça sınırlı sayıdadır. Deney yöntemlerinin uygulanma şekli, değerlendirme aşamaları ve belirlenen dispersivite derecelerinin sınırları konusundaki belirsizlikler günümüzde halen devam etmektedir. Ayrıca, sınırlı sayıdaki çalışmada deneylerde kullanılan suyun kimyasının dispersivite derecesi üzerindeki etkisi araştırılmış olup, sodyum iyonunun dispersivite derecesi üzerindeki etkisi tam olarak ortaya koyulmamıştır.

Bu çalışmada, mühendislik uygulamalarında içsel erozyon ve borulanma gibi sorunlara yol açan dispersivite özelliğinin çeşitli deney yöntemleri ile araştırılması, dispersiviteyi kontrol eden etmenlerin ve su kimyasının dispersivite üzerindeki etkisinin belirlenmesi ve Na iyon konsantrasyonu ile dispersivite sınıfı arasındaki ilişkinin ortaya konulması ve farklı istatistiksel modellerle dispersivitenin kestirimi amaçlanmıştır.

Bu amaçlar doğrultusunda, tez kapsamında aşağıda verilen aşamalar izlenmiştir:

- a) Devlet Su İşleri (DSİ) Genel Müdürlüğü bünyesinde dispersivite ve dispersif killerin tanımlanmasına yönelik çalışmaların gerçekleştirildiği ilgili birimle görüşülerek dispersif killer ve bunların Türkiye'deki yayılımları hakkında bilgi toplanmıştır. Özellikle Ankara ve çevresinde yayılım gösteren dispersif killer ve bunların arazideki özellikleri belirlenerek arazi çalışmaları planlanmıştır.
- b) Arazi çalışmaları kapsamında dispersif ve ara zemin özellikleri gösterdikleri tahmin edilen sahalar belirlenerek, Ankara ve çevresinde belirlenen 5 farklı lokasyondan farklı sayıda örselenmiş kil örnekleri alınmıştır. Laboratuvarda

yapılacak olan deneyler göz önünde bulundurularak tüm deneylerde kullanılmak üzere 29 adet örnek derlenmiştir.

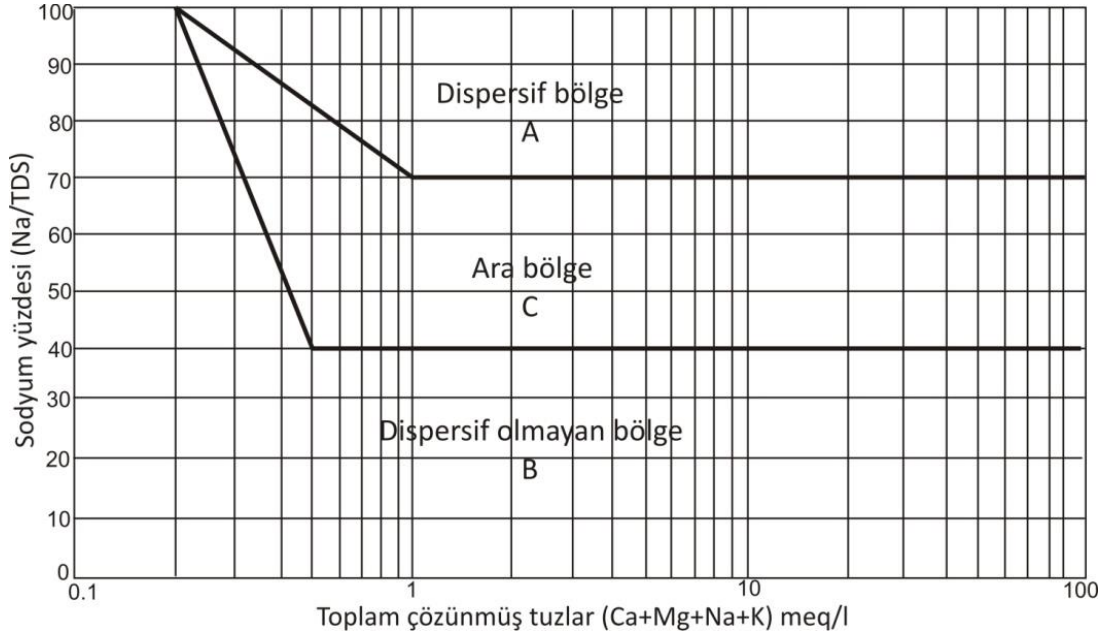
- c) Alınan örneklerin tanımlanabilmesi ve kil mineralojisinin dispersiviteyle olan ilişkisinin ortaya konulması amacıyla örnekler üzerinde X-ışınları kırınımı analizleri yapılarak örneklerin mineral içerikleri ve kil yüzdeleri belirlenmiştir.
- d) Laboratuvar deneyleri toprak mekaniği deneyleri ve dispersivite deneyleri olmak üzere iki aşamada gerçekleştirilmiştir. Kil örneklerinin fiziksel ve indeks özellikleri, tane boyu dağılımları ve sıkışabilirlik özellikleri tayin edilmiştir. Örneklerin dispersivite dereceleri ise, fiziksel ve kimyasal dispersivite deneyleriyle belirlenmiştir. Fiziksel dispersivite deneyleri kapsamında dağılma, iğne deliği ve çift hidrometre deneyleri ve kimyasal dispersivite deneyleri kapsamında ise boşluk suyu analizleri yapılmıştır. Boşluk suyu analizleriyle; kil örneklerinin toplam çözünmüş tuzlar (TDS), sodyum yüzdesi (SY), sodyum adsorbsiyon oranı (SAR), değişebilir sodyum yüzdesi (ESP), değişebilir katyon kapasitesi (CEC), pH derecesi ve elektriksel iletkenlik (EC) değerleri tayin edilmiştir.
- e) Dispersivite üzerinde su kimyasının etkisinin araştırılması amacıyla örnekler, öncelikle belirlenen en yüksek kuru ağırlık ve optimum su içeriği değerlerinde saf su ile sıkıştırılarak dispersivite deneylerine hazırlanmışlardır. Dağılma ve iğne deliği deneylerinde kullanılan suyun TDS değeri değiştirilerek deneyler (dağılma ve iğne deliği deneyi) söz konusu örnekler üzerinde tekrarlanmıştır. Deneyler, TDS değeri sırasıyla 0, 50, 100, 300, 500, 1000 mg/l olarak hazırlanan su örnekleri kullanılarak yapılmıştır.
- f) Doğru dispersivite sınıfının kestirimi amacıyla mümkün olduğunca az değişken kullanarak karar ağacı, lojistik regresyon ve yapay sinir ağları gibi modelleme ve esnek hesaplama yöntemleri ile modeller oluşturulmuştur. Ayrıca tüm modelleme ve esnek hesaplama yöntemlerinden elde edilen sonuçlar karşılaştırılarak genel bir değerlendirme yapılmıştır. Yapılan değerlendirmeler sonucunda tüm fiziksel ve kimyasal deneylerden ve istatistiksel modelleme ve esnek hesaplama yöntemlerinden elde edilen

sonuçlar birlikte yorumlanarak dispesivitenin belirlenmesi amacıyla bir akım Şeması önerilmiştir.

## 1.2. nceki alıŐmalar

Dispersivite ve dispersif killerin jeoteknik mühendisliği uygulamalarındaki önemi 1960'lara kadar anlaŐılamamıŐ olup, ilk kez Avustralya'da toprak dolgu barajlarda dispersif killerden kaynaklanan borulanma türü yenilme konusunda yapılan araŐtırmalarla baŐlamıŐtır. Dispersif killer ve tanımlama yöntemleri ile bu killerle ilgili deneysel ve iyileştirme tekniklerine ilişkin çalışmalar aşağıda ana hatlarıyla sunulmuştur.

Sherard vd. [1], dispersif killerin üzerinde inşa edilmiş olan toprak dolgu barajlarda dispesivitenin geliŐmesi sonucu gerçekleŐmiŐ olan duraysızlıkları dispesivite açısından araştırmışlardır. Araştırmacılar, 1955 -1970 yılları arasında Oklahoma ve Missisipi (ABD)'de dispersif özellik gösteren killi zeminin çatlaklar boyunca içsel erozyon sonucu taŐınmasıyla duraylılıklarını yitirmiŐ olan 14 adet toprak dolgu barajdan aldıkları kil örneklerini incelemişlerdir. Sherard vd. [1], dispersif killerin erozyona uğrayabilirliklerinin yüksek olduğunu ve dispersif ve dispersif olmayan killer arasında Atterberg limitleri ve tane boyu dağılımı açısından bir fark olmadığını vurgulamışlardır. Araştırmacılar ayrıca, zeminlerin boşluk suyunda içermiŐ oldukları sodyum iyon konsantrasyonu ile çözünmüş halde bulunan katyonlar arasındaki ilişkinin dispesivite sınıflarının belirlenmesinde etkili olduğunu belirtmiŐler ve dispesivitenin belirlenmesine yönelik bir abak önermişlerdir. Toplam znmŐ tuzlar (TDS) ve sodyum yüzdesi (SY) veri çiftlerinin dağılımına göre zeminlerin dispersif, dispersif olmayan ve ara zemin olmak üzere üç grupta değerlendirildiği söz konusu abak Şekil 1.1' de verilmiştir Sherard vd. [1] tarafından yapılan bu çalışma, dispersif killerin özelliklerini ortaya koyan ilk çalışma olması açısından önemlidir.



Şekil 1.1. Sherard vd. [1] tarafından önerilen TDS ve SY ilişkisini esas alan dispersivite abağı.

Sherard vd. [8], saha koşullarını laboratuvar ortamında modelleyerek dispersif killerdeki su akışının ölçülmesini esas alan iğne deliği deneyini önermişlerdir. Deneyde zemin örneğinin ortasına açılan küçük bir delikten su akışı sağlanmakta ve bu akış geçirimsiz çekirdek içindeki kaçak kanalı ya da kırık boyunca gerçekleşen su akışını modellemektedir. Deney sonucunda dispersif zemin (D1-D2) ara zemin (ND3-ND4) ve dispersif olmayan zemin (ND1-ND2) olmak üzere üç sınıf belirlenmekte olup, iğne deliği deneyinin yapılışına ve sonuçlarının değerlendirilmesine ilişkin ayrıntılı bilgi tezin 2. Bölümü'nde verilmiştir.

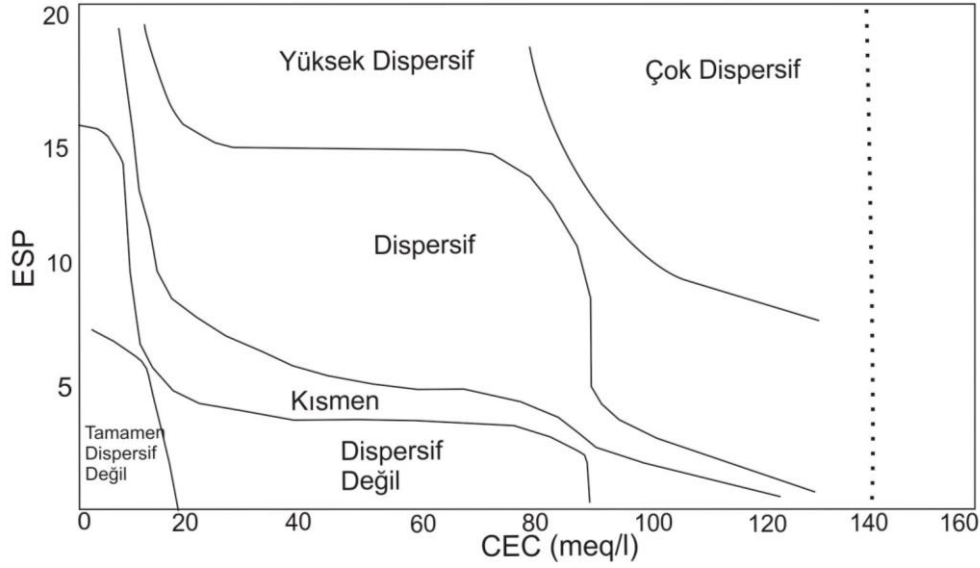
Sherard vd. [16], dispersif killeri tanımlamak için kullanılan iğne deliği, çift hidrometre, dağılma deneyleri ile kimyasal dispersivite deneylerini yapmışlar ve tüm deneylerden elde ettikleri dispersivite sınıflarını karşılaştırmışlardır. Araştırmacılar, killerin Atterberg limitleri ve tane boyu dağılımları gibi fiziksel özelliklerinin kullanılmasıyla dispersivite sınıflarının tayin edilemeyeceğini belirlemişlerdir. Ayrıca, iğne deliği ile kimyasal dispersivite deneylerinden elde edilen dispersivite sınıflarının birbirleriyle uyumlu olduğunu da saptamışlardır.

Arulanandan ve Heinzen [17], killerin dispersivitesini ve erozyona uğrayabilirliklerini araştırarak Avustralya'nın tüm eyaletlerinde özellikle bitki örtüsünden yoksun

kesimlerde su geçitleri, yol yarmaları, kanallar ve dolgularda gerçekleşen dispersivite ve erozyon sorunlarını incelemişlerdir. Killi zeminlerde içsel yapı ve gözenek suyu arasındaki etkileşim sonucu erozyonun gerçekleştiğini ifade eden Arulanandan ve Heinzen [17], dispersivite deneylerini niteliksel ve niceliksel olmak üzere iki gruba ayırmışlardır. Araştırmacılar, çift hidrometre, iğne deliğı ve dağılma deneylerinin niteliksel, zeminin gözenek suyu bileşimi, iyon konsantrasyonu, katyon değışim kapasitesi gibi özelliklerini dikkate alan kimyasal dispersivite deneylerinin ise niceliksel yöntemler olduğunu belirtmişlerdir. Arulanandan ve Heinzen [17], sayısal değerlendirme olanağı sunan kimyasal dispersivite deneylerinden belirlenen dispersivite sınıflarının daha güvenilir olduklarını ifade etmişlerdir.

Düzceer [18], Türkiye’deki 7 barajdan aldığı örnekler üzerinde iğne deliğı, çift hidrometre, dağılma deneyleri ile kimyasal dispersivite deneyleri yapmış ve toprak dolgu barajlardaki killerin dispersivitesini incelemiştir. Araştırmacı dispersivitenin, zeminin indeks özellikleri kullanılarak dolaylı yoldan tayin edilemeyeceğini belirtmiş ve düşük şişme potansiyeline sahip zeminlerin çift hidrometre deneyinde yüksek derecede dispersif çıktığını vurgulamıştır.

Gerber ve Harmse [19], dispersiviteyi belirleyebilmek için kullanılan deneyler ve bunların güvenilirliği üzerinde çalışmışlardır. Araştırmacılar, 170 örnek üzerinde fiziksel ve kimyasal dispersivite deneylerini gerçekleştirmişlerdir. Boşluk suyu analiz sonuçlarından seçtikleri sodyum konsantrasyonu, değışebilir sodyum yüzdesi, değışebilir magnezyum yüzdesi parametreleri ile çift hidrometre deneyinin dispersivite sınıfının belirlenmesinde güvenilir olduklarını belirtmişlerdir. Araştırmacılar, dispersivitenin killi zeminlerin boşluk suyu kimyası ile yakından ilişkili olduğunu belirterek, özellikle değışebilir sodyum yüzdesi (ESP) ve katyon değışim kapasitesi (CEC) parametrelerinin dispersiviteyi kontrol ettiklerini öne sürmüşlerdir. Buna dayanarak, araştırmacılar ESP ve CEC arasındaki ilişkiyi esas alan ve Şekil 2.1’de verilen dispersivite abağını önermişlerdir. Söz konusu abakta “tamamen dispersif değil” ve “çok dispersif” arasında değışen altı sınıf yer almaktadır.



Şekil 1.2. Gerber ve Hamse [19] tarafından önerilen ESP ve CEC ilişkisini esas alan dispersivite abağı.

Knodel [3], dispersif killerin karakteristiklerini, bu tür zeminleri tanımlama yöntemlerini ve neden oldukları mühendislik sorunlarını araştırmaya yönelik bir çalışma gerçekleştirmiştir. Dispersif killerin dünya üzerindeki yayılım ve dağılımları ile arazide bu tür zeminleri tanıma ölçütlerine de değinen araştırmacı, bu tür zeminleri arazide ve laboratuvarında tanımlama yöntemlerini ayrıntılı bir şekilde ele almıştır. Knodel [3], dispersif zeminleri tanımlamada kullanılan iğne deliği, dağılma ve hidrometre deneyleri ile standartlarını anlatmış, ayrıca kimyasal deneyler ve değerlendirme yöntemlerine de değinmiştir. Araştırmacı, dispersif zeminler üzerine inşa edilen yapıların duraylılık sorunları, kontrolü ve güvenliği için alınabilecek önlemleri belirterek, filtre, dren, kum-çakıl ya da kireçle stabilizasyon teknikleri gibi yöntemleri kullanılarak dispersif killer üzerinde baraj ve diğer hidrolik yapıların inşa edilebileceğini ifade etmiştir.

Tosun [9], Türkiye'deki 17 ayrı baraj projesinden alınan örnekler üzerinde iğne deliği ve dağılma deneyi yapmış ve her iki deneyden belirlenen dispersivite sınıflarını karşılaştırmıştır. Araştırmacı, dağılma deneyleri sonucunda incelediği örneklerin %73'ünün, aynı örnekler üzerinde yaptığı iğne deliği deneyleri sonucunda ise örneklerin % 58'nin dispersif olduğunu belirlemiştir. Tosun [19] ayrıca, iğne deliği deneyinde ara zemin olarak tanımladığı örnek sayısının dağılma deneyinde ara zemin olarak tanımladığı örnek sayısından daha fazla olduğunu ve dağılma

deneyinde dispersif olarak tanımlanan bir örneğin büyük olasılıkla dispersif olduğunu belirtmiştir.

Bell ve de Bruyn [20], şişen zeminler, dispersif zeminler, çöken zeminler ve bunların neden oldukları mühendislik sorunlarını incelemişlerdir. Araştırmacılar; TDS ve Na (%) değerlerini esas alan dispersivite sınıflaması ve ESP ve CEC değerlerini esas alan dispersivite sınıflamasını kullanarak örnekleri sınıflandırmışlar ve elde edilen sınıf değerlerini birbirleriyle karşılaştırmışlardır. Bell ve de Bruyn [20], TDS ile Na (%) ilişkisi açısından dispersif olarak tanımlanan zeminlerin ESP ile CEC ilişkisine dayalı sınıflandırma abağında da aynı sınıfta yer aldıklarını belirlemişlerdir.

Sridharan vd. [21], sıkıştırılmış şişmeyen killerin (kaolinit, hallosit) dispersivitesi üzerinde etkili olan faktörleri ve bu tür zeminlerin dispersivite derecesini düşüren sentetik organik malzemelerin kullanımlarını araştırmışlardır. Sridharan vd. [21], çeşitli doygunluk oranlarında % 95 sıklıkta hazırladıkları kaolinit örnekleri üzerinde iğne deliği deneyini yapmışlardır. Araştırmacılar, % 27 ile %34 arasında değişen su içeriği değerlerinde sıkıştırdıkları örneklerde, su içeriğinin artmasına koşut olarak, iğne deliği deneyi sonucu belirlenen dispersivite sınıflarının ara zemin (ND3) sınıfından dispersif (D1) zemin sınıfına geçiş yaptığını gözlemlemişlerdir. Ayrıca, şişmeyen kile uzun zincirli bir organik polimer olan PVA (polyvinhylalcohol % 1'lik) ilave edilmesiyle örneklerin dispersivite derecesinin D1 sınıfından D2 sınıfına geçtiğini ve böylece örneklerde az da olsa bir iyileşme olduğunu ifade etmişlerdir.

Bell ve Walker [22], Güney Afrika'nın Natal bölgesinde çok çeşitli kaya türlerinden türemiş dispersif killeri incelemişlerdir. Araştırmacıların incelediği killer ortamda suyun bulunması halinde koloidal yapı oluşturarak borulanma ve içsel erozyona uğrama eğilimi gösteren zeminlerdir. Bölgeden aldıkları 94 örnek üzerinde fiziksel ve kimyasal deneyler yapan bu araştırmacılar, kil örneklerinin mikroyapısını ve mineral içeriklerini de araştırmışlardır. Tane boyu dağılımı ve kıvamlilik özelliklerinin dispersivite üzerinde etkisi olmadığını belirten Bell ve Walker [22], boşluk suyunda yüksek miktarda sodyum iyonu içeren dispersif killi topraklarda kil tanelerinin birarada oldukları konumdan boşluklara doğru hareket ederek daha açık bir dizilim gösterdiğini ifade etmişlerdir. Araştırmacılar ayrıca daha güvenilir ve tek bir dispersivite sınıfı elde etmek için fiziksel ve kimyasal deney sonuçlarının birlikte

değerlendirildiği diskriminant analizini uygulamışlardır. Dağılıma deneyi, iğne deliği deneyi, SAR değeri, ESP-CEC ve TDS-SY ilişkisine dayalı değerlendirme yöntemlerinden elde edilen dispersivite sınıflarını esas alan araştırmacılar, her bir örnek için yöntemlerden belirledikleri dispersivite sınıflarına belirli puanlar vererek toplam puanlara göre dispersivite sınıflarını yeniden belirlemişlerdir.

Tosun ve Savaş [23], düşük plastisiteli zeminlerde dispersivite özelliğini farklı deney yöntemleriyle incelemişlerdir. Araştırmacılar Afyon, Eskişehir ve Bilecik illerinde inşa edilme aşamasında olan on baraja ait malzeme sahalarından aldıkları 19 örnek üzerinde tanımlama ve dispersivite deneyleri yaparak sonuçları karşılaştırmışlardır. Örnekler üzerinde öncelikle tanımlama ve sınıflama deneyleri yapan araştırmacıların inceledikleri örneklerin 12 adedi ince taneli olup, bu zeminler düşük plastisiteli silt, kil ve siltli-kil olarak tanımlanmıştır. Tosun ve Savaş [23] dispersivite deneyleri kapsamında ise dağılıma, iğne deliği, çift hidrometre ve kimyasal deneyler yapmışlardır. Araştırmacılar yaptıkları deneylerden elde ettikleri sonuçlara göre kimyasal deney sonuçları ile düşük plastisiteli zeminlerin dispersivite yönünden güvenilir bir biçimde tanımlanamayacağını ancak fiziksel deneylerden dispersif ve ara zemin olarak tanımlanan örneklerin yüksek sodyum yüzdesi değerlerine sahip olduklarını ifade etmişlerdir.

Zorluer [24], Afyon, Bilecik, Eskişehir ve Kütahya'da bulunan 12 ayrı barajı yerinden aldığı örneklerin fiziksel, indeks ve dispersivite özelliklerini belirlemiştir. Fiziksel ve kimyasal dispersivite deneylerinin sınırlamalarına değinen araştırmacı, dispersif killerle ilgili güvenilir bir tanımlama yapmak amacıyla farklı dispersivite deneylerinden elde ettiği sonuçları kullanarak diskriminant analizi gerçekleştirmiştir. Zorluer [24]; diskriminant analizinde dağılıma, iğne deliği, TDS - % Na, ESP-CEC ve SAR değerlerinden belirlediği sınıfları esas almış ve her deneye ait sonuçlar için dispersivite sınıfına göre belirli puanlar vermiştir. Araştırmacı, bu puanlara göre atanan sınıfları kullanarak diskriminant analizini gerçekleştirmiştir. Zorluer [24], çalışma sonucunda analiz ve puanlama yapılarak belirlenen dispersivite sınıfları arasında benzerlikler olduğunu belirtmiştir. Araştırmacı ayrıca, dispersivitenin belirlenmesinde kullanılan iğne deliği deneyinde boyut etkilerini gözlemlemek amacıyla iğne deliği deney düzeneğinin boyutlarında belirli miktarlarda değişiklik yaparak yeniden dönüştürülmüş iğne deliği deneyi cihazı adıyla yeni bir tasarım

gerçekleştirmiştir. Yeniden dönüştürülmüş iğne deliği deneyi cihazıyla 1 mm çapında delikler açarak dispersif olmayan kil örnekleri üzerinde yaptığı deneylerin sonuçlarının, standart iğne deliği deney düzeneğiyle yaptığı deneylerin sonuçlarıyla benzer olduğunu öne süren araştırmacı, yalnızca düşük plastisiteli zeminlerde boyut etkisinin deney sonuçlarını değiştirdiğini ifade etmiştir.

Nontananandh vd. [25] Tayland'ın kuzeydoğu bölgesinde yer alan Kasetsart Üniversitesi Nakhon yerleşkesinin içinde oldukça geniş bir alanda yayılım gösteren dispersif killeri incelemiştir. Araştırmacılar, kampüs çevresinde inşa edilmiş sekiz rezervuardan ikisinin bulunduğu bölgede erozyonal özellikler gözlemlemiştir. Söz konusu bölgelerde yüksek türbiditeye sahip rezervuar suyunun dispersif özellik gösteren killerde kanallar ve çözünme boşlukları şeklinde yapılar oluşturduğunu belirten araştırmacılar, aldıkları örnekler üzerinde fiziksel ve kimyasal dispersivite deneyleri yapmışlar ve sonuçları dispersivite açısından değerlendirmişlerdir. Nontananandh vd. [25], dispersif sınıfa ait olan örneklerin yüksek plastisite indeksi değerine sahip killi zeminler olduğunu belirtmişlerdir. Atterberg limitleri ve dispersivite arasında bir ilişki olmadığını öne süren araştırmacılar, % 10 'dan düşük kil içeriğine sahip zeminlerde borulanmaya neden olabilecek kolloidal bir yapının oluşmayacağını da ifade etmişlerdir.

Lashkaripour vd. [26] İran'ın doğusunda Sistan Ovasında görülen killerin dispersif erozyonal karakteristiklerini incelemiştir. Araştırmacılar bölgede geniş bir alanda inşa edilmiş olan dolguda gözlenen erozyonun, killerin dispersif özelliklerinden kaynaklandığını düşünmüşler ve öncelikle dispersif zeminlerin arazide yaptıkları gözlemlerle tanımlamaya çalışmışlardır. Sahada alüvyal kökenli kil ve siltli ince taneli zeminler, erozyon kanalları ve derin oyuk izlerini gözlemleyen araştırmacılar, bölgeden aldıkları 20 örnek üzerinde dispersivite deneyleri yapmışlar ve deney sonuçlarını karşılaştırmışlardır. Kimyasal deney sonuçlarına göre, zeminlerin boşluk suyunda yüksek oranda sodyum içerdiklerine dikkat çeken Lashkaripour vd. [26] örneklerin çoğunu dispersif olarak tanımlamışlardır. Ancak iğne deliği, dağılma ve çift hidrometre deneylerinin sonuçlarında farklılıklar belirlemişlerdir. Bu deneylerle daha çok dispersif ve ara zemin tanımlaması yapan araştırmacılar, yöntemler açısından tutarsız sonuçların elde edilebileceğini ifade etmişlerdir.

Bhuvaneshwari ve Soundara [27], uçucu kül ve kireç katkısının dispersif killerin iyileştirilmesi üzerindeki etkisini araştırmışlar ve sodyum montmorillonit içeren yüksek derecede dispersif özelliğe sahip bentonit örnekleri kullanmışlardır. Araştırmacılar, değişen yüzdelerde kireç ve uçucu külü zemin örneklerine ilave ederek örnekler üzerinde dağılıma, iğne deliği, çift hidrometre ve boşluk suyu deneyleri yapmışlar ve dispersivite derecesindeki değişimi gözlemlemişlerdir. Bhuvaneshwari ve Soundara [27], uçucu kül katkısının tek başına iyileştirici bir etkisi olmadığını, ancak kireç ile birlikte kullanıldığında dispersivite derecesinde ciddi miktarda azalma olduğunu vurgulamışlardır. Uçucu kül ve kireç ilave edilmiş zeminlerde yapılan çift hidrometre deneylerinden sonucu elde edilen dispersiyon yüzdesi değerinde ciddi bir azalma belirleyen araştırmacılar, iğne deliği deneylerinde de örneklerin ara zemin sınıfından (ND4) dispersif olmayan zemin (ND1) sınıfına geçtiklerini belirtmişlerdir. Örnekler üzerinde yaptıkları boşluk suyu analizi sonuçlarının da fiziksel deneylerden elde edilen sonuçlarla uyumlu olduğunu vurgulayan araştırmacılar, uçucu kül ve kireç katkısının sodyum iyonu konsantrasyonu, sodyum adsorbsiyon oranı ve sodyum yüzdesi değerlerini azaltarak dispersivite derecesini değiştirdiğini ifade etmişlerdir. Ayrıca uçucu kül ve kireç katkısının zeminin mikroyapısında da değişime neden olduğunu belirten araştırmacılar doğal ve katkı maddesi ilave edilmiş haldeki zemin örnekleri üzerinde taramalı elektron mikroskobu (SEM) analizleri yapmışlardır. Katkı maddesi ilave edilmiş örneklerin SEM görüntülerinde iç içe girmiş kapalı bir mikro yapı gözleyen araştırmacılar, dispersif örneklerde ise tabakalı ve açık dizilim gösteren bir mikro yapı gözlemlemişlerdir.

Savaş ve Tosun [28], dispersif killerin tanımlanmasında kullanılan iğne deliği deney düzeneğinin yeniden geliştirilmesine yönelik bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Araştırmacılar ayrıca deneyin farklı boyutlardaki örnekler üzerinde uygulanabilirliğini iğne deliği deney düzeneğinin boyutlarını iki, üç ve beş kat büyütürken yeniden tasarlamışlardır. Standart iğne deliği deney düzeneğinde el kontrollü bir vana ile gerçekleştirilen su yükü ayarlamasını geliştirdikleri sistemle elektronik otomasyon sistemine dönüştüren araştırmacılar, boşalım debisinin ölçümü için ise basınç algılayıcı bir sistem önermişlerdir. Araştırmacılar geliştirdikleri yeni iğne deliği deney düzeneğiyle deney aşamasındaki tüm değişkenleri elektronik olarak kontrol ederek, olası hataları en düşük seviyeye indirmişlerdir. Ayrıca standart zemin örneklerinin

iki, üç ve beş katı büyüklükte olacak şekilde örneklerin de deneylerde kullanılabileceğini ifade eden araştırmacılar, her örnek boyutu için önerdikleri yeni sistemi denemişler ve sonuçların benzer olduğunu belirtmişlerdir.

Su kimyasının dispersivite üzerindeki etkisini belirlemeye yönelik bir çalışma yapan Fernando [15], incelediği örneklerin dispersif sınıftan dispersif olmayan sınıfa geçişini kontrol eden TDS için bir eşik değeri belirlemiştir. Çalışmada, Avustralya'nın Viktorya bölgesinde bulunan killerin dispersivite sınıfları deneylerde kullanılan suyun TDS (Toplam çözünmüş tuzlar) değerinin değişimine bağlı olarak farklılık gösterdiği belirlenmiştir. Araştırmacı öncelikle bu bölgeden aldığı örnekler üzerinde musluk suyu kullanarak Emerson (Crumb) deneyini yapmış ve örnekleri dispersif olarak sınıflamıştır. Aynı örnekler üzerinde nehir suyu kullanılarak yapılan deneylerde ise, örnekler dispersif olmayan zemin olarak tanımlanmıştır. Bunun üzerine araştırmacı nehir suyu ve musluk suyu örneklerinin içeriğini belirlemek amacıyla kimyasal analizler yaptırmış ve analiz sonuçları nehir suyunun yüksek oranda TDS içerdiğini göstermiştir. Buradan yola çıkan araştırmacı; dispersif örneklerin dispersif olmayan örnek sınıfına geçiş gösterdiği TDS eşik değerini belirlemek için, değişken TDS değerine sahip su kullanarak deneyleri yinelemiştir. Deneylere saf su ile başlayan Fernando (2010), daha sonra deneylerde kullandığı suyun TDS değerini 25, 50, 90, 100, 105, 110, 115, 125 mg/l olarak değiştirmiştir. Araştırmacı aykırı değerler veren 3 örnek dışındaki tüm örneklerin TDS'nin 105 mg/l değerinden sonra örneklerin dispersif olmayan zemin sınıfına geçiş yaptığını ifade etmiştir. Aykırı değerler veren örnekler ise; TDS değeri 25-90 mg/l arasındayken dispersif olmayan sınıfa geçiş göstermişlerdir. Araştırmacı aykırı sonuçların nedenini araştırmak amacıyla boşluk suyu analizleri yapmıştır. Analiz sonuçları aykırı sonuçlar veren örneklerin düşük miktarda sodyum iyonu konsantrasyonuna sahip olduğunu göstermiştir. Fernando [15]'nin çalışması, su kimyasının dispersivite üzerindeki etkisini göstermesi açısından önem taşımaktadır.

Maharaj [29], dispersif killerin tanımlamasında kullanılan dağılma deneyinin uygulanabilirliğine ve kısıtlamalarının araştırılmasına yönelik bir çalışma gerçekleştirmiştir. Dağılma deneyinin daha çok kişisel gözleme ve yoruma dayalı bir deney olduğuna dikkat çeken araştırmacı, değişik özellikler gösteren kil örnekleri üzerinde dağılma deneyleri yapmıştır. Araştırmacı çalışmasında; arazi gözlemlerine ve önceki çalışmalara dayanarak bir adet dispersif, bir adet dispersif olmayan ve

özellikleri bilinmeyen iki örnek olmak üzere toplam dört örneği incelemiştir. Maharaj [29], oda koşullarında ve etüvde kuruttuğu örnekleri sıkıştırarak deneylere tabi tutmuştur. Araştırmacı, sıkıştırdığı örnekler üzerinde gerçekleştirdiği dağılma deneylerinde hem saf su hem de NaOH çözeltisi kullanmıştır. Maharaj [29], örnekleri kurutma koşullarının, doğal haldeki dispersivite derecelerinin ve deneylerde kullanılan çözeltilerin türünün dispersivite derecesini nasıl etkilediğini de araştırarak su ve çözeltiler içerisinde dağılmaya bıraktığı örneklerin 10. dakika ile 2. ve 16. saatlerdeki dağılma durumlarını gözlemlemiştir. Deneyler sonucunda 10. dakika ve 16. saatte yaptığı gözlemlerde dispersivite derecesinin değiştiğini ifade eden araştırmacı, dağılma deneyinde kil tanelerinin tam olarak çökeldiğini ve süspansiyon içindeki bulanıklığın en belirgin şekilde gözlemlendiği sürenin en az 1 saat olduğunu belirtmiştir. Saf su ve seyreltilmiş NaOH çözeltisi kullanarak yaptığı deneylerden elde ettiği sonuçları karşılaştıran araştırmacı, dispersivite sınıfları bakımından farklılıklara rastlamamıştır. Ancak, fırında ve oda koşullarında kurutulmuş örneklerin dispersivite derecelerinin birbirlerinden farklı olduğunu belirlemiştir. Yüksek sıcaklıkta toprak boşluk suyu kimyasının değiştiğini ifade eden araştırmacı, fırında kurutulmuş örnekler üzerinde yapılan deneylerin çok temsil edici olmadığını belirtmiştir.

Dixit ve Gupta [30], Hindistan'da sulama bölgesine ait bir sahadan aldıkları kil örnekleri üzerinde dispersif killerin tanımlanması ve tanımlama yöntemlerinin karşılaştırılmasına ilişkin bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Araştırmacılar, bölgedeki sulama ve baraj projelendirme sahalarından aldıkları 100'e yakın kil örneği üzerinde dağılma, çift hidrometre ve iğne deliği deneyleri ile boşluk suyu analizleri yapmışlardır. Tüm deney sonuçlarını karşılaştıran araştırmacılar, dağılma deneyi ve kimyasal dispersivite deneylerini daha çok dispersif örnek tanımlaması yaptığını ve böylece bu deney yöntemlerinin daha tutucu sonuçlar verdiğini öne sürmüşlerdir. Fiziksel deneylerden arazi koşullarını en iyi yansıtan deneyin iğne deliği deneyi olduğunu vurgulayan Dixit and Gupta [30], bununla birlikte dağılma deneyinin örneklerin erozyona olan yatkınlıkları hakkında fikir vermesi açısından kullanılabileceğini ifade etmişlerdir.

Türköz vd. [31], magnezyum klorür çözeltisinin killerin dispersivitesi üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Araştırmacılar, Afyon'dan aldıkları üç adet örnek üzerinde

zemin tanımlama ve kompaksiyon deneyleri ile iğne deliği, dağılma, çift hidrometre ve kimyasal dispersivite deneyleri yapmışlardır. Katkı maddesi kullanmadan yapılan fiziksel dispersivite deneylerinde üç örnek de dispersif zemin olarak tanımlanmıştır. Ayrıca araştırmacılar, tüm örneklerin değişebilir sodyum yüzdesi değerlerinin yüksek olduğunu ifade etmişlerdir. Türköz vd. [31], örneklerin dispersivite özelliğinin kullanılan katkı maddesinin yüzdesine bağlı olarak değişimini incelemek amacıyla üç örneği proktor enerjisinde % 0, 1, 3, 5, 7 ve 10'luk oranlarda katkı maddesi ilave ederek iğne deliği ve dağılma deneylerini tekrarlamışlardır. Değişebilir sodyum yüzdesi değeri diğer iki örneğe göre daha düşük olan örnekte etkin iyileşmenin (dispersif zemin sınıfından dispersif olmayan zemin sınıfına geçiş) % 5 oranında katkı maddesinin ilave edilmesiyle görüldüğünü belirten araştırmacılar, değişebilir sodyum yüzdesi değeri yakın olan diğer iki örnek içinse bu oranın % 7 olduğunu belirlemişlerdir. Araştırmacılar, bu iyileşmenin +2 değerlikte olan magnezyumun zeminde adsorbe edilen sodyumla yer değişmesiyle gerçekleştiği sonucuna varmışlardır.

## 2. DİSPERSİF ZEMİNLER VE MÜHENDİSLİK AÇISINDAN ÖNEMİ

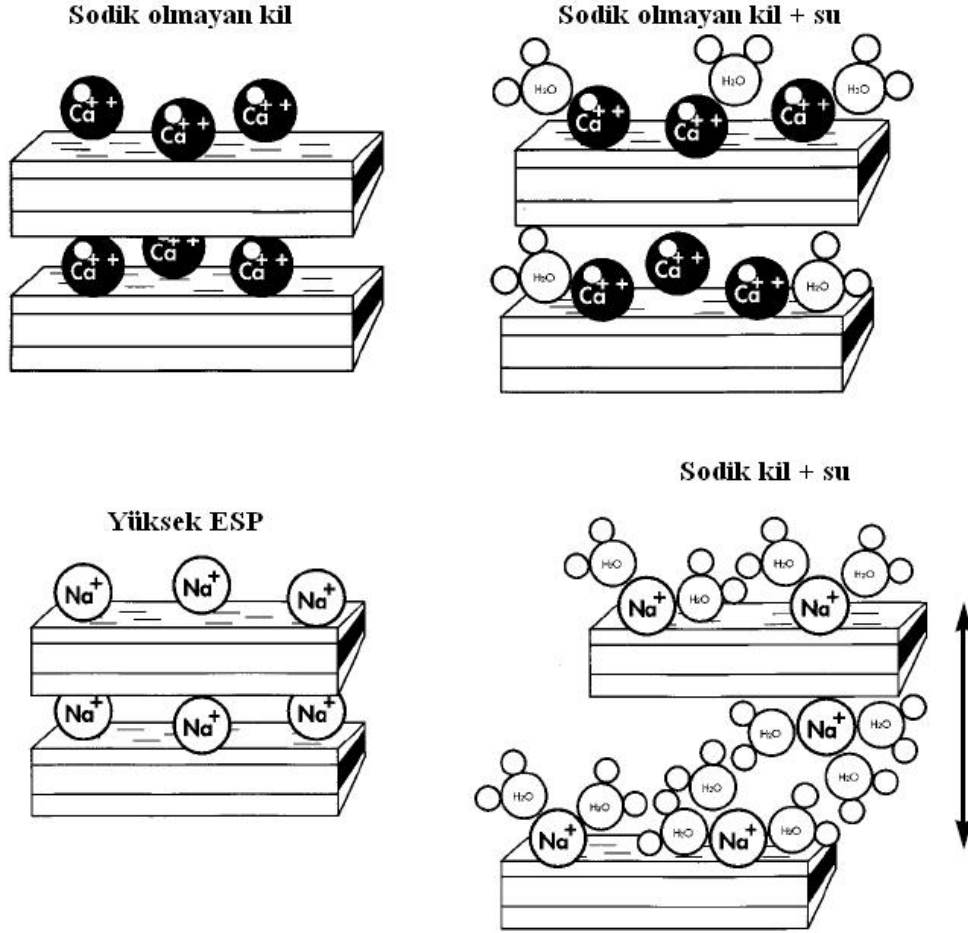
Dispersif killer, yapı malzemesi ve/veya temel zemini olarak kullanılmaları durumunda, büzülme ve farklı oturmaya bağlı olarak gelişen ve suyun akışına izin veren kırık ve çatlakların oluşması halinde, şevlerde yağış erozyonu, barajlarda ise borulanma gibi mühendislik sorunlarına neden olmaktadır. Bu nedenle, dispersif killerin ayrıntılı şekilde araştırılması ve neden olabilecekleri sorunların belirlenmesi gerekmektedir [3].

### 2.1. Killerin Dispersivitesi

Yavaş hareket eden su ile kolayca erozyona uğrayabilen killer dispersif kil olarak tanımlanmaktadır. Bu tip killerde koloidal kil mineralleri, diğer normal killerden farklı olarak su içinde dağılmaktadır. Eğer su içinde bulunan kil parçacıkları arasındaki elektriksel yüzey kuvvetleri taneler arasındaki çekim kuvvetlerini aşıyorsa, bağımsız kil parçacıkları zemin yüzeyinden ayrılmaktadır. Ortamda akış haline bulunan suyun bulunması durumunda ise, kil parçacıkları uzaklara taşınarak kil kütlelerinin ayrışmasına ve dağılmasına neden olmaktadır. Bu tip erozyon, özellikle dolgu barajlarda oluşan kuruma, oturma ve hidrolik çatlakların olduğu bölgelerde görülmektedir [10]. Dispersif killerin doğal erozyona uğrayabilirliği yüksek olup, bu killer yüksek oranda değişebilir sodyum katyonlarına sahiptirler. Kil yüzeyine yapışan sodyum katyonları elektriksel çekim kuvvetini en düşük seviyeye indirerek kil tanecikleri arasındaki bağları zayıflatmaktadırlar [9].

Dispersif bir kilin dağılmasında boşluk suyunda bulunan sodyum iyonunun ( $\text{Na}^+$ ) önemi büyüktür ve bu durum iyonun +1 yüklü olması ile yakından ilişkilidir [14].  $\text{Ca}^{+2}$  ve  $\text{Mg}^{+2}$  gibi iyonlar  $\text{Na}^+$  iyonu ile benzer etkiye sahip değildirler. Hidrate olmayan +2 yüklü katyonlar kil tanelerine daha sıkı tutunma eğilimi göstermektedirler [32]. Bu nedenle +2 yüklü katyonlar, kil yüzeylerinde +1 yüklü katyonlardan daha güçlü bir çekime maruz kalmaktadırlar.  $\text{Na}^+$  iyonu kil tanelerinin arasına alındığı zaman ise, itici güçler baskın olmakta ve dispersiyon meydana gelmektedir. Kil tanelerinde adsorbe haldeki katyon kalsiyum olduğunda tabakalar birbirine daha yakınken, söz konusu katyon sodyum olduğunda ise tabakalar arasındaki mesafe genişlemektedir

[33] (Şekil 2.1). Buna bağlı olarak, daha çok iyon içeren kil tabakalarının kalınlıkları artmakta ve kil parçacıkları arasındaki çekim kuvveti azalmaktadır. Dolayısıyla, çok yavaş bir su akımının varlığıyla bile kil taneleri harekete geçerek erozyona uğramaktadırlar [31].



Şekil 2.1. Kalsiyum ve sodyum moleküllerinin kil katmanındaki yeri [33].

## 2.2. Dispersiviteyi Etkileyen Faktörler

Killi toprakların dispersif erozyona uğrama eğilimi, zeminin mineralojisi, kimyası ve boşluk suyu içinde çözülmüş halde bulunan tuzların kimyasına bağlıdır [3]. Bu nedenle, dispersiviteyi etkileyen faktörlerin tanımlanması büyük önem taşımaktadır. Aşağıda bu faktörler ana hatlarıyla sunulmuştur.

### 2.2.1. Kil Yüzdesi

Killerin dispersif karakteristiklerinin belirlenmesinde kil yüzdesinin ayırt edici bir özellik olmadığı değişik çalışmalar sonucunda ortaya konulmuştur. Yapılan çalışmalar, dispersif zeminler ve dispersif olmayan zeminlerin kil yüzdesinde önemli bir fark olmadığını göstermiştir. Ancak, % 10'dan daha az kil içeren zeminlerde dispersif borulanmanın olması için yeterli kolloidal yapının olmadığı gözlenmiştir [20].

### 2.2.2. Boşluk Suyundaki Çözünmüş Tuzlar

Kil mineralleri yüzeylerindeki değişebilir sodyum yüzdesi, (Exchangeable Sodium Percent, ESP) dispersif davranışı belirleyen en önemli kimyasal faktör olarak gösterilmektedir [3]. ESP'nin % 10 olması dispersivite için başlangıç değeri olup, % 15'i geçmesi halinde ise "yüksek dispersif" olarak sınıflandırılmaktadırlar. Düşük katyon değişim kapasitesine (<15meq/100 g) ve % 6 ve daha düşük ESP değerlerine sahip killer "dispersif olmayan killer" olarak tanımlanmaktadır [20].

Sodyum adsorbsiyon oranı (Sodium Adsorption Ratio, SAR), boşluk suyundaki serbest tuzların sodyum oranını ölçmek için kullanılan bir parametredir. SAR değeri 2'den büyük olan killerin erozyona karşı duyarlı olduğu bilinmektedir [34, 35, 36]. SAR yöntemi ortamda serbest çözünmüş tuzların olduğu koşulda uygulanabilir bir yöntemdir [3].

Dispersif davranışı belirleyen diğer parametreler ise, toplam çözünmüş tuzlar (TDS, meq/l) ve sodyum yüzdesi (SY)'dir. Boşluk suyunda çözünmüş halde bulunan katyonların (Ca, Mg, Na, K) miktarı TDS olarak tanımlanırken, sodyum miktarının toplam çözünmüş tuzların miktarına oranı ise sodyum yüzdesi (% Na) olarak tanımlanmaktadır [3].

### 2.2.3. Kil Minerallerinin Türü

Her bir kil minerali grubu farklı kristal yapısına sahip olması, taşıdığı negatif yük miktarı ve buna bağlı olarak sahip olduğu katyon değişim kapasitesi değerindeki

farklılıklar nedeniyle dispersiyona ve erozyona karşı farklı davranışlar göstermektedir [37]. Dispersif özellik gösteren killerde bazı kil minerallerinin oranının diğer minerallere göre daha yüksek olduğunu belirten Sherard vd. [1] duraysızlığa uğrayan barajlardan aldıkları örnekler üzerinde X-ışını kırınım analizleri yapmışlar ve örneklerin önemli oranda montmorillonit içerdiğini belirlemişlerdir.

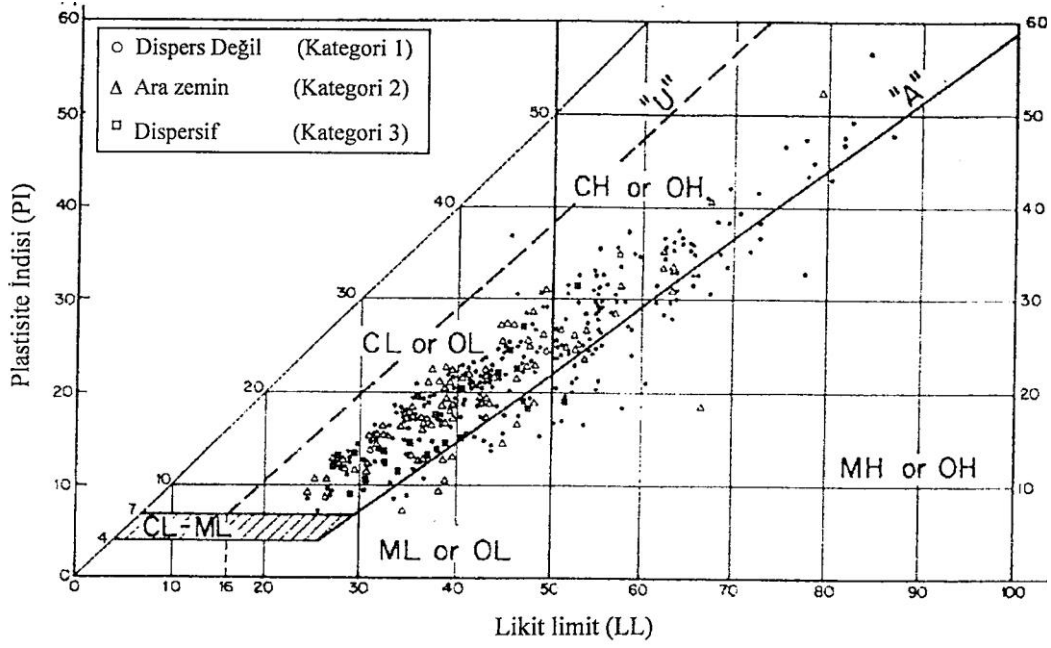
Elges [38]; dispersif killerin kalsiyum ve magnezyum içeriği düşük, albit ve amfibol gibi sodyum içeriği yüksek mineralleri içeren kayalardan türediğini belirtmiştir. Araştırmacı, zeminin içerdiği sodyumun tuzlu (denizel) ortamlarda çökelmiş çeşitli kaya tiplerinin bozunması, çeşitli çözeltilerin depolanma ortamına taşınması veya jeomorfolojik süreçler sırasında zemin profilinde tuzların depolanması sonucu ortaya çıkabileceğini ifade etmiştir. Dispersif zeminlerin çoğunun simektit ve illit türü kil minerallerini içerdiğini vurgulayan araştırmacı, kaolinit içeren killerde dispersif özelliğin görülmediğini belirtmiştir.

Bell ve Walker [22] ise, simektit içeriği yüksek olan killerin değişebilir sodyum potansiyeli (ESP) değerlerinin de yüksek olduğunu, dolayısıyla simektit ve illit içeriği ile dispersivitenin ilişkili olduğunu ifade etmişlerdir. Araştırmacılar ayrıca, çok miktarda kaolinit içeren killerde dispersivite derecesinin düşük olduğunu vurgulamışlardır.

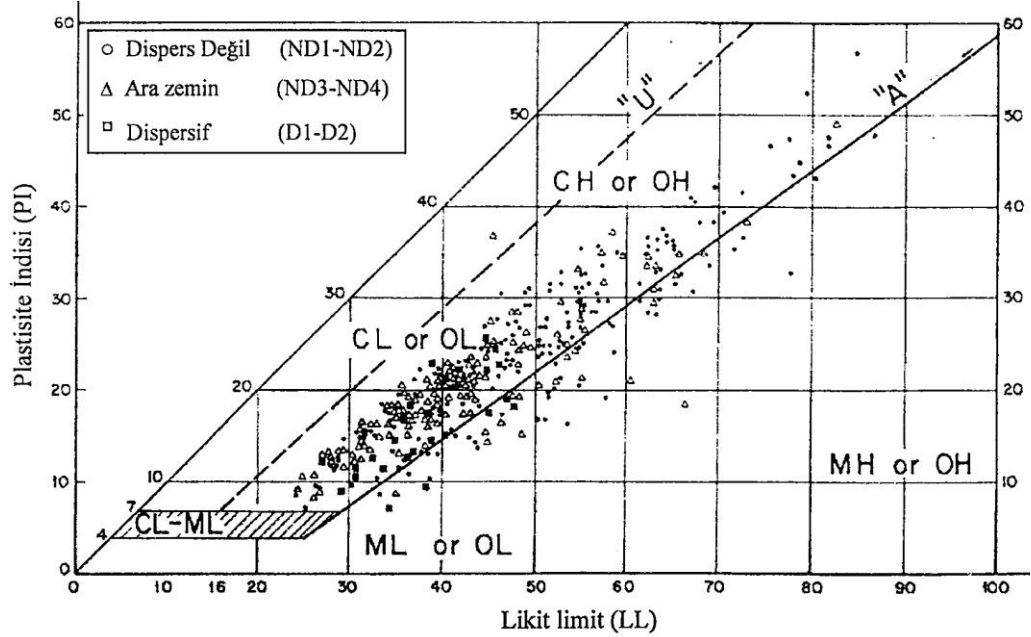
#### **2.2.4. Atterberg Limitleri ve İndeks Özellikler**

Dispersivite ile Atterberg limitleri, tane boyu dağılımı ve özgül ağırlık arasındaki ilişkiler pek çok araştırmacı tarafından çalışılmış ve sistematik bir ilişki bulunamamıştır. Sherard vd. [1], dispersif killerin likit limit, plastik limit ve birim hacim ağırlık özellikleri ile dispersivite arasında anlamlı bir ilişkinin olmadığını belirtmişlerdir. Araştırmacılar, hem yüksek, hem de düşük plastisiteli killerin dispersif özellik gösterebileceğini saptamışlardır. Sherard vd. [8], plasitite indeksi 4'ten küçük killer ile yüksek plastisiteli siltli zeminlerin dispersif özellik göstermediğini ifade etmişlerdir.

Tosun [12] Türkiye'deki barajlarda kullanılan killerin dispersivitesi ile ilgili yapmış olduğu çalışmada benzer sonuçlara ulaşmıştır. Buna göre, ara ve dispersif zeminlerin "A" hattı üzerinde ve LL= 50 çizgisinin solunda yoğunlaştığını ancak zeminin plastisitesi ile dispersivitesi arasında anlamlı bir ilişki olmadığını belirtmiştir (Şekil 2.2 ve Şekil 2.3).



Şekil 2.2. Tosun [12] tarafından incelenen dağılma deney sonuçları ve kıvam limitleri arasındaki ilişki.



Şekil 2.3. Tosun [12] tarafından incelenen iğne deliği deney sonuçları ve kıvam limitleri arasındaki ilişki.

## **2.3. Dispersif Killerin Tanımlanması**

Dispersif killerin dispersivite özelliğinin tanımlanabilmesi için fiziksel ve indeks deneylerin yeterli olmadığı yapılan çalışmalar sonucunda ortaya konmuş ve bu nedenle dispersiviteyi belirlemek amacıyla bazı deney yöntemleri geliştirilmiştir [1, 2].

### **2.3.1. Saha Tanımlamaları**

Dispersif killerin tanımlanması ilk olarak saha gözlemleri ile başlamaktadır. Bu killer çoğunlukla eğimli yamaçlarda, nehir yataklarında ve taşkın düzlüklerinde gözlenmektedirler [30]. Dispersif killerin bulunduğu eğimli topoğrafyaya sahip bölgelerde, yüzey erozyonu çıkıntılı, dolambaçlı sırtlar ve kanallar ve tünellerle karakterize edilmektedir (Şekil 2.4). Hafif engebeli ya da düzlük bölgelerde ise, siltli, kumlu birimlerden oluşan koruyucu örtü zeminin varlığı sebebiyle dispersif killer yüzeyde gözlenmemektedir [3,5]. Dispersif killer kırmızı, kahverengi, gri ve sarı renklerde olabilmektedirler. Yüksek miktarda organik bileşime sahip siyah topraklar ise, dispersif özellik göstermemektedirler. Boşluk suyunda yüksek oranda çözünmüş tuz içeren ve denizel ortamda çökelmiş kilaşı ve şeyllerin yerinde ayrışmasıyla oluşan zeminler de dispersif özellik gösterebilmektedirler. Zimbabwe’de granit ve kumtaşlarından türemiş dispersif killer de yaygın olarak gözlenmiştir [4]. Genellemek gerekirse; dispersif killer kurak-yarı kurak iklimlere özgü olup, en çok Meksika, Güney Afrika Cumhuriyeti, Avustralya, Vietnam, Tayland, Gana, Brezilya, Zimbabwe, Kenya ve Güney Amerika’da görülmektedirler [3].



Şekil 2.4. Dispersif killerden kaynaklanan erozyon duraysızlığı [27].

### 2.3.2. Laboratuvar Deneyleri

Yapı malzemesi olarak oldukça önemli bir yer tutan killerde dispersif özelliklerin klasik tanımlama ve indeks deneyleriyle belirlenmesi olanaklı değildir. Bu nedenle killerde dispersivitenin belirlenmesi amacıyla bazı deney yöntemleri geliştirilmiştir. Bu deneyler, fiziksel ve kimyasal dispersivite deneyleri olmak üzere iki gruba ayrılmaktadır.

#### 2.3.2.1. Fiziksel deneyler

Dispersif zeminleri tanımlamak için geliştirilen fiziksel deneyler çift hidrometre, dağılma ve iğne deliği deneyleridir.

##### 2.3.2.1.1. Çift hidrometre deneyi

Çift hidrometre deneyi killerin dispersivitesini belirlemek amacıyla geliştirilen ilk yöntemlerden biridir. Yöntem, 1937 yılında Volk [39] tarafından önerilmiş olup, ince taneli zeminlerin tane boyu dağılımının tayin edildiği standart hidrometre deneyi ile

birlikte kullanılarak killerin dispersivite derecesinin belirlenmesi amacıyla yapılmaktadır [3].

Deneyde, kil örneği önce standart hidrometre deneyine tabi tutulmakta ve örneğe dispersif özellik veren bir madde ilave edilerek mekanik olarak kuvvetli bir biçimde karıştırılmaktadır. Aynı zeminden ikinci kez başka bir örnek, dispersif özellik veren madde kullanılmadan ve karıştırmadan deneye tabi tutulmaktadır. Her iki örnek için tane boyu dağılımı eğrileri çizilerek, ikinci deneydeki 0,005 mm'den küçük tanelerin yüzdesi, birinci deneydekine oranlanarak dispersiyon yüzdesi bulunmaktadır (Eş. 2.1) ( Şekil 2.5).

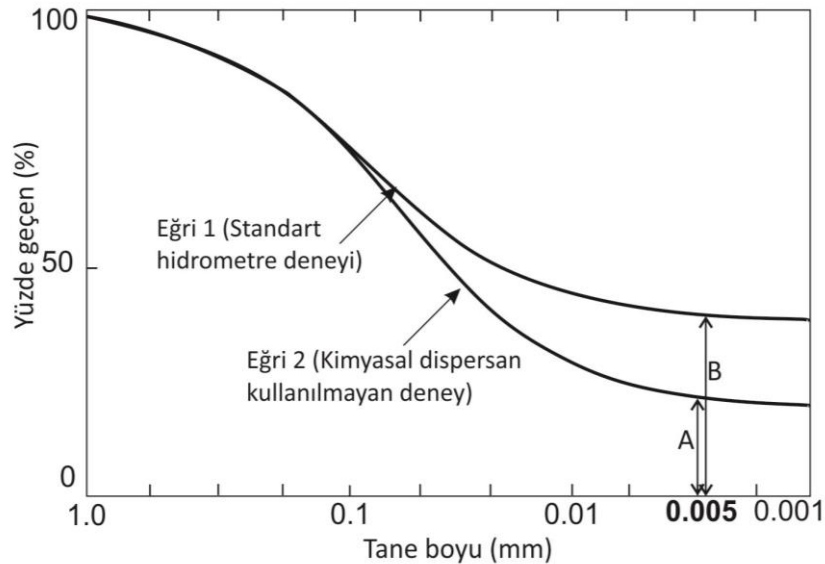
$$DY = \frac{A}{B} * 100 \quad (2.1)$$

Burada;

DY: Dispersiyon yüzdesi

A: Mekanik karıştırma ve dispersan madde kullanmadan 0,005 mm tane boyundan küçük tanelerin yüzdesi,

B: Mekanik karıştırma ve dispersan madde kullanılarak 0,005 mm tane boyundan küçük tanelerin yüzdesi'dir.



Şekil 2.5. Çift hidrometre deneyinden hesaplanan dispersiyon yüzdesi (Knodel, [3]'den).

Deney sonuçlarına göre Sherard vd. [40] tarafından önerilen dispersivite sınıflandırması (Çizelge 2.1) kullanılarak örnekler sınıflandırılmaktadır.

Çizelge 2.1. Sherard vd. [40] tarafından önerilen dispersivite sınıflandırması.

Yüzde dispersiyon	Dispersiyon derecesi
<30	Dispersif değil
30-50	Ara zemin
>50	Dispersif

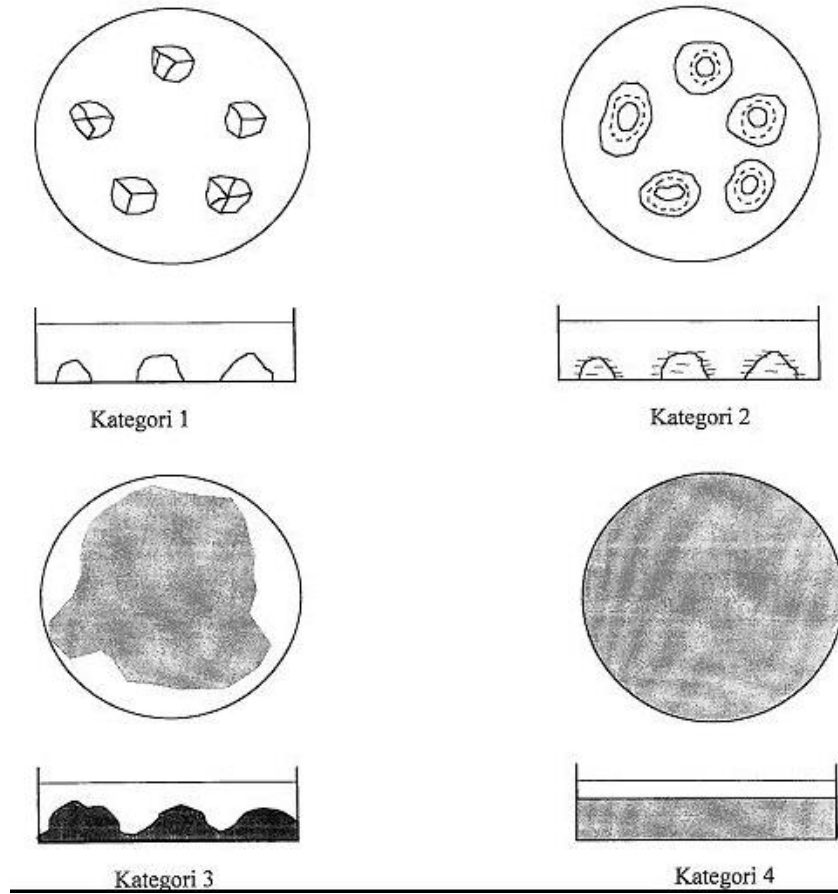
#### 2.3.2.1.2. Dağılma deneyi

Dağılma deneyi, killi örneklerin dispersif özelliklerinin gözlemsel olarak tanımlanmasında kullanılmaktadır. İlk kez, Emerson [41] tarafından önerilen ve agrega tutunma deneyi (aggregate coherence test) olarak bilinen deney, zeminin su içerisinde göstermiş olduğu reaksiyonlara göre dispersiviteyi yedi sınıfta incelemektedir. Daha sonra Sherard [8] tarafından basitleştirilen bu deneyde bazı sınıflar birleştirilerek zeminin dispersiyon özelliğine göre dört sınıf tanımlanmıştır.

Dağılma deneyinde bir kenarı 15 mm boyutunda küp şeklindeki zemin örneği su miktarı örneklerin üzerini örtecek şekilde, 250 ml saf suyun içerisine dikkatlice yerleştirilmektedir. Su Malzemenin suyla yaptığı reaksiyon ve koloidal kil parçacıklarının su içerisinde süspansiyon oluşturup oluşturmadığı 2 dakika, 1 saat ve 6 saat sürelerde gözlenmektedir. Oluşan bulanıklık derecesine göre zeminde gözlenen reaksiyonlar Çizelge 2.2' de verilen dört sınıfa göre değerlendirilmektedir. Dağılma deneyi sonucunda süspansiyonda kalan örnekler ve örneklerin gösterdiği bulanıklık derecelerine ait görüntüler ise Şekil 2.6'da verilmiştir.

Çizelge 2.2. Dağılma deneyi için önerilen dispersivite sınıflandırması [42].

Dispersivite sınıfı	Örnek reaksiyonu	Gözlem	Dispersivite sınıfı
Sınıf 1 (K1)	Reaksiyon yok	Örnek ufalanabilir, yayılabilir, dağılabilir ancak suda kolloidlerin oluşturduğu bulanıklık yoktur. Tüm taneler deney başlangıcındaki görünümünü korurlar.	Dispersif değil
Sınıf 2 (K2)	Düşük reaksiyon	Bu geçiş durumudur. Zayıf ve zor görülebilen koloidal süspansiyon örneğin hemen çevresinde suda bulanıklığa neden olur.	Orta derecede dispersif (ara zemin)
Sınıf 3 (K3)	Orta derecede reaksiyon	Zemin yüzeyinin dışının tamamının çevresindeki kil kolloidlerinin bulanıklığı kolayca görülebilir. Bulanıklık, porselen kabın dibindeki zemin çevresinden 10 mm kadar uzaklığa yayılabilir.	Dispersif zemin
Sınıf 4 (K4)	Aşırı reaksiyon	Kil kolloidlerinin çok yoğun bulanıklığı kap tabanı çevresinde görülür. Bazen, örnek dağılma dispersiyonu oldukça yaygındır. Bu nedenle, zemin dağılması ve koloidal süspansiyonun geçiş sınırını belirlemek oldukça güçtür. Çoğu zaman, koloidal süspansiyon porselen kabın kenarında kolayca görülebilir.	Yüksek dispersif zemin



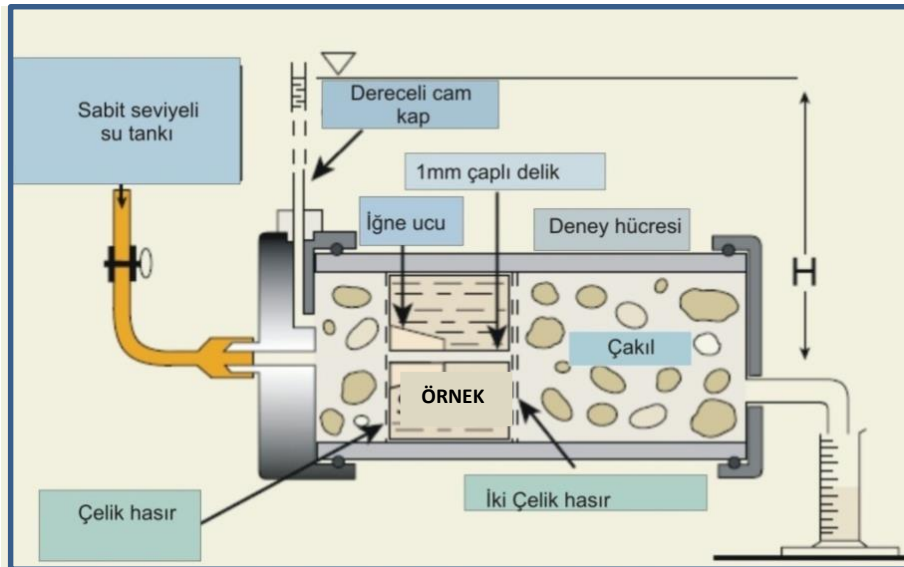
Şekil 2.6. Dağılma deneyi sonunda süspansiyonda kalan örneklere ait görüntüler [43].

### 2.3.2.1.3. İğne deliği deneyi

Bu deney, sıkıştırılmış ince taneli toprakların dispersivitesini ölçmek amacıyla Sherard vd. [8] tarafından geliştirilmiştir. İğne deliği deneyinde kil örneğindeki küçük bir delikten su akışı sağlanmakta ve bu akışla geçirimsiz çekirdek içindeki kaçak kanalı ya da kırık boyunca gerçekleşen su akışının laboratuvar ortamındaki modellenmesi (simulasyonu) amaçlanmaktadır. Deneyde dolgu yapımında kullanılacak zeminden optimum su içeriğinde sıkıştırılmış, 38 mm çapında ve 25 mm uzunluğunda silindirik bir kil örneği hazırlanmaktadır [3]. Hazırlanan zemin örneğinin merkezine açılan 1 mm çaplı iğne deliğinden belirli bir sabit hidrostatik basınç altında belirli bir süre saf su akışı sağlanmaktadır. Deneyde örnek içindeki delikten boşalan suyun bulanıklığı gözlenmekte ve farklı su yükleri (50, 180, 380 mm) altında delikten geçen suyun debisi ölçülmektedir. Örnekten çıkan suyun bulanıklığı, iğne

deliğinin çapının büyümesi ve ilk 5 dakika içinde artan debi deney örneğinin dispersif özellik taşıdığını göstermektedir [2]. Deney boyunca iğne deliği çapı değişmeyeceği için dispersif olmayan killer için ölçülen akım oranı, her bir yük için sabit kalmaktadır. [44]. Deney; ABD Su İşleri İdaresi (USBR) tarafından standart bir yöntem haline dönüştürülmüştür [45]. Ayrıca ABD ve Türk Standartları Enstitüsü'nde de konuyla ilgili standart yöntemler mevcuttur [46, 47]. Deney sırasında toplanan suyun ve ölçülen debinin kullanıldığı standarda ait değerlendirme ölçütüne göre örnekler sınıflandırılmaktadır (Çizelge 2.3). Şekil 2.7' de ASTM [46] tarafından önerilen iğne deliği deneyine ait düzenek görülmektedir.

Bu deneyin uygulanacağı zemin türüyle ilgili bazı sınırlamalar mevcuttur. Deney; tane boyu 0,005 mm'den küçük, tane miktarının %12'den büyük ve plastisite indisinin 8 veya daha büyük olduğu zeminlere uygulanabilmektedir. Zeminin 0,005 mm'den geçen miktarı %12'den az ve ya plastisite indisi 8'den daha küçük ise, bu tip zeminlerin kil koloidalleri dispersif olmasa bile, genellikle kolayca erozyona uğrayabilmektedirler. Bu ölçütleri sağlamayan örnekler üzerinde yapılan iğne deliği deneylerinin çoğunda erozyon gözlenmiş ve deney deliğinde genişleme meydana gelmiştir. Ancak bu sonuç, genellikle kil parçacıklarının dispersivitesinden değil bunların mekanik erozyonundan kaynaklanmaktadır [27].



Şekil 2.7. İğne deliği deney düzenekinin genel görüntüsü [46].

Çizelge 2.3. ASTM [46] tarafından önerilen iğne deliği deneyi değerlendirme standardı.

Seviye (mm)	Her seviyede toplam zaman (dk)	Akım oranı (ml/s)	Boşalım gözlemi	Gereken işlem	Dispersivite sınıfı
50	5	<1.0	Koyu-temiz	50 mm devam	-
50	5	1.0-1.4	Koyu-bulanık	son	D1
50	10	0.2-0.8	Temiz-az bulanık	180 mm ye yükselt	-
50	10	0.8-1.4	Koyu-az bulanık	son	D2 (1.0-1.4) ND4 (0.8-1.0)
180	5	0.6-1.2	Temiz-az bulanık	380 mm ye yükselt	-
180	5	1.2-2.8	Temiz-az bulanık	son	ND3 (1.2-2.0) ND4 (2.0-2.8)
380	5	0.8-2.4	Temiz-az bulanık	son	ND1 (0.8-1.6) ND2 (1.6-2.4)
380	5	2.4-3.2	Koyu-bulanık	son	ND3

### 2.3.2.2. Kimyasal deneyler

Dispersiyon özelliği ile kilin kimyası arasında güçlü bir ilişki bulunmaktadır [34, 35]. Dispersif davranışı denetleyen en önemli faktörlerden biri olan sodyumun varlığını sayısallaştıran temel parametre değişebilir sodyum yüzdesidir. Bu parametre, ESP (değişebilir sodyum yüzdesi) Eşitlik 2.2 kullanılarak bulunmaktadır [3].

$$ESP (\%) = \frac{Na}{CEC} * 100 \quad (2.2)$$

Burada;

ESP: Değişebilir sodyum yüzdesi

Na: Değişebilir sodyum iyonu

CEC: Katyon değişim kapasitesi 'dir.

ESP değeri 10 ve üzerinde olan ve içeriğinde serbest tuzlar barındıran killer dispersif olarak nitelendirilmektedir [34]. Buna göre, ESP değerleri esas alınarak önerilmiş dispersivite sınıflandırması [34] Çizelge 2.4'te sunulmuştur.

Çizelge 2.4. Değişebilir sodyum yüzdesi (ESP) değerleri esas alınarak yapılan dispersivite sınıflaması [34].

<b>Değişebilir sodyum yüzdesi (ESP)</b>	<b>Dispersivite sınıfı</b>
< 7	Dispersif değil
7-10	Ara zemin
>10	Dispersif

Dispersivite ile ilişkili sodyum iyonunun etkisini sayısallaştırmaya yönelik bir diğer parametre sodyum adsorbsiyon oranı (SAR)'dır (Eşitlik 2.3).

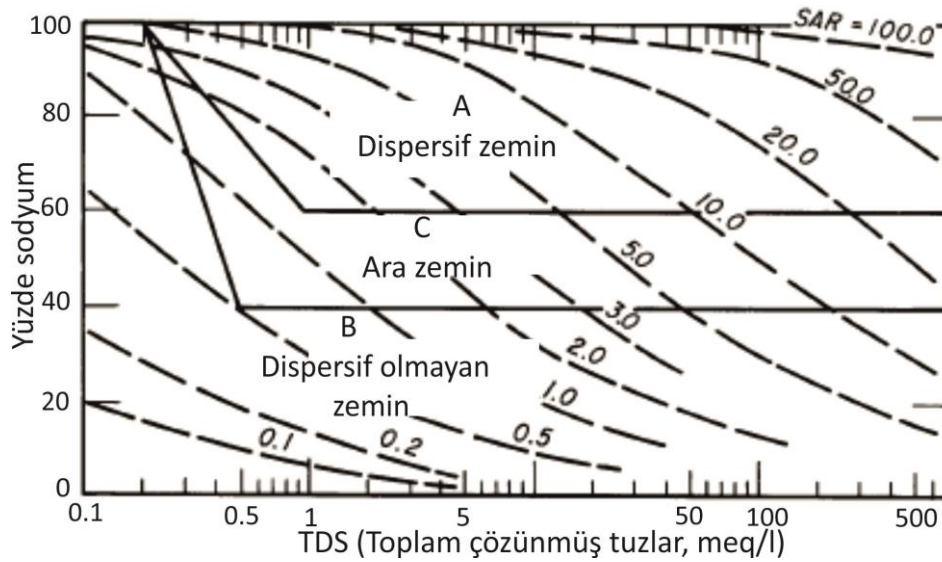
$$SAR = \frac{Na}{0.5(Ca + Mg)} \text{ (meq/l)} \quad (2.3)$$

Ortamda serbest tuzlar mevcut değilse SAR yöntemi kullanılamamaktadır. SAR yöntemi, doğada bulunan tüm killerin kendi doğal ortamları içinde dengede olmaları ilkesine dayanmaktadır [4]. Aitchison ve Wood [34], SAR değeri 2'yi aşan killi zeminlerin dispersif olduğunu öne sürmüşlerdir. Bu araştırmacıların önerdikleri SAR değerini esas alan sınıflama Çizelge 2.5'te verilmiştir. Buna göre SAR değeri 1.5 ve 2 arasında olan killi zeminler ara, 1.5'in altında olan zeminler ise dispersif olmayan zeminler olarak tanımlanmıştır.

Çizelge 2.5 SAR değerini esas alan dispersivite sınıflaması [34].

Sodyum adsorbsiyon oranı (SAR)	Dispersivite sınıflaması
<1.5	Dispersif değil
1.5-2	Ara zemin
>2	Dispersif

Şekil 2.8 'de yüzde sodyum ve toplam çözünmüş tuzlar (TDS) veri çiftleri arasındaki ilişkiye bağlı olarak önerilen [1] dispersivite abağında SAR değeri ile birlikte dispersivite sınıflarındaki değişim de görülmektedir [4].



Şekil 2.8. SAR değerleri ve TDS – SY ilişkisine bağlı olarak değişen dispersivite sınıfları [4].

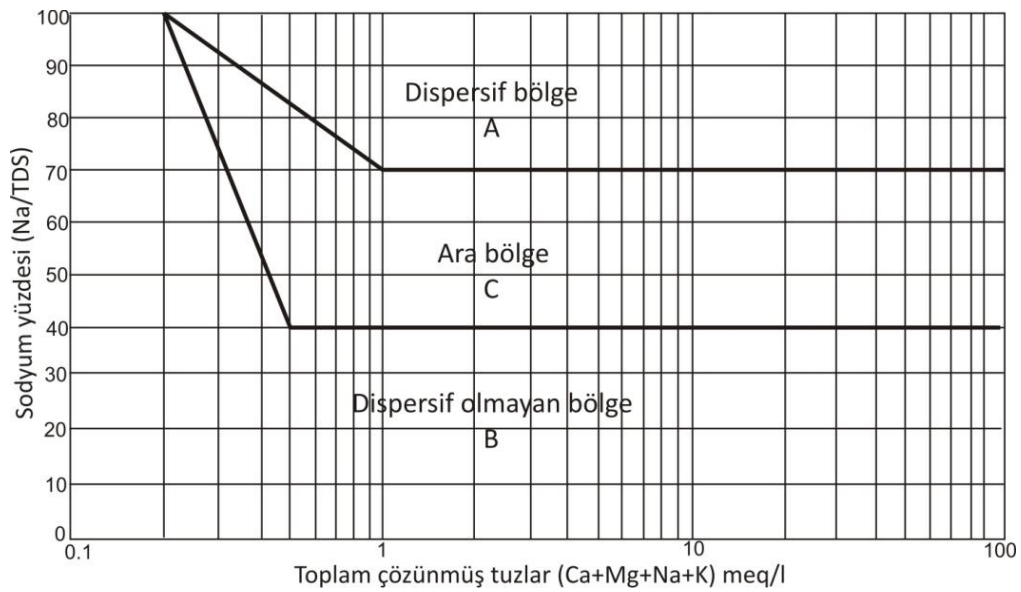
Dispersif davranış üzerinde zemin kimyasının etkisini gösteren diğer parametreler ise TDS (meq/l) ve SY'dir (Eşitlik 2.4, 2.5). Şekil 2. 9'da ise, Sherard vd. [1] tarafından TDS ve SY veri çiftlerini esas alarak önerilen dispersivite abağı görülmektedir.

$$SY(\%) = \frac{Na}{TDS} * 100 \quad (2.4)$$

$$\text{TDS (meq/l)} = \text{Na} + \text{Ca} + \text{Mg} + \text{K}$$

(2.5)

Yukarıda değinilen geçen parametrelerin belirlenmesi için, zemin örneği likit limit kıvamına gelinceye kadar saf su ile karıştırılarak vakum yardımı ile malzemeden boşluk suyu örneği alınmaktadır. Boşluk suyundaki  $\text{Ca}^{++}$ ,  $\text{Mg}^{++}$ ,  $\text{Na}^+$  ve  $\text{K}^+$  gibi katyonların miktarı kimyasal yöntemlerle meq/l cinsinden belirlenmektedir. Kilin katyon değişim kapasitesi ise (CEC: Cation Exchange Capacity), her 100 g kuru zeminde mili equivalent (meq/100gr) cinsinden belirlenmektedir. Ayrıca,  $\text{Na}^+$  katyonunun göreceli miktarı meq/100gr cinsinden elde edilmektedir [3].



Şekil 2.9. TDS ve SY değerleri esas alınarak Sherard vd. [1] tarafından önerilen dispersivite abağı.

#### 2.4. Dispersif Killerin Mühendislik Açısından Değerlendirilmesi

Dispersif killerde yapılan toprak dolgu barajlarda görülen sorunların çoğu ıslanma ile ortaya çıkmaktadır. Dispersif killeri içeren zeminlerde ve dolgularda, suyun akışına izin veren kırık ve çatlakların oluşması halinde, şevlerde yağış erozyonu, barajlarda ise borulanma gibi sorunlar yaşanmaktadır [3].

Borulanma nedeni ile gelişen duraysızlık, toprak dolgu barajlarda barajın akış yukarı kesiminden akış aşağı kesimine doğru hareket eden suyun zeminden boşalırken

zemin tanelerini de sürükleyerek ortamdan uzaklaştırması sonucu gerçekleşmektedir. Borulanma sonucunda zeminde içsel erozyon, oyulma ve boşluklar oluşmaktadır. İçsel erozyon, öncelikle kaçağın boşalım kesiminde başlayıp bölgesel bir sızıntıya neden olmaktadır. Küçük bir çatlakta başlayan sızıntı, birkaç saatte büyük çaplı tünele dönüşerek gövdede yarıma ile sonuçlanan göçmeler gerçekleşmektedir. Gövdedeki çatlaklar; plastik malzemenin kuruma ile büzülmesi, farklı oturma, deprem, hidrolik çatlak, temellerde jeolojik zayıflık ya da yetersiz sıkışma sonucu oluşabilmektedir [48, 13].

Sızıntının oluşturduğu kaçak, kanalı geçen suyun ayrıştırma etkisinden kaynaklanmaktadır. Dolgu içinde oluşan su kanalı çok küçük olmasına rağmen erozyonun başlaması için yeterlidir. Erozyon zamanla daha da artarak, su kanalı bir boru şekline dönüşebilmektedir. Bu tip erozyonal duraysızlıklar genellikle kohezyonsuz ya da düşük kohezyonlu zeminlerde görülmektedir [1].

Dispersif killerde gerçekleşen borulanma duraysızlığı ise, küçük bir kaçak ya da sızıntı kanalı boyunca suyun hareket etmesiyle kil tanelerinin dağınık bir şekilde saçınım göstermesi sonucu gerçekleşmektedir [49]. Dispersif killerde görülen borulanma göçmeleri rezervuarın ilk dolumu sırasında bir kaçak kanalı boyunca suyun ilerlemesi şeklinde gelişmekte olup, kaçak yolu boyunca erozyon artarak devam etmektedir. Kohezyonsuz zeminlerde gözlenen borulanma olayının aksine, dispersif killerdeki erozyon, kil kütlesi içindeki boşluklar boyunca gerçekleşen sızıntının bir sonucudur. Bunun için suyun akış boyunca izleyeceği bir kaçak kanalının bulunması gereklidir. Bu kanal, çok küçük bir kırık bile olsa erozyonun başlaması için yeterlidir. Dispersiyon borulanmasına olan yatkınlığı kontrol eden özelliklerden biri kil tanecikleri içindeki adsorbe olmuş Na katyonlarının diğer katyonlara oranıdır. Bir diğer faktör ise, rezervuar veya kanal suyundaki çözülmüş tuzların düşük olması ve kilin sodyum doygunluğunun artmasıdır. Dispersif killerde inşa edilen bir dolgu içinde kaçak oluşmaya başladığında sırasıyla iki ayrı olay gerçekleşmektedir:

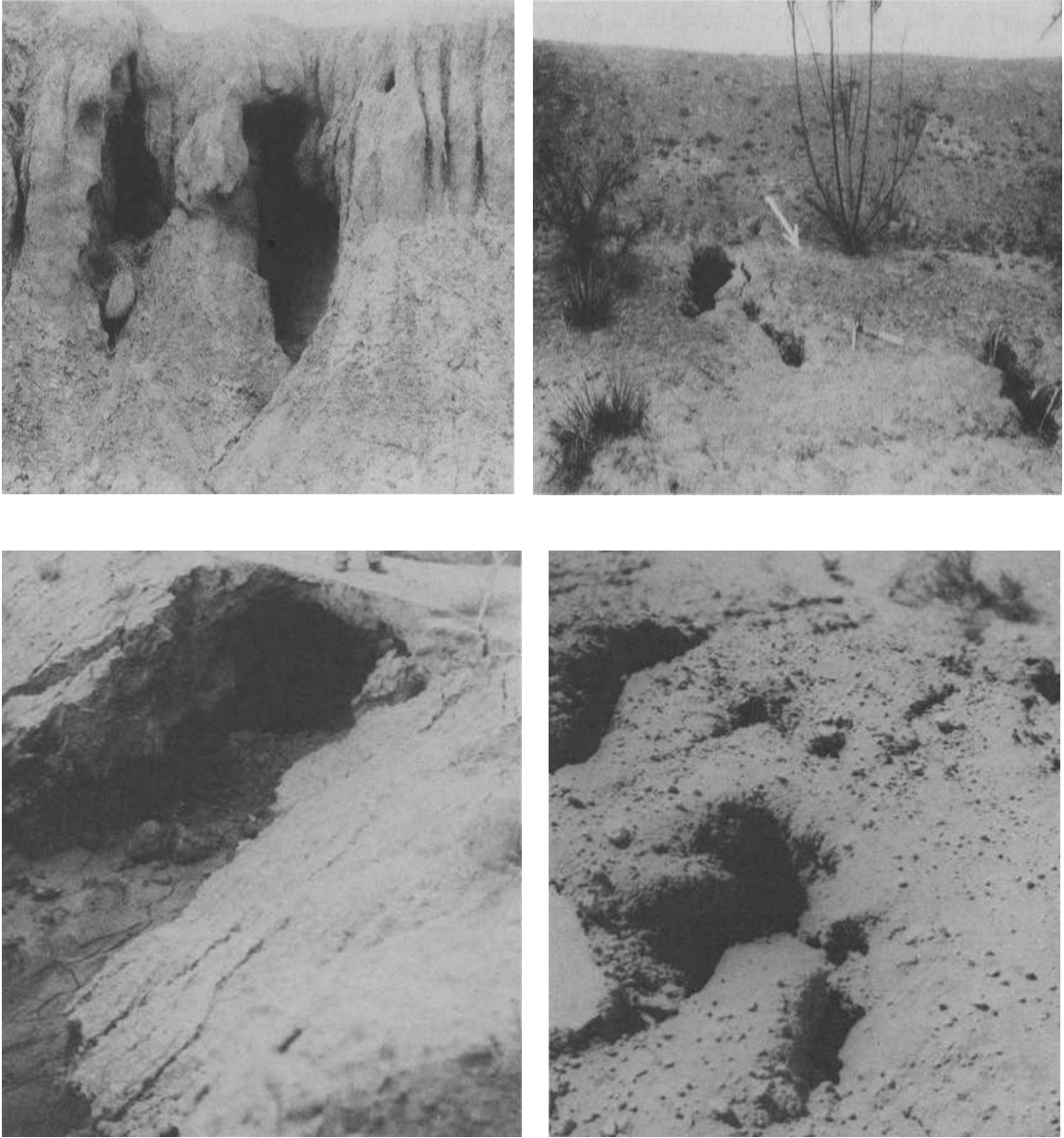
- (a) Eğer sızıntı hızı yeterince düşük ise, akış kanalını çevreleyen kil zamanla şişebilir ve akım kanalını tıkayabilir. Bu durumda kaçak önlenmiş olur.

- (b) Eğer suyun başlangıçtaki hızı yeterince yüksek ise, kil taneleri uzaklara taşınır. Kilin şişme hızından daha yüksek hızdaki akım kanalı genişletir ve sonuçta borulanmaya neden olur.

Rezervuardaki suyun iyonik konsatrasyonu önemli derecede azalırsa, daha sonraki bir zamanda borulanma oluşabilir. Avustralya'da bir baraj [bkz. 3] bu tip göçmeye en iyi örnektir. Bu barajın rezervuarı oldukça yüksek iyonik tuz konsatrasyonuna (26 meq/l) sahip su ile doldurulmuş ve sürekli sızma kayıpları olmasına rağmen, baraj uzun yıllar duraylı kalabilmiştir. Nehirden 32 km'lik boru hattıyla baraja getirilen daha düşük iyonik tuz konsatrasyonuna (1,2 meq/l) sahip su bölgeye ulaştıktan 3 gün sonra barajın yenilmesine neden olmuştur [3].

Yağış erozyonu, dispersif killerde gözlenen bir diğer sorundur. Kohezyona sahip zeminlerde yağış kaynaklı yüzey erozyonu gerçekleşmektedir. Zemin tanelerinin dağılması tabakaların erozyona uğramasına neden olmaktadır. Zeminde su ile temas halinde kuru yüzey varsa, bu durum içsel erozyona etki eden bir faktör olabilmektedir. Ayrıca, kurak dönemlerin ardından gelişen şiddetli yağmurlar ile dolgu şevleri ve bitki bulunmayan yarmalarda tünel erozyonu ve derin kanalların gelişimi gözlenmektedir. Nemli alanlardaki üst zeminde bitkiyle kaplı dispersif olmayan zeminlerdeki doğal yamaçlar genellikle düşük miktarda erozyona uğramaktadırlar. Dispersif killer, kil tanelerinin zemin profilinde aşağı doğru hareket etmesinden dolayı yamaçların eğimli bölgelerinde bulunmazlar [50].

Dispersif killerde yapılan kazılarda, kazı yan duvarlarında duraysızlık gibi bazı mühendislik sorunları oluşmaktadır. Şevin ya da kazı yan duvarlarının üst taraflarındaki kuruma çatlaklarına giren yağmur suyu, yağmur devam ettiği sürece daha derinlere sızarak yatay akışa geçmektedir. Dağılmaya uğrayan dispersif killerin taşınarak yıkanması sonucunda kazı yan duvarlarında yenilme gözlenir. ABD'nin Louisiana eyaletindeki Charles Gölü civarındaki açık kazıların yan duvarları şiddetli yağmur sonucu destek yapılmış olmasına rağmen yenilmiştir [51]. Dispersif killer ve bu killerin neden olduğu duraysızlık türlerine ait bazı görüntüler Şekil 2.10' da sunulmuştur.



Şekil 2.10. ABD'nin çeşitli eyaletlerinde dispersif killerin neden olduğu duraysızlık sorunlarına ait görüntüler [40].

Toprak dolgularda dispersif killerin yol açtığı duraysızlıkların çoğu filtre kullanılmayan homojen dolgularda gerçekleşmektedir. Borulanma nedeniyle görülen yenilmeler ise belirli bir bölgedeki kaçak boyunca gerçekleşen bölgesel olarak yoğunlaşmış sızıntı sonucu oluşmaktadır. Kum filtreleri, dolgularda gözlenen bu tür kaçakları etkin bir biçimde kontrol etmek için kullanılan iyileştirme

tekniklerinden biridir. Dispersif bir kilde görülen sızıntıyı engellemek için kullanılan filtre, süspansiyondaki kolloidal tanelerin geçişini engellemeyemez, sadece akış ile taşınan silt boyu taneler kum filtreyi geçemediği için sızıntı engellenmiş olur [52]. Sherard vd. [52] dispersif killerde filtre kullanımı ve iyileştirme tekniklerine ilişkin yaptıkları çalışmada, filtre malzemesi olarak kullanılabilir tane boyutunu belirlemişlerdir. Araştırmacılar  $D_{15}$ 'e karşılık gelen tane boyutundaki kum ve çakıllı kumdan yapılan filtrelerin;  $d_{85}$ 'e karşılık gelen tane boyutundaki killerden oluşan dispersif zeminlerde görülen sızıntıları etkin biçimde kontrol edebileceğini ifade etmişlerdir. Burada;

$D_{15}$ : Tane boyu dağılımı eğrisinde %15'den büyük tane boyları

$d_{85}$ : Tane boyu dağılımı eğrisinde %85'den küçük tane boyları olarak kullanılmıştır [52].

### 3. KİLLERİN İNDEKS VE DISPERSİF ÖZELLİKLERİ

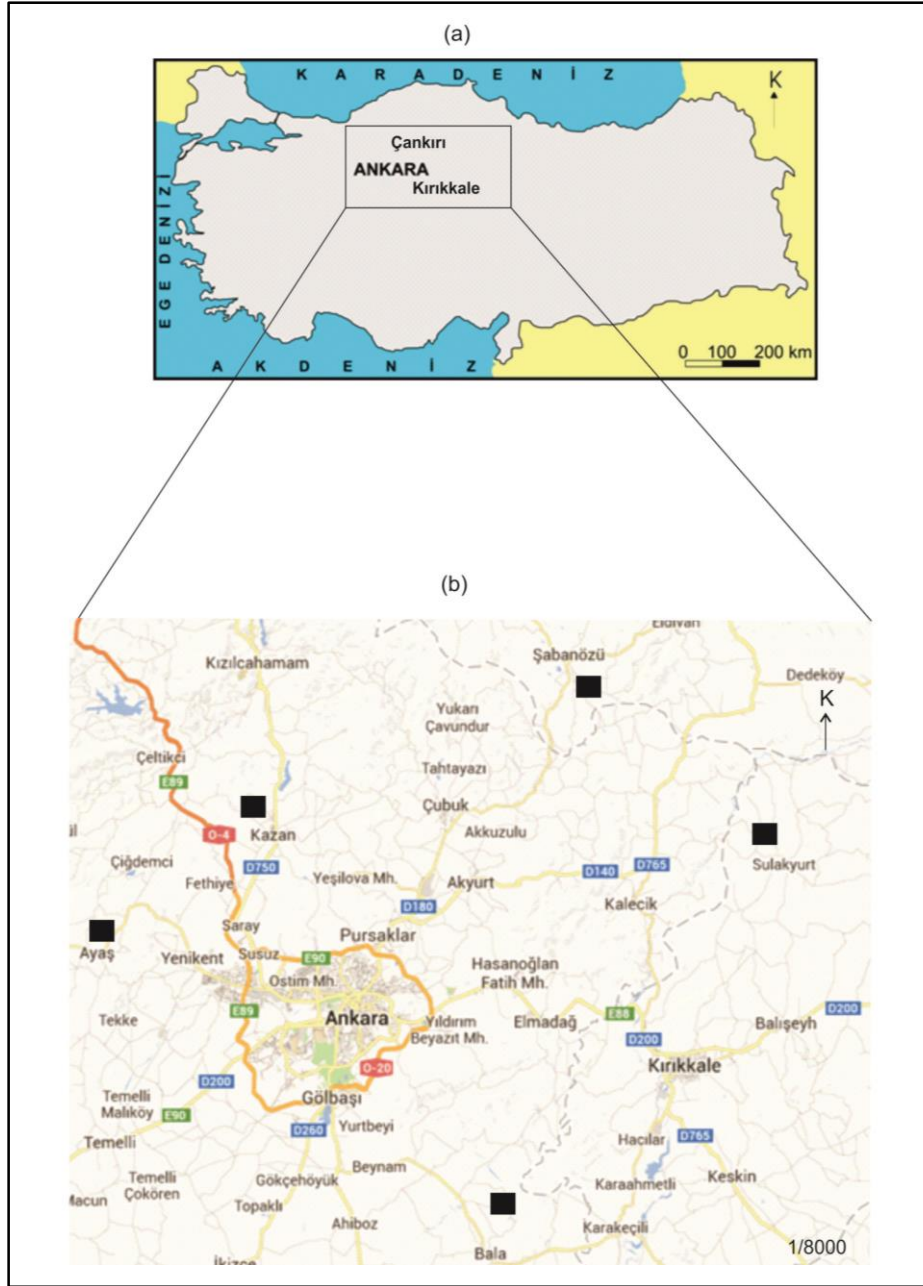
Bu bölümde öncelikle örnekleme yerleri ve sayıları belirtilmiş daha sonra incelenen örneklerin fiziksel ve indeks özellikleri ile dispersif özelliklerinin tayinine yönelik deneyler yapılmış ve sonuçları aşağıda verilmiştir.

#### 3.1. Örnekleme

Tez çalışması kapsamına incelenen örneklerin derlenmesi amacıyla öncelikle, dispersif ve ara zemin özellikleri gösteren killerin bulunduğu yerlerin belirlenebilmesi için Devlet Su İşleri (DSİ) Genel Müdürlüğü'nde konu ile ilgili çalışmalarını yürüten yetkili kişilerle görüşülmüştür. Çalışmalara ait raporların alımı için izin alınamamış olup, ilgili birimlerdeki görevlilerle yapılan sözlü görüşmeler sonucunda raporlardaki yer bulduru haritaları kullanılarak örnekleme yerleri belirlenmiştir. Buna göre Ankara ve çevresinde yer alan 5 farklı örnekleme yerinden 29 adet örselenmiş kil örneği alınmıştır. Örnek alınan yerler, Gökler ve Tekke (Ayaş), Asmaca ve Sarıgüney (Kazan), Çirpili ve Asar (Bala), Koyunbaba (Çankırı), Sulakyurt (Kırıkkale) bölgeleridir. Söz konusu yerlerden bitki örtüsü sıyrılarak 1-2 m derinliklerden örselenmiş kil örnekleri alınmıştır. Örnekleme alanının Türkiye genelindeki konumu ve örnekleme yerleri Şekil 3.1' de gösterilmiş olup, örnek alınan yerler ve örnek sayıları ile örnek numaraları ise Çizelge 3.1' de sunulmuştur.

Çizelge 3.1. Ankara civarından kil örneklerinin alındığı yerler, örnek sayıları ve örnek numaraları.

Örnekleme Yeri	Örnek Sayısı	Örnek Numarası
Gökler	4	G1, G2, G3, G4
Tekke	2	T1, T2
Asmaca	3	A1, A2, A3
Sarıgüney	2	S1, S2
Çirpili	2	Ç1, Ç2
Asar	2	AS 1, AS 2
Koyunbaba	7	K1, K2, K3, K4, K5, K6, K7
Sulakyurt	7	SY1, SY2, SY3, SY4, SY5, SY6, SY7



Şekil 3.1. (a) Örnekleme alanının Türkiye genelindeki konumu ve (b) örnek alınan yerler.

### 3.2. Fiziksel Özellikler ve İndeks Deneyler

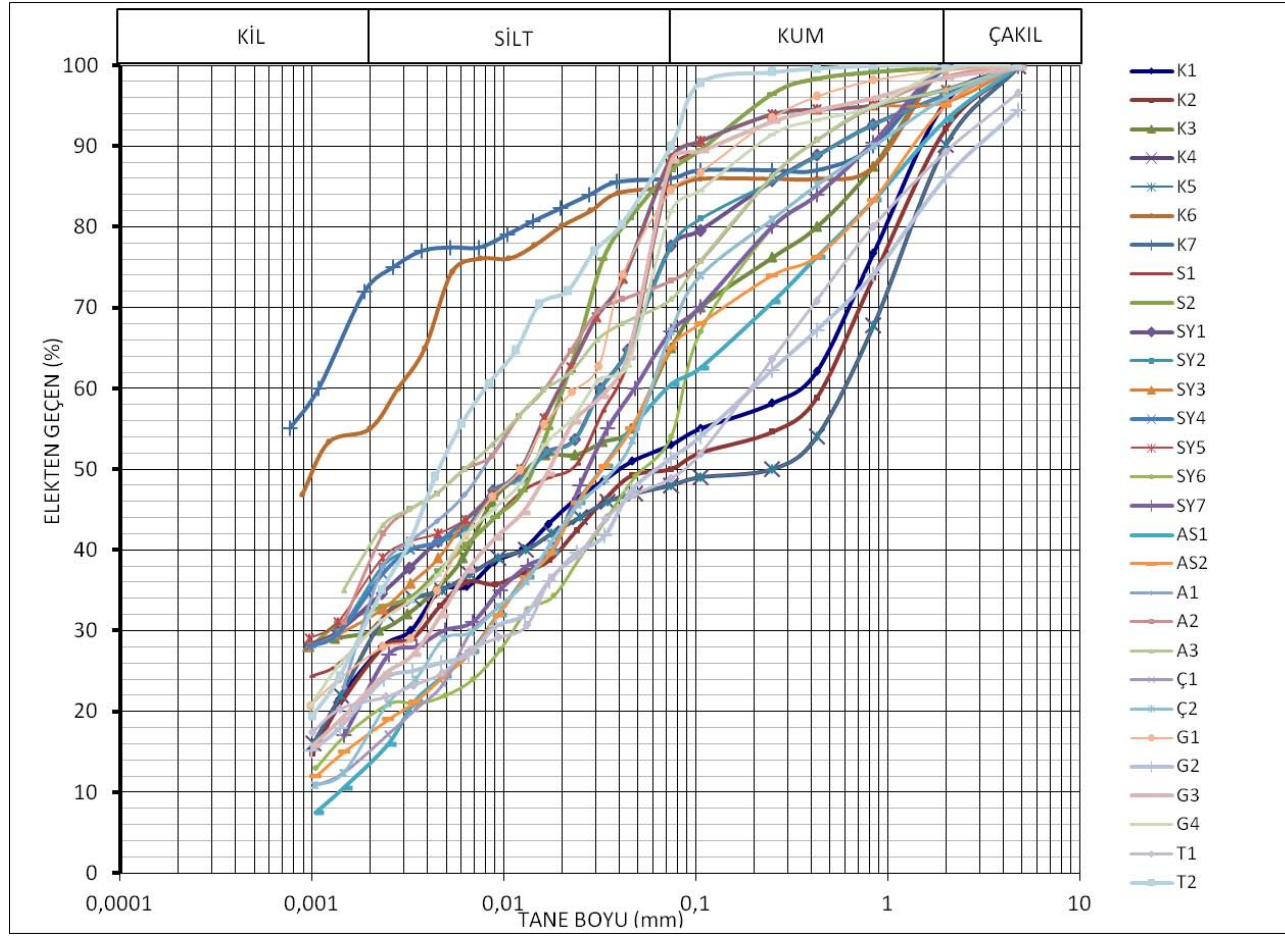
Araziden alınan 29 adet kil örneği üzerinde özgül ağırlık ve Atterberg limitleri tayinleri ile tane boyu dağılımı çözümlenmeleri yapılmıştır. Söz konusu deneyler Hacettepe Üniversitesi Jeoloji Mühendisliği Bölümü Mühendislik Jeolojisi Laboratuvarı'nda yapılmıştır. Örneklerin ASTM [42]'ye göre belirlenen özgül ağırlık ( $G_s$ ) değerleri 2.40-2.60 arasında değişmektedir. Mühendislik sınıflaması için gereksinim duyulan likit limit (LL), plastik limit (PL), büzülme limiti (SL) ve plastisite indeksi (PI) değerleri de ASTM D 422-63 (2000)'e göre belirlenmiş, ayrıca aktivite değerleri de hesaplanmıştır (Çizelge 3.2). Bunların yanı sıra, tüm örneklerin tane boyu dağılımı analizlerine ait eğriler tek bir grafikte birlikte sunulmuştur (Şekil 3.2).

İncelenen örneklerin 2 tanesi düşük plastisiteli silt, 3 tanesi yüksek plastisiteli kil olup, diğer örneklerin ise düşük plastisiteli kil oldukları belirlenmiştir. Örneklerin likit limitleri % 40 ve % 55, arasında değişirken, plastik limit değerleri ise % 21 ve % 29 arasında değişmektedir. Görüldüğü üzere kıvam limitleri dar bir aralıkta değişim göstermektedir. Örnekler aktivite açısından değerlendirildiğinde, 2 tanesinin aktif killer, 8 tanesinin normal killer ve 19 tanesinin de aktif olmayan killer sınıfında yer aldıkları anlaşılmaktadır.

Çizelge 3. 2. İncelenen örneklerin fiziksel ve indeks özellikleri.

Örnek no	Tane boyu dağılımı (%)				Kıvam limitleri (%)				Özgül ağırlık	Zemin grubu	Aktivite
	Kil	Sil	Kum	Çakıl	PL	LL	PI	SL			
K1	28	32	35	5	25	45	20	15	2.40	CL	0.71
K2	30	20	42	8	25	42	17	15	2.45	CL	0.56
K3	32	38	30	0	29	43	14	16	2.40	CL	0.43
K4	32	18	40	10	27	43	16	17	2.40	CL	0.50
K5	32	33	35	0	26	45	19	17	2.42	CL	0.59
K6	55	30	15	0	25	50	25	16	2.47	CH-CL	0.45
K7	72	16	12	0	28	55	27	17	2.42	CH	0.37
S1	30	58	12	0	26	40	14	17	2.40	ML	0.46
S2	32	55	13	0	25	42	17	17	2.40	CL	0.53
SY1	35	45	15	5	24	46	22	17	2.43	CL	0.62
SY2	37	43	15	5	24	45	19	17	2.45	CL	0.51
SY3	33	57	5	5	26	43	17	15	2.43	CL	0.51
SY4	35	52	10	3	24	43	19	16	2.50	CL	0.54
SY5	37	51	8	4	26	45	19	17	2.51	CL	0.51
SY6	20	40	40	0	25	45	20	16	2.45	CL	1.0
SY7	25	42	33	0	25	45	20	15	2.50	CL	0.80
A1	38	34	28	0	27	41	14	16	2.45	ML	0.38
A2	40	32	28	0	25	45	17	17	2.50	CL	0.42
A3	40	30	27	3	24	40	16	17	2.41	CL	0.40
G1	28	60	12	0	21	40	19	13	2.60	CL	0.67
G2	25	30	40	5	21	42	21	18	2.58	CL	0.84
G3	25	65	15	0	25	47	22	16	2.47	CL	0.88
G4	30	52	18	0	22	42	20	17	2.60	CL	0.66
T1	22	28	40	2	25	47	22	18	2.59	CL	1.0
T2	32	64	4	0	25	50	25	15	2.60	CH-CL	0.78
Ç1	15	55	25	5	22	45	23	17	2.52	CL	1.53
Ç2	18	50	27	5	21	46	25	17	2.51	CL	1.38
AS1	15	45	33	7	25	42	17	16	2.45	CL	1.13
AS2	17	48	30	5	24	44	20	17	2.42	CL	1.17

LL= Likit limit; PL= Plastik limit; PI=Plastisite indeksi; SL=Büzülme limiti



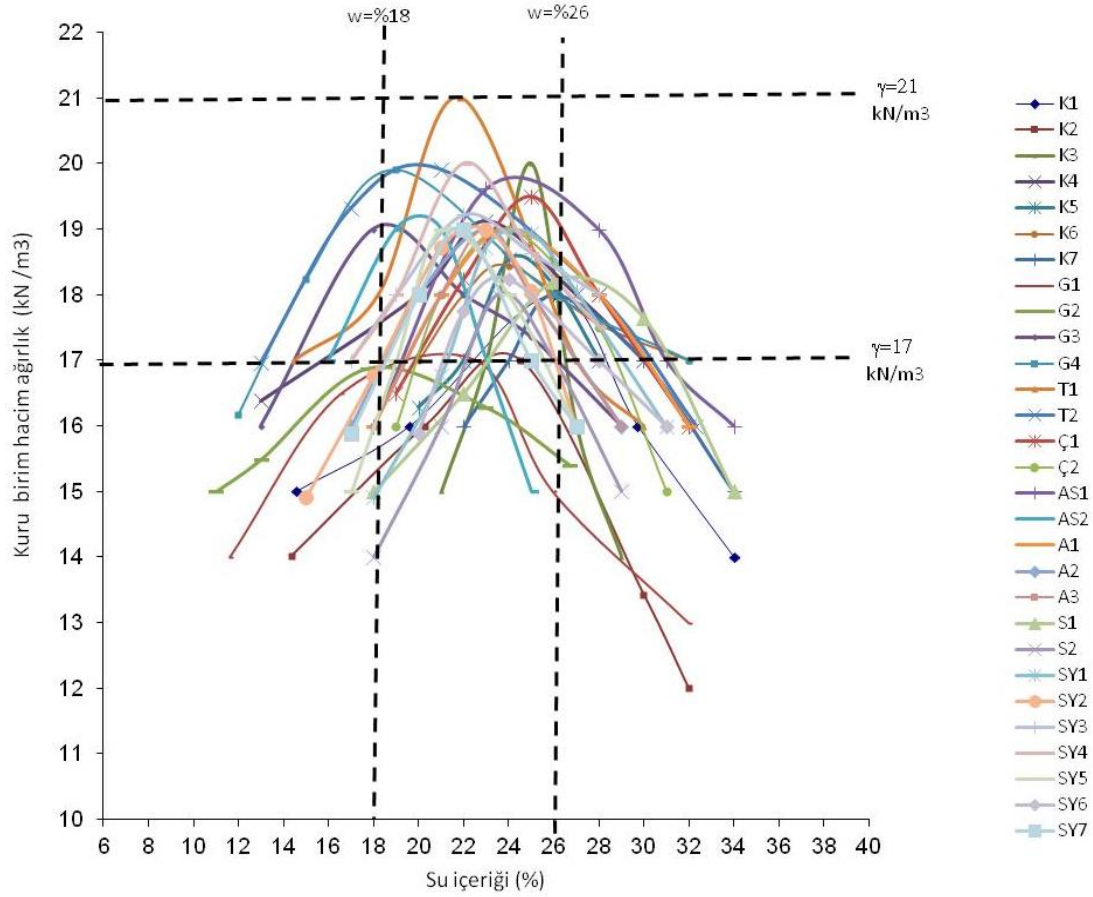
Şekil 3.2. Kil örneklerine ait tane boyu dağılımı eğrileri.

### 3.3. Kompaksiyon Deneyleri

Bu tez çalışmasında incelenen örneklerin sıkışabilirlik özelliklerinin belirlenmesi amacıyla ASTM [42] yöntemi kullanılarak standart proktor deneyleri yapılmıştır. İncelenen örneklerin optimum su içeriği değerleri ( $w$ ) %18-26 arasında değişirken, en yüksek kuru birim hacim ağırlık değerleri ise ( $\gamma$ ) 17-21 kN/m<sup>3</sup> arasında değişim göstermektedir. Tüm örneklere ait su içeriği-kuru birim hacim ağırlık değerleri Çizelge 3.3.'de su içeriği-kuru birim hacim ağırlık eğrileri ise Şekil 3.3'de verilmiştir.

Çizelge 3.3. Örneklerin su içeriği-kuru birim hacim ağırlık değerleri.

Örnek no.	Kompaksiyon karakteristikleri	
	w (%)	$\gamma$ kN/m <sup>3</sup> )
K1	26	18
K2	22	17
K3	25	20
K4	23	19
K5	24	18
K6	24	17,6
K7	26	18
S1	24	18
S2	24	18
SY1	24	19
SY2	23	19
SY3	22	19,5
SY4	23	20
SY5	21	19
SY6	24	18,5
SY7	22	19
A1	24	19
A2	23	19
A3	23	19
G1	20	17
G2	18	17
G3	19	19
G4	19	19,5
T1	19	21
T2	20	19
Ç1	25	19,5
Ç2	24	19
AS1	24	19,5
AS2	21	19



Şekil 3.3. Örneklerin su içeriği- kuru birim hacim ağırlık eğrileri.

### 3.4. Dispersivite Deneyleri

Bu tez çalışmasında incelenen kil örneklerinin dispersivite özelliklerinin belirlenmesi amacıyla fiziksel ve kimyasal dispersivite deneyleri yapılmıştır. Fiziksel deneyler kapsamında çift hidrometre, dağılma ve iğne deliği deneyleri Hacettepe Üniversitesi Jeoloji Mühendisliği Bölümü Mühendislik Jeolojisi Laboratuvarı'nda yapılmıştır. Kimyasal dispersivite deneyleri kapsamında boşluk suyu analizleri DSİ Genel Müdürlüğü, Etüt ve Tesis Planlama Daire Başkanlığı Su ve Toprak Laboratuvarı'nda yapılmıştır. Bu bölümde değinilen deneylerin tümü saf su kullanılarak yapılmış ve deneylere ilişkin sonuçlar aşağıdaki bölümlerde sunulmuştur.

### **3.4.1. Fiziksel Dispersivite Deneyleri**

#### **3.4.1.1. Çift hidrometre deneyi**

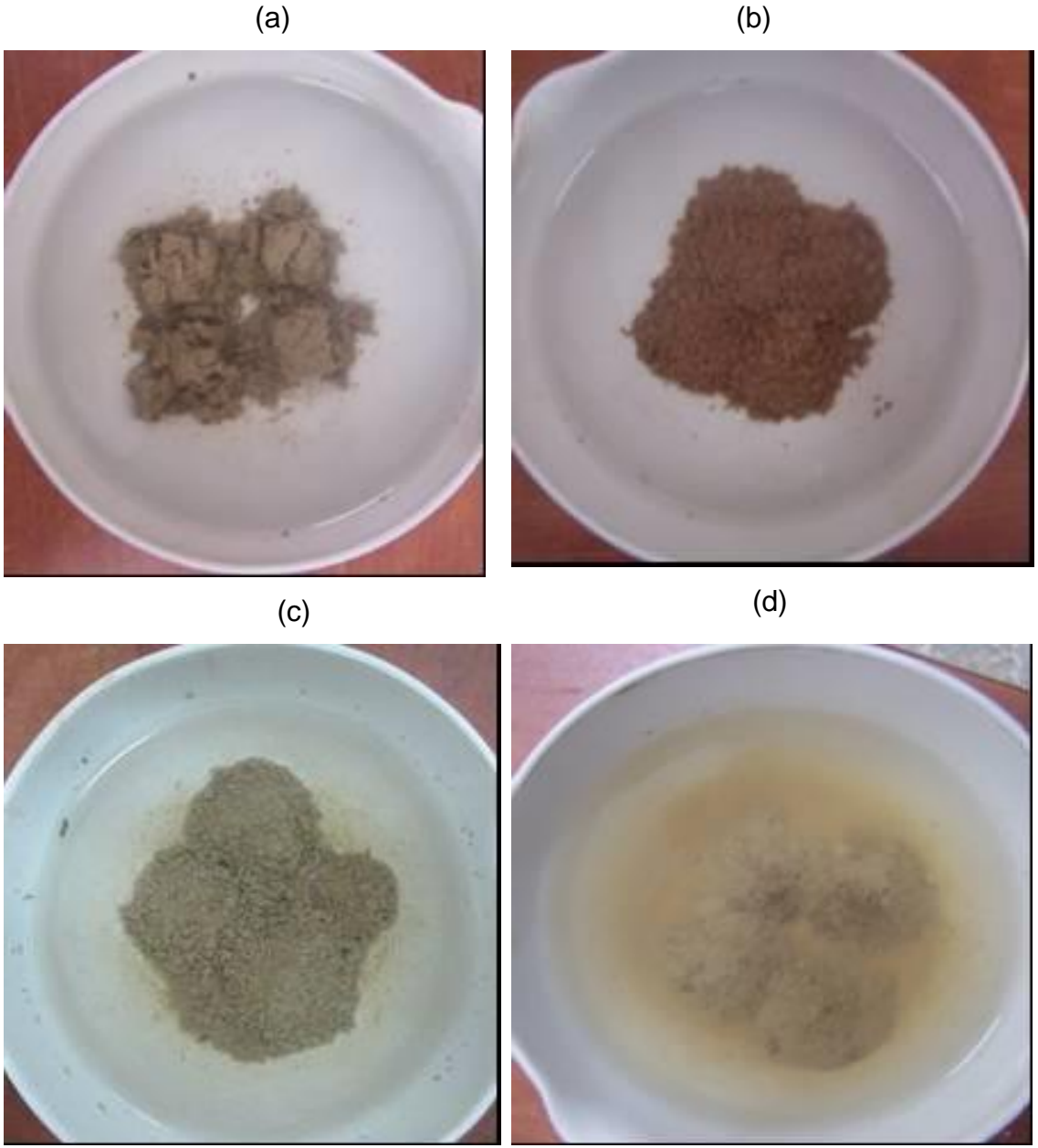
Çalışma kapsamında ASTM [42] yöntemi esas alınarak çift hidrometre deneyleri yapılmış ve örneklerle ait dispersiyon yüzdeleri ve sınıfları Sherard ve Decker [49] tarafından önerilen dispersivite sınıflandırması (Çizelge 2.1) kullanılarak belirlenmiştir. Buna göre; 26 örnek dispersif olmayan, 1 örnek ara ve 2 örnek dispersif zemin olarak tanımlanmıştır.

#### **3.4.1.2. Dağılma deneyi**

Kil örneklerinin dispersivite sınıfının belirlenmesi amacıyla fiziksel dispersivite deneylerinden biri olan dağılma deneyi ASTM [42] (Çizelge 2.2) yöntemi esas alınarak gerçekleştirilmiştir. Deney sonuçlarına göre örneklerin 23 tanesi Kategori 3 (K3, Dispersif), 3 tanesi Kategori 4 (K4, Yüksek Dispersif), 3 tanesi Kategori 2 (K2, Ara) olarak belirlenmiştir. Bazı örneklerin dağılma deneyine ait deney sonuç görüntüleri Şekil 3.4' de verilmiştir.

#### **3.4.1.3. İğne deliği deneyi**

Çalışma kapsamında ASTM [46] standardı esas alınarak tüm örnekler üzerinde iğne deliği deneyleri yapılmıştır. Deney sırasında toplanan suya bağlı olarak debi miktarları ölçülmüş, ayrıca örneklerin deney öncesi ve deney sonrası çaplarındaki değişim gözlenmiştir. Tüm değerlendirmeler esas alınarak örnekler Çizelge 2.3' de verilen standarda göre dispersivite sınıfları belirlenmiştir. Buna göre 7 örnek dispersif (D1-D2 ), 20 örnek ara (ND3-ND4), 1 örnek dispersif değil (ND1-ND2) ve 1 örnek de şişen zemin (SP) olarak sınıflandırılmıştır. Bazı örneklerin deney öncesi ve sonrası görüntüleri Şekil 3.5'te, Çizelge 3.4'te ise fiziksel dispersivite deneylerinin sonuçları görülmektedir.



Şekil 3.4. (a) K1, (b) T1, (c) S2 ve (d) G2 no.lu örneklerin dağılma deneyi sonundaki görüntüleri

(a)



(b)



(c)



(d)



Şekil 3.5. Bazı tipik örneklerin deney öncesi ve sonrası görüntüleri, (a) K6 deney öncesi, (b) K6 deney sonu,(c) S1 deney öncesi, (d) S2 deney sonu.

Çizelge 3.4. Fiziksel dispersivite deney sonuçları.

Örnek no.	Dispersiyon yüzdesi	Çift hidrometre sınıfı	İğne deliği sınıfı	Dağılım sınıfı
K1	30	ND	ND3	K2
K2	22	ND	D2	K3
K3	40	I	SP	K3
K4	14	ND	ND4	K3
K5	4	ND	ND3	K3
K6	85	D	D2	K3
K7	54	D	ND3	K4
S1	0	ND	ND4	K3
S2	0	ND	ND4	K2
SY1	17.5	ND	ND3	K3
SY2	14.5	ND	ND3	K3
SY3	15	ND	ND1	K2
SY4	15	ND	ND3	K3
SY5	16	ND	ND3	K3
SY6	4	ND	D2	K3
S77	3	ND	D2	K3
A1	0	ND	ND4	K3
A2	0	ND	ND4	K3
A3	0	ND	ND4	K3
G1	20	ND	D2	K4
G2	0	ND	ND3	K4
G3	0	ND	ND4	K3
G4	0	ND	ND4	K3
T1	0	ND	ND4	K3
T2	0	ND	ND4	K3
Ç1	4	ND	ND4	K3
Ç2	4	ND	ND3	K3
AS1	8	ND	D2	K3
AS2	6	ND	D2	K3

K1: Dispersif değil, K2: Ara zemin, K3: Dispersif, K4: Yüksek dispersif

ND1, ND2: Dispersif değil, ND3, ND4: Ara zemin, D1, D2: Dispersif, SP: Şişen zemin

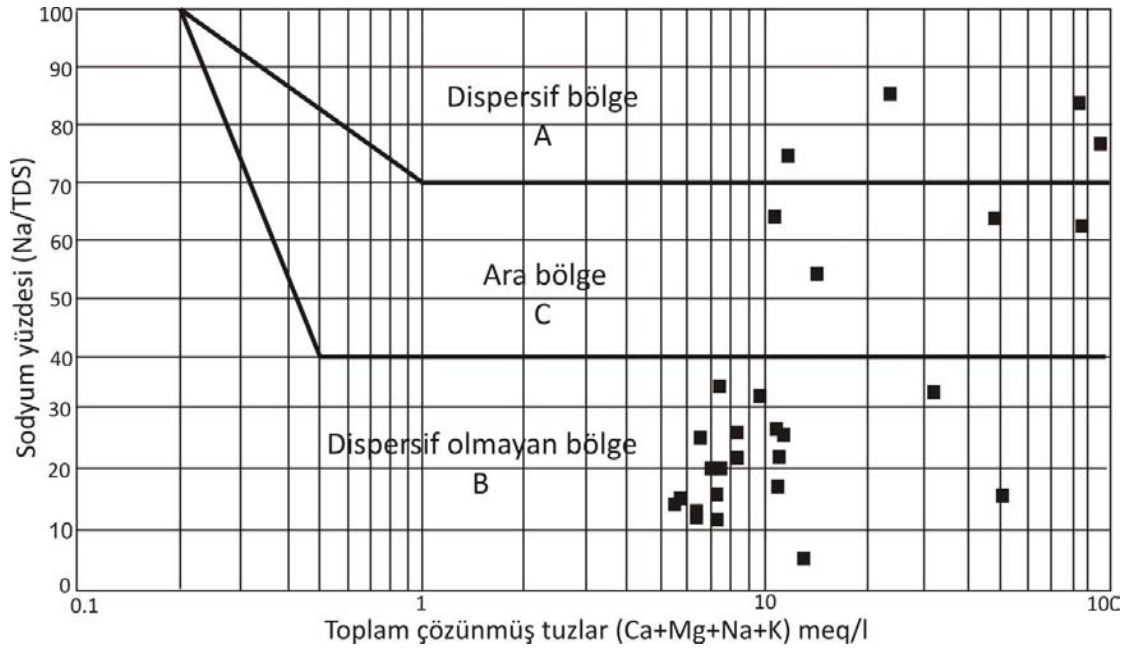
<30: Dispersif değil, 30-50: Ara zemin, >50: Dispersif

### 3.4.2. Kimyasal Dispersivite Deneyleri

Kimyasal dispersivite deneyleri kapsamında, 29 örneğe ait toplam çözünmüş tuzlar (TDS), sodyum yüzdesi (SY), sodyum adsorbsiyon oranı (SAR), değişebilir sodyum

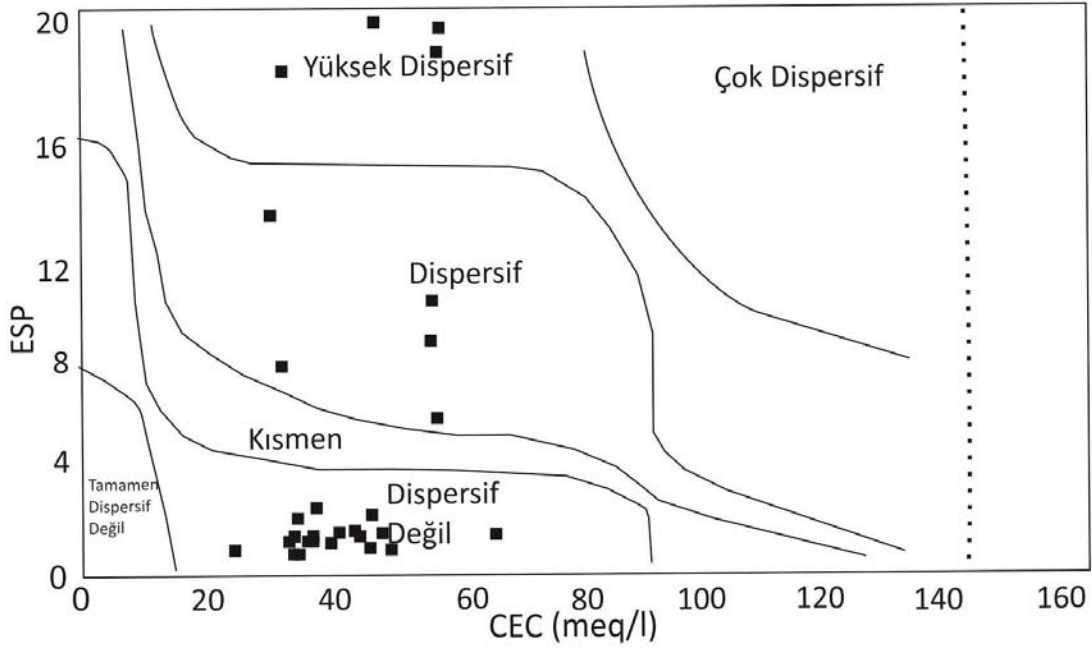
yüzdesi (ESP), değişebilir katyon kapasitesi (CEC), pH derecesi ve elektriksel iletkenlik (EC) değerleri belirlenmiştir. Elde edilen değerler Çizelge 3.5’de verilmiştir.

Tez çalışmasında incelenen kil örneklerine ait TDS ve SY veri çiftlerinin dağılımı Şekil 3.6’daki Sherard vd. [1] tarafından önerilen dispersivite abağında görülmektedir. Bu dağılıma göre örneklerin 4 tanesi dispersif, 4 tanesi ara ve 21 tanesi dispersif olmayan zemin olarak tanımlanmıştır (Çizelge 3.6).



Şekil 3.6. Sherard vd. [1] tarafından önerilen dispersivite abağında bu çalışmadaki örneklerin TDS- SY veri çiftlerinin dağılımı.

Örneklerin kimyasal dispersivite deney sonuçları Gerber ve Hamse [19] tarafından önerilen ve ESP ile CEC arasındaki ilişkiyi esas alan dispersivite abağı kullanılarak da değerlendirilmiştir. İncelenen örneklerin TDS, SY veri çiftlerinin dağılımı görülmektedir. Buna göre; örneklerin 5 tanesi dispersif, 4 tanesi yüksek dispersif ve 20 tanesi de dispersif olmayan zemin olarak sınıflandırılmıştır (Çizelge 3.6).



Şekil 3.7. Kil örneklerine ait ESP- CEC veri çiftlerinin Gerber ve Hamse [19] tarafından önerilen dispersivite abağındaki dağılımı.

Sodyum adsorbsiyon oranı (SAR) değerleri esas alınarak yapılan dispersivite sınıflamasında [34, 53] örneklerin 9 tanesi dispersif, 4 tanesi ara ve diğerleri ise dispersif olmayan zemin olarak tanımlanmıştır (Çizelge 3.6).

ESP değeri esas alınarak Aitchison ve Wood [34] tarafından önerilen dispersivite sınıflandırmasına göre ise (bkz Çizelge 2.4), örneklerin 5 tanesi dispersif, 3 tanesi ara, 21 tanesi ise dispersif olmayan zemin olarak sınıflandırılmıştır (Çizelge 3.6).

Çizelge 3.5. Boşluk suyu analiz sonuçları.

Örnek no	CEC (meq/100 g)	EC*10 <sup>3</sup> 25 <sup>o</sup> C (dSm/m)	Ekstrakt pH	TDS (meq/l)	Na (%)	SAR	ESP (%)
K1	45.20	0.701	8.28	8.90	21.01	1.03	1.88
K2	49.30	0.642	8.09	8.14	24.69	1.17	0.78
K3	54.86	0.8115	8.27	10.14	63.81	4.89	8.11
K4	46.52	0.571	8.31	7.49	19.23	0.85	1.33
K5	55.12	1.139	8.26	14.04	66.10	6.19	9.89
K6	50.16	10.080	7.84	125.33	78.82	27.72	48.12
K7	53.72	7.380	8.06	80.27	62.45	13.16	30.81
S1	38.16	0.520	8.22	6.41	10.61	0.41	1.15
S2	40.34	0.517	8.39	6.60	10.30	0.40	1.14
SY1	63.12	0.855	8.40	11.61	26.18	1.51	1.75
SY2	46.78	0.910	8.37	11.00	26.00	1.47	2.29
SY3	35.72	1.0405	8.53	13.99	6.00	0.35	0.89
SY4	39.38	0.919	8.25	11.10	17.75	0.93	1.55
SY5	36.78	0.551	8.24	7.19	18.08	0.78	1.48
SY6	49.04	0.762	8.35	9.68	32.23	1.76	1.85
SY7	56.08	2.610	8.20	32.41	33.72	3.36	5.99
A1	44.68	0.613	8.30	7.23	11.62	0.47	1.17
A2	35.90	0.419	8.05	5.57	13.11	0.48	1.23
A3	35.72	0.501	8.19	5.84	13.87	0.52	1.11
G1	29.72	1.226	8.44	12.90	77.29	8.43	12.99
G2	32.08	1.676	8.50	17.18	81.84	11.48	17.17
G3	42.86	0.797	8.09	10.33	26.72	1.44	1.69
G4	34.00	1.275	8.18	16.02	55.31	4.77	7.38
T1	39.38	0.534	8.11	6.84	26.46	1.17	2.71
T2	46.16	2.080	8.22	23.84	84.77	15.28	19.41
Ç1	35.82	0.911	8.48	11.92	22.99	1.31	0.68
Ç2	26.68	0.680	8.15	7.55	34.04	1.68	1.18
AS1	35.72	0.666	8.45	8.15	8.96	0.39	1.08
AS2	36.00	3.400	8.15	49.23	15.17	1.65	2.19

CEC: Katyon değişim kapasitesi

Na (%): Sodyum yüzdesi

EC: Elektriksel iletkenlik

SAR: Sodyum adsorbsiyon oranı

TDS: Toplam çözülmüş tuzlar

ESP: Değişebilir sodyum yüzdesi

Çizelge 3.6. Boşluk suyu analizlerine ait sonuçlar kullanılarak belirlenen dispersivite sınıfları.

Örnek no	Dispersivite Sınıflandırması			
	Sherard vd. [1]	Gerber ve Hamse [19]	Aitchison and Wood [34]	
	TDS-SY	ESP-CEC	SAR	ESP
K1	B	ND	ND	ND
K2	B	ND	ND	ND
K3	C	D	D	I
K4	B	ND	ND	ND
K5	C	D	D	I
K6	A	HD	D	D
K7	C	HD	D	D
S1	B	ND	ND	ND
S2	B	ND	ND	ND
SY1	B	ND	I	ND
SY2	B	ND	ND	ND
SY3	B	ND	ND	ND
SY4	B	ND	ND	ND
SY5	B	ND	ND	ND
SY6	B	ND	I	ND
SY7	B	D	D	ND
A1	B	ND	ND	ND
A2	B	ND	ND	ND
A3	B	ND	ND	ND
G1	A	D	D	D
G2	A	HD	D	D
G3	B	ND	ND	ND
G4	C	D	D	I
T1	B	HD	ND	ND
T2	A	ND	D	D
Ç1	B	ND	ND	ND
Ç2	B	ND	I	ND
AS1	B	ND	ND	ND
AS2	B	ND	I	ND

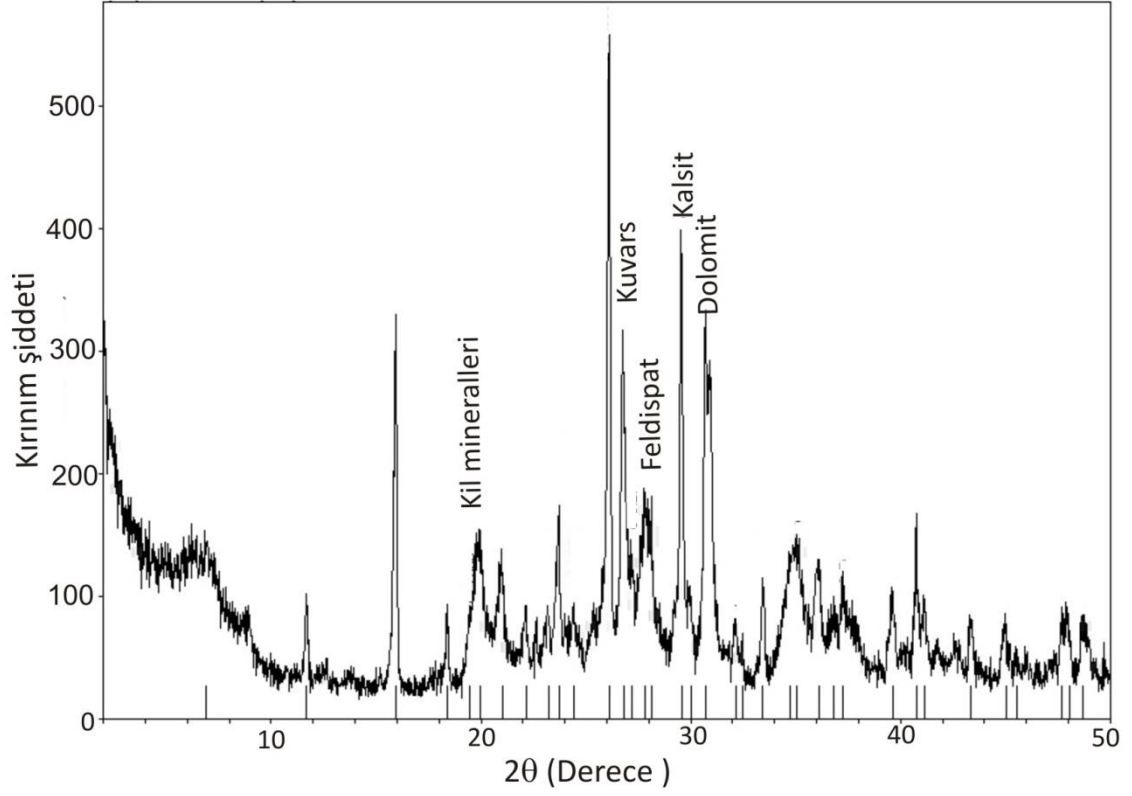
A: Dispersif, B: Dispersif değil, C: Ara zemin

ND: Dispersif değil, HD: Yüksek dispersif, D: Dispersif, I: Ara zemin

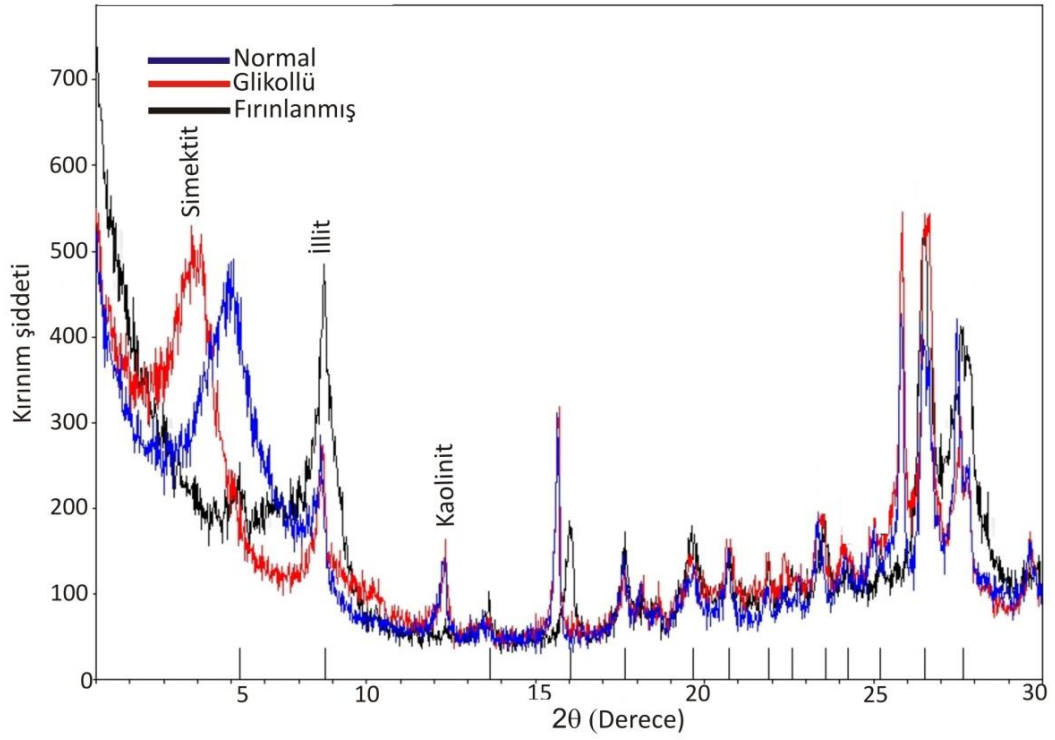


Çizelge 3.7. X-ışınları kırınım analizlerinin sonuçları.

Örnek no.	Tüm kayaç analizi (%)								Kil fraksiyonu analizi (%)			
	Kuvars	Kalsit	Feldispat	Kil	Dolomit	Aragonit	Opal	Mika	Simektit	Kaolinit	Klorit	İllit
K1	12	7	15	64	2	-	-	-	65	-	-	35
K2	10	9	12	66	3	-	-	-	76	-	-	24
K3	7	6	5	69	13	-	-	-	67	8	-	25
K4	10	4	11	73	2	-	-	-	61	6	-	33
K5	2	8	5	49	9	27	-	-	73	8	-	19
K6	2	6	5	46	8	33	-	-	53	10	-	37
K7	2	-	8	85	5	-	-	-	73	-	-	24
S1	9	30	5	56	-	-	-	-	74	4	-	22
S2	8	34	5	53	-	-	-	-	56	9	-	35
SY1	11	27	12	48	2	-	-	-	63	-	-	37
SY2	15	21	11	46	7	-	-	-	69	-	-	31
SY3	12	6	17	63	2	-	-	-	50	29	-	21
SY4	13	32	14	41	-	-	-	-	55	18	-	27
SY5	14	13	11	60	2	-	-	-	50	5	23	22
SY6	23	10	16	51	-	-	-	-	64	4	-	32
SY7	13	11	16	57	3	-	-	-	65	5	-	30
A1	6	6	35	53	-	-	-	-	64	12	-	24
A2	11	51	11	15	12	-	-	-	69	5	-	26
A3	8	26	12	52	2	-	-	-	56	21	-	23
G1	14	11	11	48	16	-	-	-	65	-	-	35
G2	11	11	19	49	10	-	-	-	57	-	-	43
G3	5	11	5	70	9	-	-	-	55	-	-	45
G4	8	9	21	54	8	-	-	-	57	-	-	43
T1	4	3	9	42	2	-	32	7	90	-	-	10
T2	9	11	13	63	4	-	-	-	30	41	14	15
Ç1	23	14	5	58	-	-	-	-	61	8	-	31
Ç2	8	2	18	69	3	-	-	-	77	4	-	19
AS1	20	11	7	56	6	-	-	-	53	5	-	42
AS2	16	6	10	64	4	-	-	-	56	11	-	33



Şekil 3.8. K6 no.lu örneğe ait X-ışınlarıyla belirlenmiş tüm kayaç difraktogramı.



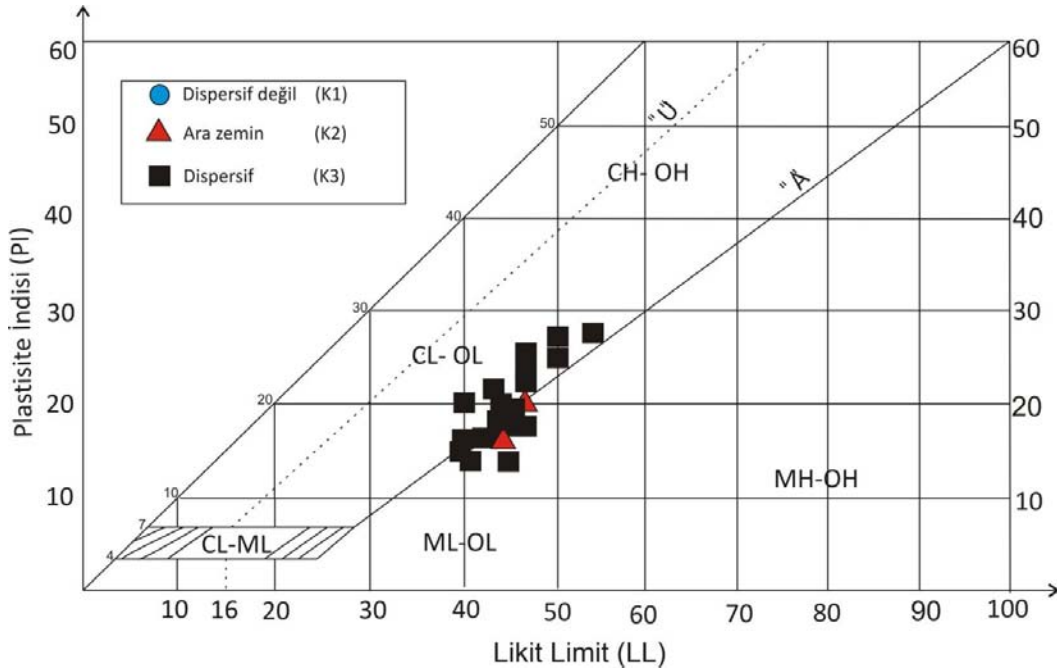
Şekil 3.9. K6 no.lu örneğe ait X-ışınlarıyla belirlenmiş kil bileşenleri difraktogramı.

## 4. DISPERSİVİTE DENEY SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ

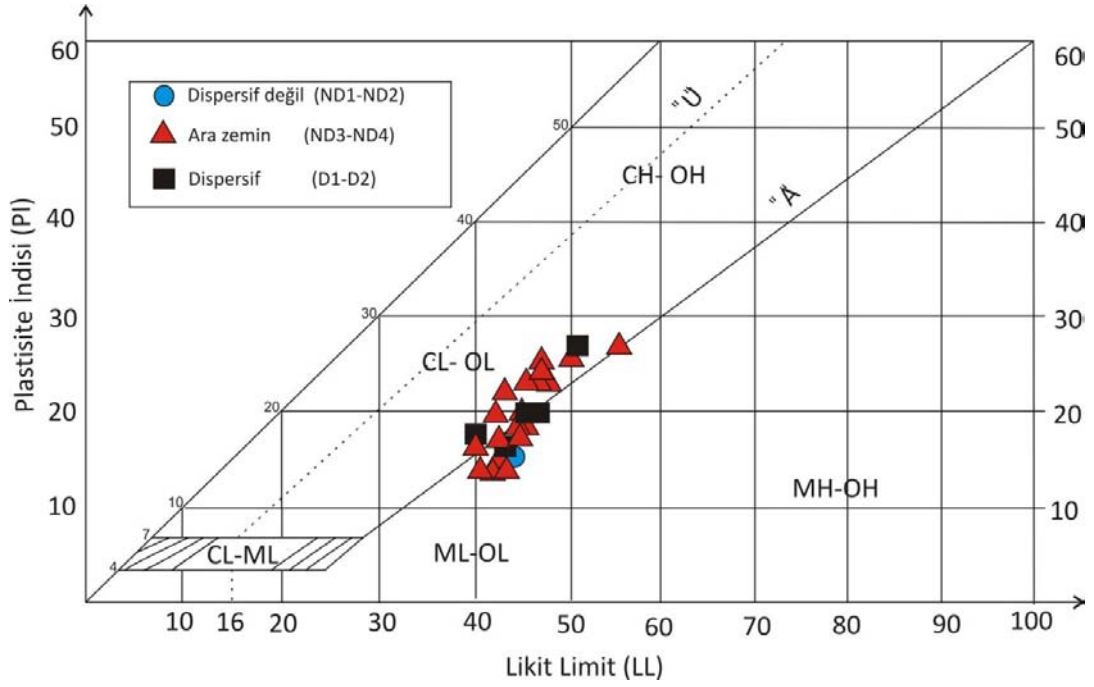
Bu bölümde örnekler üzerinde yapılmış olan fiziksel ve tanımlama deneyleri ile dispersivite deneylerine (kimyasal ve fiziksel) ait sonuçlar yorumlanmış ve karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir. Ayrıca tüm kayaç ve kil bileşeni analizlerinden elde edilen sonuçlar da dispersivite açısından yorumlanmıştır.

### 4.1. Fiziksel Deneyler

Kıvam limitleri belirlenen örnekler üzerinde iğne deliği ve dağılma deneyleri yapılarak örneklerin dispersivite dereceleri belirlenmiştir. Çalışma kapsamında, örneklerin kıvam limitleri ve dispersivite dereceleri arasındaki ilişkiler incelenmiştir. Şekil 4.1 ve 4.2'den görülebileceği gibi, dispesif ve ara zeminler A çizgisi üzerinde LL=50 çizgisinin solunda yoğunlaşmaktadır. Bu durum diğer bazı araştırmacıların [12, 15] bulgularıyla benzerlik göstermektedir.



Şekil 4.1. Dağılma deneyinden belirlenen örneklere ait dispersivite sınıflarının kıvam limitleri abağı üzerindeki dağılımları.

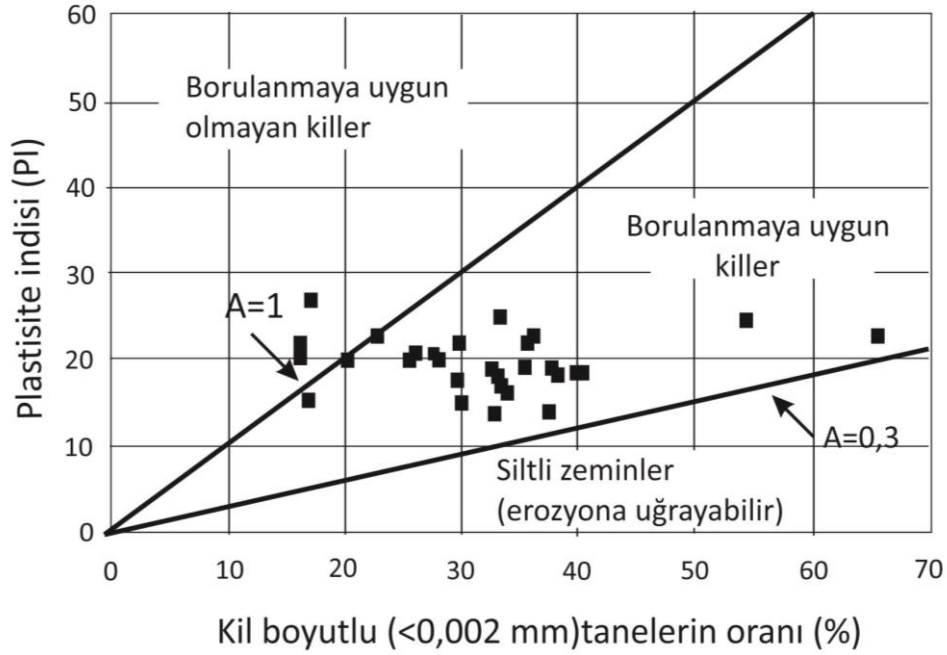


Şekil 4.2. İğne deliği deneyinden belirlenen dispersivite sınıflarının kıvam limitleri abağı üzerindeki dağılımları.

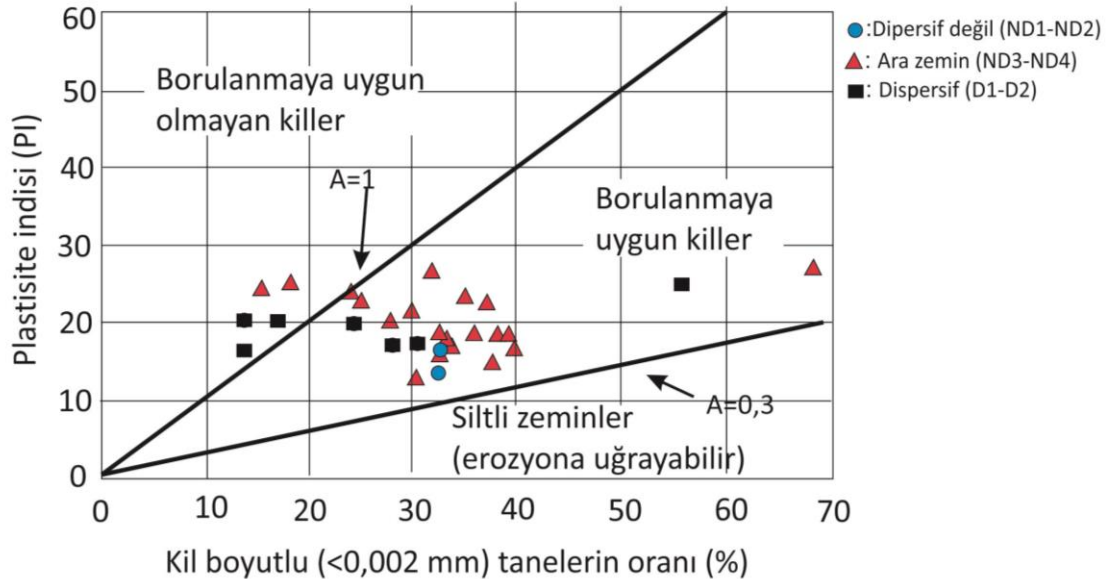
Örneklerin kil içerikleri ile plastisite indeksi değerleri birlikte ele alınarak Resendiz [56] tarafından önerilen abakta değerlendirilmiştir. Buna göre örneklerin kil yüzdeleri ile plastisite indeksi değerleri (Çizelge 3.2) abağa yerleştirilerek dispersivite özellikleri belirlenmiştir (Şekil 4.3.) Örneklerin 26 tanesi borulanmaya uygun killer sınıfında yer alırken, 3 tanesi borulanmaya uygun olmayan killer sınıfında yer almaktadır.

Resendiz [56] tarafından önerilen abağın dispersivite yönünden belirleyici olup olmadığını sınamak amacıyla iğne deliği ve dağılma deneyi sonuçlarına göre örnekler tekrar değerlendirilmiştir. İğne deliği deney sonuçlarına göre ara zemin olarak sınıflandırılan örneklerin pek çoğu borulanmaya uygun killer sınıfında yer alırken, dispersif olmayan 2 örnek borulanmaya uygun killer sınıfında yer almıştır. Dispersif olan zeminlerden 3 tanesi de borulanmaya uygun olmayan killer sınıfında çıkmıştır (Şekil 4.4.) Şekil 4.5'te dağılma deney sonuçlarına göre örneklerin Resendiz [56] abağındaki dağılımı görülmektedir. Dağılma deney sonuçlarına göre dispersif olan 4 tane zemin borulanmaya uygun olmayan killer sınıfında yer alırken, 3 tane ara zemin ise borulanmaya uygun killer sınıfında yer almaktadır. Elde edilen sonuçlar, Resendiz [56] tarafından önerilen abağın dispersiviteyi belirlemek

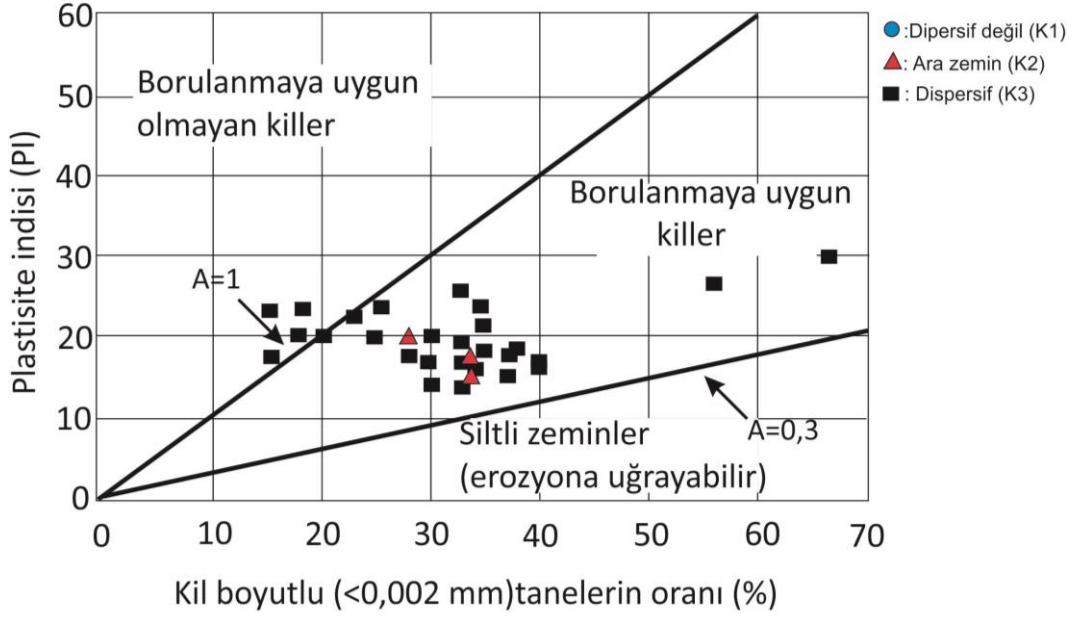
amacıyla kullanılmasının hatalı sonuçlar verebileceğini göstermiştir. Zorluer [24]'de toprak dolgu barajlar için dispersiviteyi incelediği çalışmasında benzer sonuçlar elde etmiştir.



Şekil 4.3. İncelenen örneklerin Resendiz [56] tarafından önerilen abaktaki dağılımları.



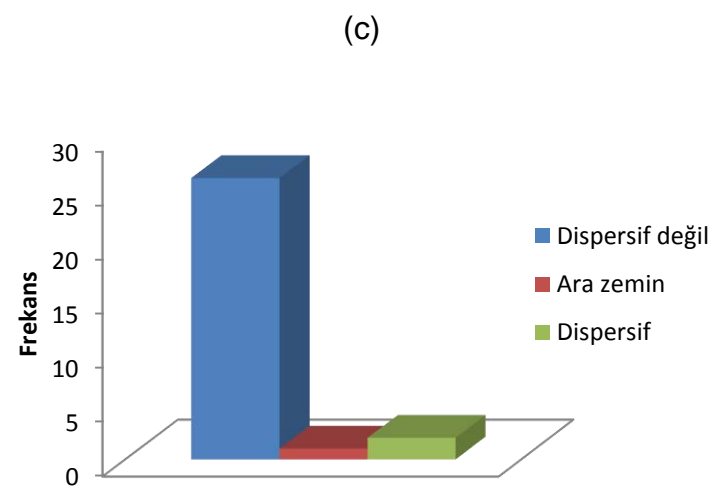
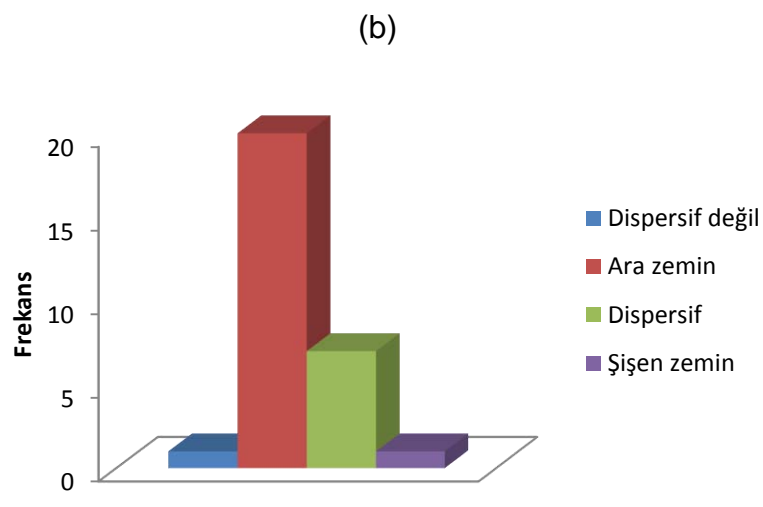
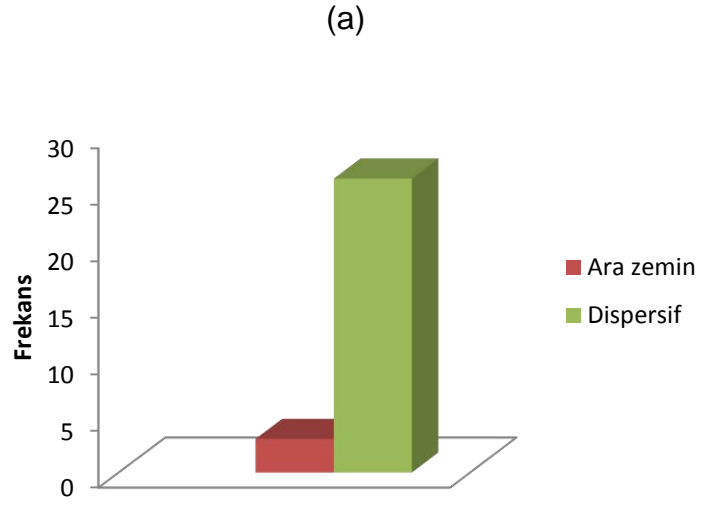
Şekil 4.4. İğne deliği deneyinden belirlenen dispersivite sınıflarının Resendiz [56] tarafından önerilen abaktaki dağılımları.



Şekil 4.5. Dağılma deneyinden belirlenen dispersivite sınıflarının Resendiz [56] tarafından önerilen abaktaki dağılımları.

Dağılma deneyinde örneklerin %89'u dispersif ve %11'i ara zemin olup, iğne deliği deneyinde bu oran sırasıyla %24 ve %69'dur. Bunun yanı sıra, iğne deliği deneyleri sonucunda dispersif olduğu belirlenen 7 örneğin tümü dağılma deneylerinde de dispersif olarak belirlenmiştir (Çizelge 3.4). İğne deliği deneyinde "dispersif olmayan zemin" grubuna giren tek örnek dağılma deneyinde "ara zemin" olarak sınıflandırılmıştır.

Çift hidrometre deney sonuçlarına göre, dağılma ve iğne deliği deneylerine oranla örnekler daha çok dispersif olmayan zemin olarak tanımlanmıştır. Buna göre, deneyde 26 örnek dispersif değil olarak tanımlanırken, 1 örnek ara zemin olarak tanımlanmış olup, dispersif olarak tanımlanan örnek sayısı ise 2'dir. Şekil 4.6' da fiziksel dispersibilite deney sonuçlarının daha net anlaşılabilmesi amacıyla hazırlanmış histogramlar verilmiştir.



Şekil 4.6. (a) Dağılıma, (b) iğne deliği, (c) çift hidrometre deney sonuçlarının histogramı.

## 4.2. Kimyasal Deneyler

Kimyasal deney sonuçlarına göre; Sherard vd. [1] tarafından önerilen TDS ve SY değerlerini esas alan dispersivite abağı kullanılarak yapılan sınıflamada incelenen 29 örnekten 4'ü dispersif, 4'ü ise ara zemin olarak tanımlanmıştır (Çizelge 3.6). Dispersif olarak tanımlanan bu 4 örneğin (G1, G2, T2, K6) Na içerikleri %77 ile %85 arasında değişirken, TDS değerleri 12 meq/l ile 125 meq/l arasında değişim göstermektedir. Ara zemin olarak tanımlanan 4 örneğin (G4, K3, K5, K7) ise Na içerikleri %55 ile %63, TDS değerleri %14 ile %80 arasında değişmektedir (Çizelge 3.5).

ESP ve CEC veri çiftleri kullanılarak Gerber ve Hamse [19] tarafından önerilen dispersivite abağıyla yapılan değerlendirmede ise, örneklerin 4 tanesi yüksek dispersif, 5 tanesi dispersif olarak belirlenmiştir. Yüksek dispersif olarak tanımlanan zeminlerin (G2, T1, K6, K7) ESP değerleri %17 ile %48 arasında değişirken; dispersif olarak tanımlanan zeminlerinki (G1, G4, K3, K5, SY7) %5 ile %13 arasında değişmektedir (Çizelge 3.5).

ESP-CEC verileri kullanılarak yapılan sınıflamada yüksek dispersif olan zeminler, TDS ve SY verileri kullanılarak yapılan sınıflamada dispersif ya da ara zemin olarak tanımlanmıştır. ESP-CEC verileri kullanılarak yapılan sınıflamada, TDS ve SY verileri kullanılarak yapılan sınıflamaya göre daha fazla sayıda dispersif örnek tanımlandığı görülmüştür. İki sınıflama yöntemi karşılıklı incelendiğinde elde edilen sonuçların birbiriyle uyumlu olduğunu söylemek mümkündür. Bu çalışma kapsamında yapılan tüm kimyasal ve fiziksel deneylerde dispersif olarak tanımlanan K6 no.lu örneğin TDS, SAR ve ESP değerleri incelenen tüm örneklerden daha yüksektir (Çizelge 3.5). Ayrıca söz konusu örneğe ait sodyum (%) ve CEC değerleri de 50 değerinin üzerinde çıkmıştır. Bu durum TDS ve sodyum iyonunun dispersibilite üzerindeki etkisini açıkça ortaya koymaktadır. Şekil 4.7' de kimyasal dispersivite deney sonuçlarının histogramı verilmiştir.

Fiziksel ve kimyasal dispersivite deneyleri arasında sonuçlar açısından zaman zaman bazı uyumsuzluklar görülebilmektedir. Bu nedenle, fiziksel dispersivite deneyleri arasında gerçeğe en yakın sonuçlar verdiği düşünülen iğne deliği

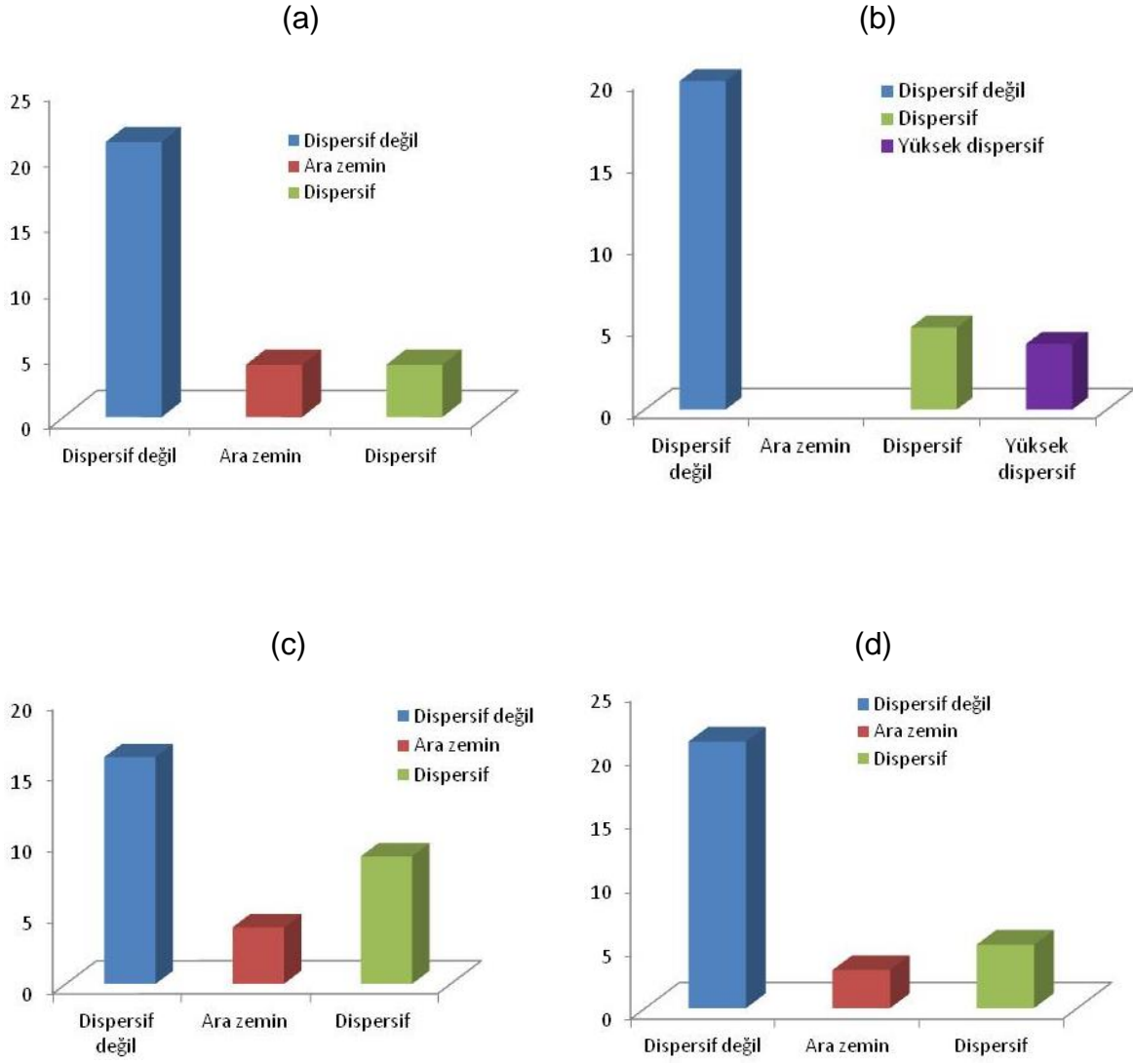
deneyinden elde edilen sonuçlar TDS-SY dispersivite abağı kullanılarak sınıflandırılmış ve fiziksel ve kimyasal yöntemler arasında bir karşılaştırma yapılmıştır. İğne deliği deneyinden elde edilen sonuçların TDS-SY ilişkisine göre dağılımları Şekil 4.8' de verilmiştir. Yapılan değerlendirmede dispersif olmayan bölgede (B) ara zeminlerin yoğunlaştığı görülmektedir. Ayrıca dispersif olarak tanımlanan 7 örnekten 5'i yine bu bölgede (B) yer alırken; 2 örnek dispersif olan bölgedeye (A) düşmektedir. Dispersif olmayan tek örnek ise, dispersif olmayan bölgede (B) görülmektedir.

Tüm bu değerlendirmelere göre, yöntemler arasında uyumsuzluk olduğunun söylenmesi mümkündür. Bu nedenle, sağlıklı sonuçlara ulaşılabilmesi için örnekler üzerinde tüm deneylerin yapılarak sonuçların birlikte yorumlanması yoluna gidilmiş olup, konuyla ilgili değerlendirmeler Bölüm 6'da verilmiştir.

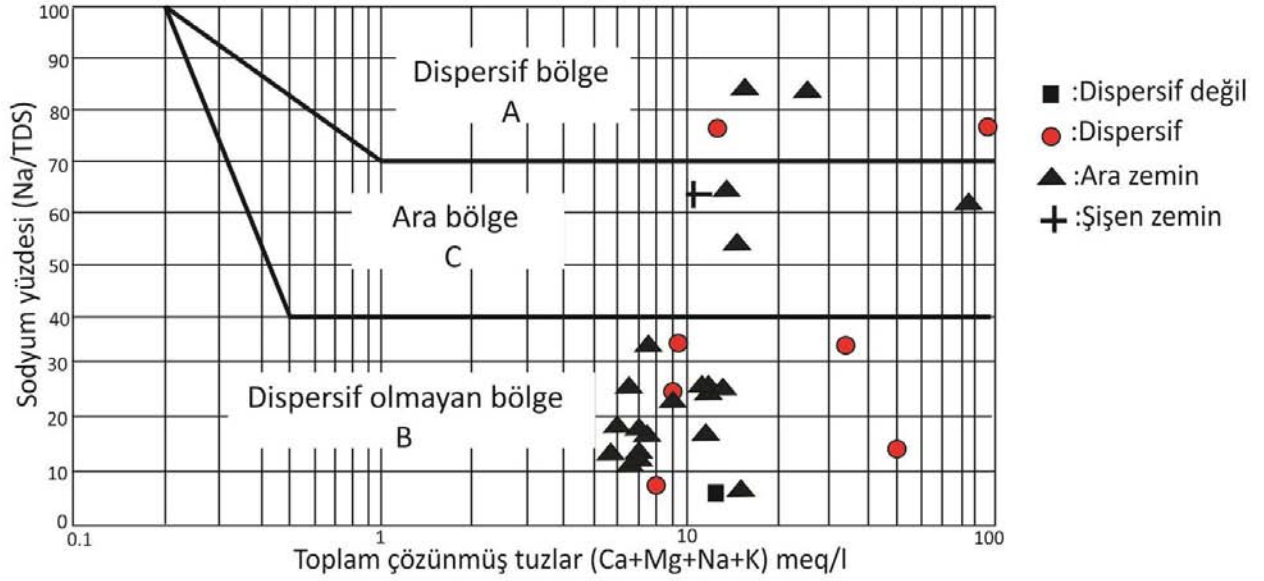
#### **4.3. Mineralojinin Dispersiviteye Etkisi**

Dispersif özellik gösteren killerin içerdiği mineraller ve kil minerallerinin türü dispersiviteyi etkileyen faktörler arasında yer almaktadır. %10'dan daha az kil içeren zeminlerde, dispersivite kaynaklı borulanmanın gelişebilmesi için yeterli düzeyde bir koloidal yapının olmadığı gözlenmiştir [20]. Bu çalışma kapsamında incelenen örneklerin tümünde kil yüzdesi %10 'un üzerinde olup % 41 ile % 73 arasında değişmektedir (Çizelge 3.7).

Bu çalışmada incelenen örneklerin tümünde simektit grubu kil mineralleri %50 ve daha fazla oranlarda yer almaktadır. Bu örneklerin tümü iğne deliği ve dağılıma deney sonuçlarına göre dispersif ve ara zemin olarak sınıflandırılmışlardır. İğne deliği, çift hidrometre ve kimyasal dispersibilite deneylerine göre dispersif olmayan zemin grubuna giren SY3 no.lu örnekte tüm örnekler arasındaki en yüksek kaolinit yüzdesi saptanmıştır. Söz konusu örneğe ait boşluk suyu analizi sonuçları örneğin tüm örnekler arasında en düşük sodyum yüzdesi ( $Na=6\%$ ) ve sodyum adsorbsiyon oranı ( $SAR=0.35$ ) değerine sahip olduğunu göstermektedir (Çizelge 3.5). Tüm fiziksel ve kimyasal deneylere göre dispersif olarak tanımlanan K6 no.lu örnekte kaolinit miktarının çok az simektit ve illit miktarlarının ise oldukça yüksek olduğu görülmüştür.



Şekil 4.7. (a) TDS-SY dispersivite abacı [1], (b) ESP-CEC dispersivite abacı [19], (c) SAR sınıflaması [34] (d) ESP sınıflaması [34] sonuçlarının histogramı.



Şekil 4.8. İğne deliği deney sonuçlarının TDS- SY dispersivite abağındaki yeri.

Bell ve Walker [22], dispersivite ve kil mineralleri arasındaki ilişkiyi araştırmış olup, simektit içeriği yüksek olan killerin ESP değerlerinin de yüksek olduğunu, dolayısıyla simektit ve illit içeriği ile dispersivitenin ilişkili olduğunu ifade etmiştir. Avustralya'daki dispersif killeri inceleyen Sherard vd. [1] ise dispersif killerin önemli oranda montmorillonit içerdiğini belirtmektedirler. Dispersif özellik gösteren killerde bazı kil minerallerinin oranının diğer minerallere göre daha yüksek olduğunu ifade eden Sherard vd. [1], inceledikleri örneklerin önemli oranda montmorillonit içerdiğini belirtmişlerdir. Bell ve Walker [22] ise, simektit içeriği yüksek olan killerin değişebilir sodyum potansiyeli (ESP) değerlerinin de yüksek olduğunu, dolayısıyla simektit ve illit içeriği ile dispersivitenin ilişkili olduğunu ifade etmişlerdir. Bu araştırmacılar ayrıca, çok miktarda kaolinit içeren killerde dispersibilite derecesinin düşük olduğunu vurgulamışlardır. Bu tez çalışmasından elde edilen sonuçlar yukarıda değinilen önceki çalışmalardan elde edilen sonuçları desteklemektedir.

## 5. SU KİMYASININ DISPERSİVİTE ÜZERİNDEKİ ETKİSİ

Konuyla ilgili olarak günümüze değin yapılan önceki çalışmalarda [1, 5, 8, 9, 12, 19, 23, 24, 25] ve dispersivitenin belirlenmesine yönelik önerilmiş yöntemler ve standartlarda [42, 45, 47, 57, 58] dispersivite deneylerinde saf su kullanılması söz konusudur. Ancak, sınırlı sayıdaki araştırmacı [14, 28] dağılma deneylerinde saf suyun yanı sıra, nehir suyu ve NaOH içeren çözeltileri de kullanmışlardır. Fernando [15] Emerson (dağılma) deneylerini farklı TDS değerlerindeki suları kullanarak yapmış ve aykırı sonuçlar veren 3 örnek dışında tüm örneklerin TDS=105 mg/l değerinden sonra dispersif olmayan zemin sınıfına geçtiklerini gözlemlemiştir. Araştırmacı çalışmasında TDS değerlerini belirleme ve değiştirme yöntemine değinmemiş olup, dispersivitenin belirlenmesi amacıyla yalnızca dağılma deneyleri yapmıştır. Bunun yanı sıra Fernando [15], TDS değerini dispersiviteyi kontrol eden tek parametre olarak ele almış ve bu değerini dispersivite üzerindeki etkisini sodyum yüzdesinin etkisini dikkate almadan değerlendirmiştir.

### 5.1. Su Kimyası Değiştirilerek Yapılan Dağılma Deneyleri

Yukarıda değinilen hususlar ve önceki çalışmalarda belirlenmiş olan sınırlamalar gözetilerek, bu tez çalışmasında dispersivitenin belirlenmesine yönelik yapılan deneylerde saf suyun yanı sıra, farklı TDS değerlerinde dağılma deneyleri de yapılmıştır. Bu amaçla, dağılma deneylerinde kullanılan suyun TDS değeri değiştirilerek söz konusu örnekler üzerinde deneyler tekrarlanmıştır. Deneyler, TDS değeri sırasıyla 50, 100, 300, 500, 1000 mg/l olarak hazırlanan çözeltiler kullanılarak yapılmıştır. Söz konusu çözeltiler, TDS değerini oluşturacak olan her bir katyonu bünyesinde barındıran ve suda çözüldüğü zaman bu katyonunu suya bırakan kimyasal bileşiklerinin saf suya ilave edilmesiyle hazırlanmıştır. TDS değerinin suda çözülmüş halde bulunan katyonların ( $\text{Na}^+$ ,  $\text{Ca}^{++}$ ,  $\text{Mg}^{++}$ ,  $\text{K}^+$ ) toplamı olduğu dikkate alınarak (bkz. Eş. 2.5) gerekli hesaplamalar yapılmıştır. Buna göre, tüm katyonların TDS değerini eşit oranda etkilediği düşünülerek, seçilen TDS değeri dörde bölünmüş ve her bir katyon için bir oran belirlenmiştir. Her bir katyon için belirlenen orana karşılık gelen kimyasal bileşik miktarı hesaplanmış ve saf suya ilave edilerek

karıştırılmıştır. Saf suya ilave edilen kimyasal bileşikler (NaCl, CaCl<sub>2</sub>, MgSO<sub>4</sub>, KCl) piyasadaki bir firmadan alınmıştır.

Standart proktor deneyleriyle tayin edilen optimum su içeriği ve en yüksek kuru birim hacim ağırlık değerlerinde (bkz. Çizelge 3.3) saf su ile sıkıştırılan örnekler üzerinde 50, 100, 300, 500 ve 1000 mg/l TDS değerlerinde hazırlanan çözeltiler kullanılarak dağılma deneyleri yapılmış ve örneklerin dispersivite derecelerindeki değişim gözlenmiştir. Dağılma deney sınıfları ASTM [42]'de belirtilen sürelerde gözlemler yapılarak tayin edilmiş olup, 2 dakika, 1 saat ve 6 saat sonunda suyun kimyasının değişimine koşut olarak örneklerin dispersivite derecelerindeki değişim belirlenmiştir. Buna göre, TDS=100 mg/l koşulunda örnekler en yüksek dispersivite derecesine ulaşmış olup, 18 örnek dispersif (K3) ve 11 örnek yüksek dispersif (K4) olarak tanımlanmıştır. Ancak TDS=100 mg/l'den itibaren, sırasıyla TDS'nin 300 ve 500 mg/l değerlerinde dispersivite derecelerinde birer derece azalma gözlenmiştir TDS=1000 mg/l değerinde ise örnekler en düşük dispersivite derecesine ulaşmış olup; 7 örnek dispersif değil (K1), 22 örnek ise ara zemin (K2) olarak tanımlanmıştır (Çizelge 5.1).

Sodyum iyonunun dispersivite üzerindeki etkisini belirlemek amacıyla dispersivite derecelerinde belirgin bir düşüşün gözlemlendiği 1000 mg/l'lik TDS değerinde hazırlanan çözeltilerle dağılma deneyleri tekrarlanmıştır. Bu amaçla söz konusu TDS değerinde iki çözelti hazırlanmıştır. Çözeltilerden ilki saf suya yalnızca NaCl eklenerek Na<sup>+</sup> katyonundaki artışla TDS değerinin değiştirildiği çözelti olup, 1 no.lu çözelti olarak adlandırılmıştır. İkinci çözelti ise, saf suya NaCl eklenmeden yalnızca CaCl<sub>2</sub>, MgSO<sub>4</sub>, KCl eklenerek Mg<sup>++</sup>, Ca<sup>++</sup>, ve K<sup>+</sup> katyonlarındaki artışla elde edilen 1000 mg/l'lik TDS değerindeki 2 no.lu çözeltilerdir. Hazırlanan iki yeni çözelti kullanılarak (1 no.lu ve 2 no.lu çözeltiler) saf su ile sıkıştırılan tüm örnekler üzerinde dağılma deneyleri yapılmıştır. Deneyler sonucunda örneklerin dispersivite derecelerinde belirgin değişiklikler gözlenmiş ve belirlenen dispersivite sınıflarına ait frekans ve yüzde dağılım değerleri Çizelge 5.1'de sunulmuştur. Buna göre, 1 no.lu çözelti kullanılarak yapılan deneylerde 14 örnek dispersif (K3), 15 örnek ise yüksek dispersif (K4) olarak tanımlanmıştır. 2 no.lu çözelti kullanılarak yapılan deneylerde 16 örnek dispersif değil (K1), 13 örnek ise ara-dispersif değil (K2-K1) olarak tanımlanmıştır. İki farklı çözelti kullanılarak saf suda sıkıştırılmış örnekler üzerinde

yapılan dağılma deneylerinden elde edilen sonuçlar karşılaştırıldığında; 1 no.lu çözelti kullanılarak yapılan deneylerde örneklerin % 52'sinin yüksek dispersif (K4) olarak tanımlandığını, 2 no.lu çözelti kullanılarak yapılan deneylerde ise, örneklerin% 55'inin dispersif olmayan zemin (K1) olarak belirlenmiştir. Farklı TDS değerine sahip çözeltiler kullanılarak yapılan dağılma deneylerinden elde edilen dispersivite sınıfları Çizelge 5.2'de sunulmuştur.

Çizelge 5.1. Farklı TDS değerlerinde yapılan dağılma deneylerinden elde edilen dispersivite sınıflarının dağılımı.

TDS (mg/l)	Dispersivite sınıfı	Frekans	Yüzde (%)
TDS=0	K2	3	10.3
	K3	23	79.3
	K4	3	10.3
	Toplam	29	100
TDS=50	K3	18	62.06
	K4	11	37.93
	Toplam	29	100
TDS=100	K3	4	13.8
	K4	25	86.2
	Toplam	29	100
TDS=300	K2	4	13.8
	K3	25	86.2
	Toplam	29	100
TDS=500	K1	4	13.8
	K2	25	86.2
	Toplam	29	100
TDS=1000	K1	7	24.1
	K2	22	75.9
	Toplam	29	100
TDS=1000 (1 no.lu çöz)	K3	16	55.2
	K4	13	44.8
	Toplam	29	100
TDS=1000 (2 no.lu çöz)	K1	14	48.3
	K2	15	51.7
	Toplam	29	100

1 no.lu çözelti: Yalnızca NaCl eklenerek Na<sup>+</sup> katyonundaki artışla elde edilen 1000 mg/lik TDS değerindeki çözelti.

2 no.lu çözelti: CaCl<sub>2</sub>, MgSO<sub>4</sub>, KCl eklenerek Mg<sup>++</sup>, Ca<sup>++</sup>, ve K<sup>+</sup> katyonlarındaki artışla elde edilen 1000 mg/l'lik TDS değerindeki çözelti.

Çizelge 5.2. Değişen TDS değerlerine göre belirlenen dağılma deneyi sınıfları.

Örnek no	TDS= 0 mg/l (saf su)	TDS=50 mg/l	TDS=100 mg/l	TDS=300 mg/l	TDS=500 mg/l	TDS=1000 mg/l	TDS=1000 mg/l (1 no.lu çözelti)	TDS=1000 mg/l (2 no.lu çözelti)
	Dispersivite sınıfı	Dispersivite sınıfı	Dispersivite sınıfı	Dispersivite sınıfı	Dispersivite sınıfı	Dispersivite sınıfı	Dispersivite sınıfı	Dispersivite sınıfı
K1	K2	K3	K4	K3	K2	K1	K3	K1
K2	K3	K3	K4	K3	K2	K2	K3	K1
K3	K3	K3	K4	K3	K2	K2	K3	K1
K4	K3	K3	K4	K3	K2	K2	K3	K1
K5	K3	K3	K4	K3	K2	K2	K4	K1-K2
K6	K3	K4	K4	K3	K2	K2	K4	K1-K2
K7	K4	K4	K4	K3	K1	K2	K4	K1-K2
S1	K3	K4	K4	K3	K2	K2	K4	K2-K1
S2	K2	K4	K4	K3	K2	K2	K4	K2-K1
SY1	K3	K3	K4	K3	K2	K2	K4	K2-K1
SY2	K3	K3	K4	K3	K2	K2	K3	K2-K1
SY3	K2	K3	K4	K2	K1	K1-K2	K4	K1
SY4	K3	K3	K4	K3	K2	K2	K3	K1
SY5	K3	K3	K3	K2	K2	K1	K3	K1
SY6	K3	K3	K3	K2	K2	K1	K3	K1
SY7	K3	K3	K3	K2	K1	K1	K3	K1
A1	K3	K4	K4	K3	K2	K2	K4	K2-K1
A2	K3	K4	K4	K3	K2	K2	K4	K2-K1
A3	K3	K4	K4	K3	K2	K2	K4	K2-K1
G1	K4	K4	K4	K3	K2	K2	K4	K2-K1
G2	K4	K4	K4	K3	K2	K2	K3	K2-K1
G3	K3	K4	K4	K3	K2	K2	K3	K2-K1
G4	K3	K4	K4	K3	K2	K2	K3	K2-K1
T1	K3	K3	K4	K3	K2	K2-K3	K4	K1
T2	K3	K3	K4	K3	K2	K2-K3	K4	K1
Ç1	K3	K3	K4	K3	K2	K2	K3	K1
Ç2	K3	K3	K4	K3	K2	K2	K3	K1
AS1	K3	K3	K4	K3	K2	K1-K2	K4	K2-K1
AS2	K3	K3	K3	K3	K2	K1-K2	K4	K2-K1

## 5.2. Su Kimyası Değiştirilerek Yapılan İğne Deliği Deneyleri

Su kimyasının dispersivite üzerindeki etkisinin belirlenmesi amacıyla dağılma deneylerinin yanı sıra, iğne deliği deneyleri de yapılmıştır. Deneyler proktor (Çizelge 3.3) deneyinden belirlenen değerlere göre saf su kullanılarak sıkıştırılan örnekler üzerinde ve farklı TDS değerlerinde hazırlanan çözeltiler kullanılarak yapılmıştır. Deneyler başlangıçta TDS değerleri 50 ve 100 mg/l olan çözeltiler kullanılarak yapılmış, ancak dağılma deneylerinden elde edilen sonuçlardan farklı olarak, TDS değerleri ile dispersivite derecesi arasında anlamlı bir ilişkinin olmadığı belirlenmiştir. Bu durumun; saf su ile sıkıştırılan örnekler üzerinde yapılan iğne deliği deneyinde en uzun sürenin 20 dakika olması ve bu süre içinde kimyası değişen suyun örnekler yeterince nüfuz edememesinden kaynaklandığı düşünülmüştür. Bu nedenle, seçilen 5 örnek üzerinde (K1, K6, SY3, G1, T2) hem sıkıştırma işleminde hem de deney sırasında TDS değeri değiştirilmiş çözeltiler kullanılarak iğne deliği ve dağılma deneyleri tekrarlanmıştır. Sodyum iyonunun dispersivite üzerindeki etkisini gözlemleyebilmek için deneylerde kullanılacak çözeltiler için TDS değeri 1000 mg/l olarak seçilmiş ve bu amaçla, seçilen TDS değerinde üç farklı çözelti hazırlanmıştır. Bunlardan ilki tüm katyonların ( $\text{Na}^+$ ,  $\text{Ca}^{++}$ ,  $\text{Mg}^{++}$ ,  $\text{K}^+$ ) suda eşit miktarda çözüldüğü kabul edilerek hazırlanan ve TDS değeri 1000 mg/l olan çözeltidir. Diğer ikisi ise, ayrıntısına Bölüm 5.1'de değinilen 1 ve 2 no.lu çözelti olarak adlandırılan çözeltilerdir. Söz konusu üç çözelti, standart proktor deneyinden elde edilen sıkışabilirlik oranları dikkate alınarak sıkıştırma işleminde kullanılmışlardır. Ayrıca, sıkıştırılan örnekler üzerinde yine aynı çözeltiler kullanılarak iğne deliği ve dağılma deneyleri de yapılmıştır.

TDS değeri 1000 mg/l olan çözelti kullanılarak yapılan deneylerden belirlenen sınıflar, 1 ve 2 no.lu çözeltiler kullanılarak yapılan deneylerden belirlenen sınıflarla karşılaştırılmıştır. Buna göre; 1 no.lu çözelti kullanılarak yapılan iğne deliği deneylerinde örneklerin dispersivite dereceleri ara zeminden (ND4-ND3) dispersif zemine (D2) geçiş gösterirken, 2 no.lu çözelti kullanılarak yapılan deneylerde seçilen örneklerin dispersivite dereceleri ara zeminden (ND4-ND3) dispersif olmayan zemine geçiş (ND2) göstermiştir. (bkz. Çizelge 5.3).

Benzer şekilde, dağılma deneyinden elde edilen dispersivite deney sınıfları da deneylerde kullanılan suda çözünmüş halde bulunan sodyum iyon konsantrasyonunun artmasına koşt olarak artış göstermiştir (Çizelge 5.4). Bu durum deneylerde kullanılan suyun TDS değerinin, sodyum iyon konsantrasyonu ile birlikte dispersivite derecesini kontrol ettiğini göstermektedir. Değişen TDS değerlerine karşı dağılma ve iğne deliği deneylerinden belirlenen dispersivite sınıflarına ait karşılaştırmalı grafik Şekil 5.1' de verilmiştir.

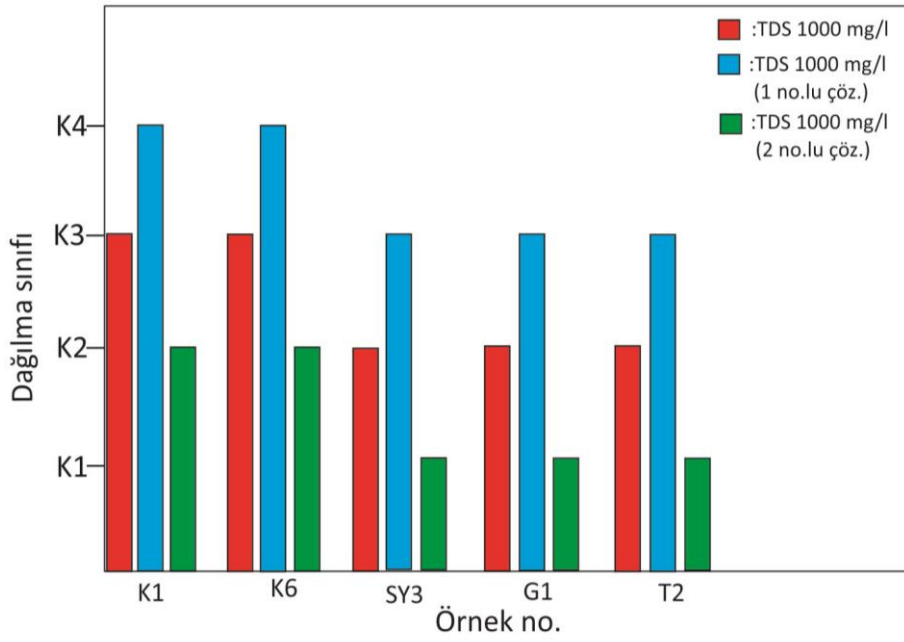
Çizelge 5.3. Farklı TDS değerlerindeki çözeltilerle yapılan iğne deliği deneylerinden belirlenen dispersivite sınıfları.

Örnek no	TDS=1000 mg/l	TDS =1000 mg/l (1 no.lu çözelti)	TDS= 1000 mg/l (2 no.lu çözelti)
	Dispersivite sınıfı	Dispersivite sınıfı	Dispersivite sınıfı
K.1	ND4	D2	ND3
K6	ND3	D2	ND3
SY3	ND4	D2	ND2
G1	ND3	D2	ND2
T2	ND3	D2	ND4

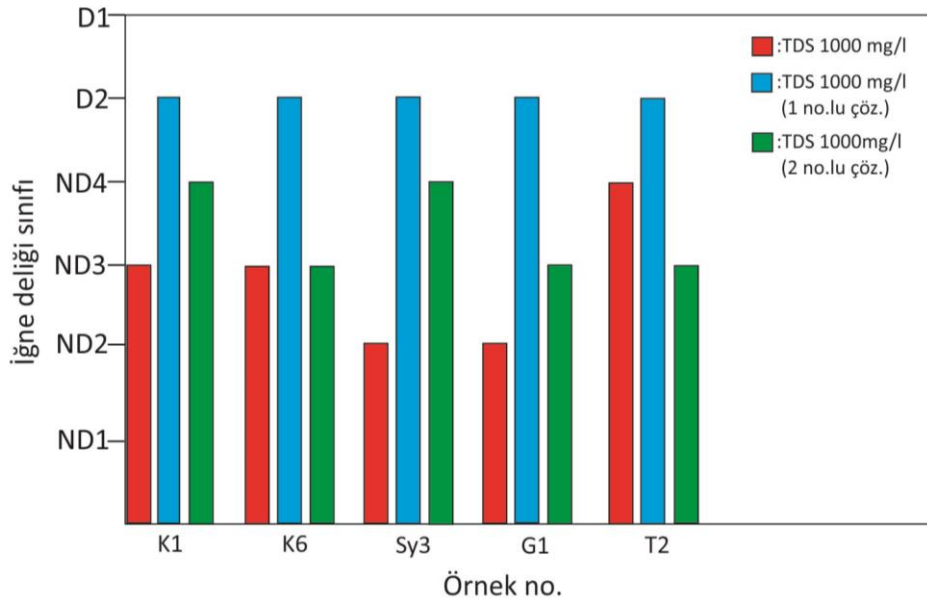
Çizelge 5.4. Farklı TDS değerlerindeki çözeltilerle yapılan dağılma deneylerinden belirlenen dispersivite sınıfları.

Örnek no	TDS=1000 mg/l	TDS =1000 mg/l (1 no.lu çözelti)	TDS= 1000 mg/l (2 no.lu çözelti)
	Dispersivite sınıfı	Dispersivite sınıfı	Dispersivite sınıfı
K1	K2-K3	K4	K2
K6	K2	K4	K2
SY3	K2-K3	K3-K4	K1
G1	K2-K3	K3-K4	K1
T2	K2	K3	K1-K2

(a)



(b)

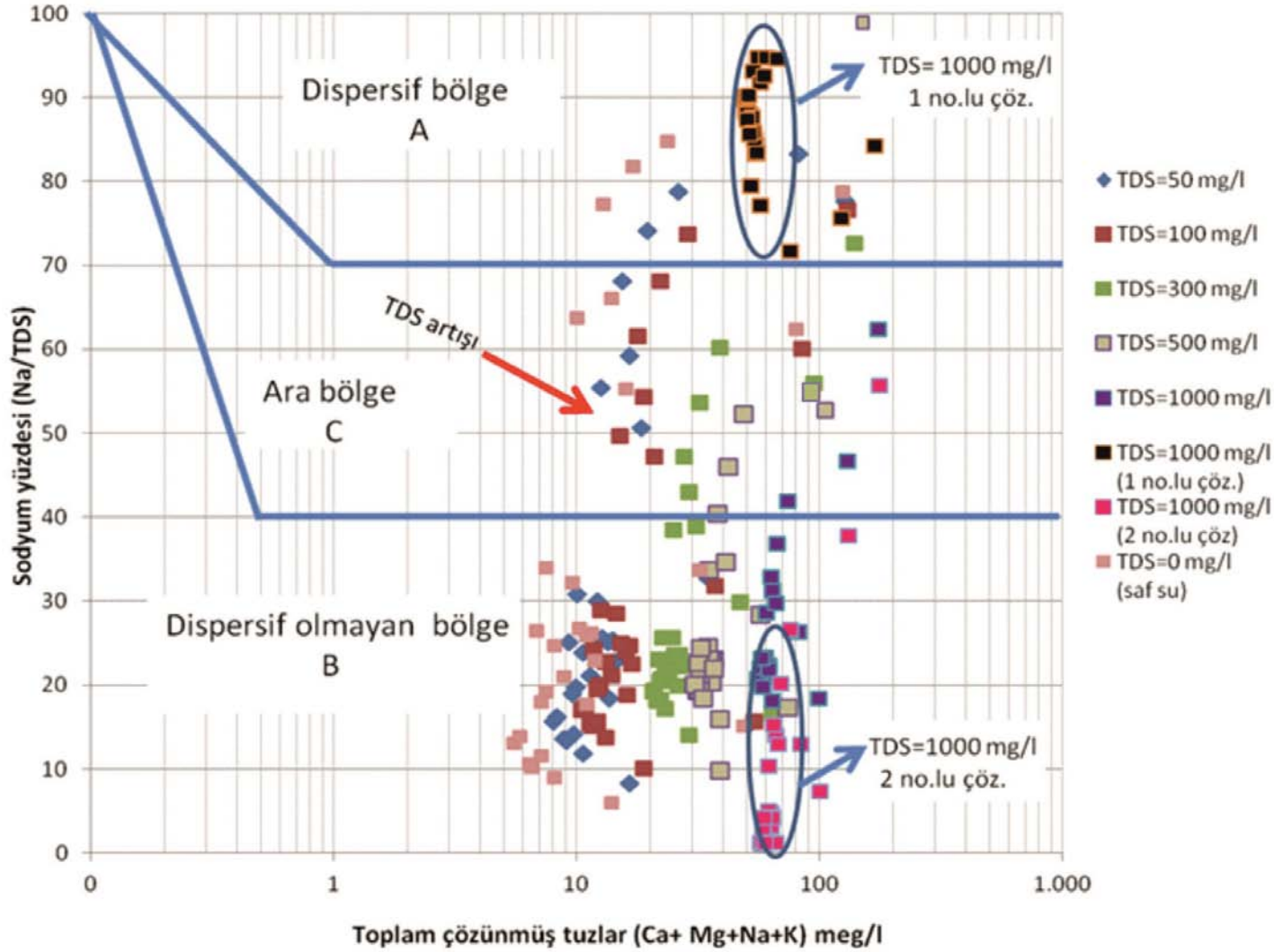


Şekil 5.1. Farklı TDS değerlerindeki çözeltilerle yapılan (a) dağılıma ve (b) iğne deliği deneylerinden belirlenen dispersivite sınıflarının histogramları.

### 5.3. Değerlendirme

Bir önceki alt bölümde değinildiği gibi, dağılma deneylerinde farklı TDS değerlerine sahip çözeltilerin kullanılması dispersivite derecelerini değiştirmiştir. Dispersivite derecesindeki değişimin daha net bir biçimde ortaya konması için, farklı TDS değerine sahip çözeltiler kullanılarak dağılma deneylerine tabi tutulan örneklere ait veri çiftleri Sherard vd. [1] tarafından önerilen dispersivite abağına yerleştirilmiştir. Deneylerde kullanılan farklı TDS değerine sahip çözeltiler (bkz. Çizelge 5.2) örneklerin boşluk suyu analizinden (bkz. Çizelge 3.5) belirlenen TDS ve yüzde sodyum değerlerini değiştirmiştir. Deneylerde kullanılan çözeltilere ait TDS değerleri esas alınarak, örneklerin boşluk suyu analizinden belirlenen TDS ve yüzde sodyum değerleri yeniden hesaplanmıştır. Buna göre 50, 100, 300, 500 ve 1000 mg/l'lik TDS değerlerinde hazırlanan çözeltiler için her örneğin TDS ve yüzde sodyum değerleri hesaplanmış olup, 1 ve 2 no.lu çözeltiler için de aynı hesaplamalar yapılmıştır.

Belirlenen TDS ve SY değerleri Sherard vd. [1] tarafından önerilen dispersivite abağına yerleştirilerek, örneklerin dispersivite sınıfları tayin edilmiştir (Şekil 5.2). Farklı TDS değerlerine sahip çözeltiler kullanılarak yapılan dağılma deneyleri sonucunda belirlenen sınıflamaya göre dispersif olarak tanımlanan örnekler (bkz. Çizelge 5.2), dispersivite abağı kullanılarak sınıflandırıldığında (Şekil 5.2) dispersif olmayan ya da ara zemin olarak tanımlanmıştır. Buna karşın, sodyum kontrollü olarak hazırlanan 1 ve 2 no.lu çözeltiler kullanılarak yapılan dağılma deneylerinden elde edilen sınıflarla, dispersivite abağı kullanılarak belirlenen sınıfların uyumlu olduğu görülmüştür. 1 no.lu çözelti kullanılarak yapılan dağılma deneylerinde dispersif olarak tanımlanan örneklerin tümü dispersivite abağında da dispersif olarak tanımlanmıştır. 2 no.lu çözelti kullanılarak yapılan dağılma deneylerinde ise dispersif olmayan ve ara zemin olarak tanımlanan örneklerin tümünün dispersivite abağında da aynı dispersivite derecesine sahip olduğu belirlenmiştir (bkz. Şekil 5.2).



Şekil 5.2. TDS ve SY veri çiftlerinin dispersivite abağındaki dağılımı.

1 ve 2 no.lu çözeltiler kullanılarak yapılan dağılma deneylerinden belirlenen sınıflarla TDS ve Na (%) veri çiftleri kullanılarak dispersivite abağından belirlenen dispersivite sınıflarının uyumlu olması, sodyum iyonunun dispersivite üzerindeki etkisini açıkça göstermektedir. Bu durumun kil mineralojisi ve dispersivite arasındaki ilişkiye dayanarak açıklanması mümkündür. Çözeltideki sodyum iyonunun artışı elektrolit konsantrasyonunu ve dolayısıyla dispersivite derecesini de değıştirmektedir. Geniş yüzey alanı ve değışim yüzeyine sahip olan killer aşırı miktarda Na<sup>+</sup> iyonu bağlama kapasitesine de sahiptirler. +1 elektron yüküne sahip olan Na iyonları kil taneciklerinin fiziksel olarak birbirinden ayrılmasına neden olmaktadır. Na iyonu hem hidrate çapının büyük oluşu (7.90 Å ) hem de tek elektron yükü nedeniyle toprak parçacıklarının fiziksel olarak ayrılmasına neden olmaktadır [59, 60]. Kil tanecikleri içerisinde bağlayıcı olan çekici güçler, taneciklerin arasına hidrate olabilen Na<sup>+</sup> iyonu alındığında parçalanmakta ve itici güçler etkin duruma gelmektedir. Kil taneciklerinde adsorbe haldeki katyon +2 yüklü kalsiyum veya magnezyum gibi iyonlar olduğunda tabakalar birbirine yakınken, söz konusu katyon Na<sup>+</sup> olduğunda tabakalar arasındaki mesafe genişlemektedir. Genişleyen mesafe sonucu tanecikler birbirinden ayrılarak dispersiyona uğramaktadırlar. Üç tabakalı kafes yapısına sahip olan simektit grubu kil minerallerinde; kristal üniteleri birbirine silisyum tetrahedron tabakasının yüzeylerinde bulunan oksijen atomları aracılığıyla zayıf bağlarla bağlandıklarından, tabakalar arasına su ve diğere iyonlar kolayca girebilmektedir. Sodyum iyonu da kil tabakaları arasına kolaylıkla girerek tanecikleri birbirinden uzaklaştırmaktadır.

Söz konusu tüm sonuçlar; dispersivite derecesi üzerinde TDS değerinin tek başına etkili olmadığını, bu değerin sodyum iyon konsantrasyonuyla birlikte değerlendirilerek ele alınması gerektiğini göstermektedir.

## 6. DISPERSİVİTENİN KESTİRİMİ

Dispersif killeri tanımlamak amacıyla fiziksel (dağılma deneyi, çift hidrometre deneyi, iğne deliği deneyi) ve kimyasal (boşluk suyu analizi) deneyler olmak üzere farklı deney yöntemleri önerilmiştir. Ancak, aynı kil örnekleri üzerinde yapılan farklı dispersivite deneyleri sonucunda belirlenen dispersivite sınıfları arasında uyumsuzluklar görülebilmektedir. Killerin dispersivite sınıfını güvenilir olarak belirleyen tek bir deney yöntemi henüz mevcut değildir.

Killerin dispersivite özelliğini güvenilir bir biçimde belirlemek için örnekler üzerinde fiziksel ve kimyasal deneylerin tümünün yapıp sonuçların birlikte değerlendirilmesi gerekmektedir. Bu nedenle, Bell ve Walker [22] birden fazla deneyin sonucunu esas alan ağırlıklı bir puanlandırma sistemi önermişlerdir. Bu tez çalışmasında da söz konusu puanlandırma sistemi ile belirlenen dispersivite sınıfları esas alınarak istatistiksel analiz ve değerlendirmeler yapılmıştır. Puanlandırma sistemi ve bu tez çalışmasında kullanılan analiz ve yöntemlere ilişkin ayrıntılı bilgi aşağıdaki bölümlerde verilmiştir.

### 6.1. Killerin Dispersivitesinin Puanlandırma Sistemi Kullanılarak Yeniden Sınıflandırılması

Bell ve Walker [22], Bell ve Maud [53] tarafından önerilen puanlandırma sistemini geliştirerek, tüm dispersivite deneylerinden belirlenen sonuçların etkisini dikkate alan yeni bir sınıflama sistemi önermişlerdir (Çizelge 6.1). Araştırmacılar puanlandırma sisteminde fiziksel ve kimyasal dispersivite deneylerinden elde edilen sonuçları birlikte değerlendirmişlerdir. Bell ve Walker [22], önerdikleri puanlandırma sisteminde fiziksel dispersivite deneylerinden iğne deliği ve dağılma deneylerinin sonuçlarından belirlenen dispersivite sınıflarını kullanmışlardır. Bununla birlikte Bell ve Walker [22], Sherard vd. [1] ile Gerber ve Hamse [19] tarafından önerilen dispersivite abaklarından ve SAR değerleri esas alınarak belirlenen dispersivite sınıflarını da puanlandırma sistemlerinde dikkate almışlardır. Bu araştırmacılar tarafından önerilen puanlandırma sistemi, killerin dispersivitesini, yüksek dispersiften dispersif olmayan zemine kadar değişen beş farklı sınıfta yeniden

değerlendirmektedir. Çizelge 6.1’de görüldüğü gibi, her bir örnek için farklı deney, abak ve sınıflandırma yöntemlerinden belirlenen dispersivite sınıflarına atanan puanlar toplanarak o örneğe ait toplam puan elde edilmektedir. Belirlenen toplam puan dikkate alınarak örnek yeniden sınıflandırılmaktadır.

Çizelge 6.1. Dispersif killerin tanımlanması için Bell ve Walker [22] tarafından önerilen puanlandırma sistemi.

Dispersivite deney ve yöntemleri	Sınıf puanı	Dispersivite sınıfı				
		Dispersif	Orta derecede dispersif	Az dispersif	Dispersif değil-Şişen zemin	
İğne deliği	Puan	5	3	1	0	
Dağılma	Puan	Yüksek dispersif 3	Dispersif 2	Orta derecede dispersif 1	Dispersif değil 0	
CEC-ESP	Puan	Yüksek dispersif 4	Dispersif 3	Marjinal 1	Dispersif değil 0	
TDS-SY	Puan	Dispersif 2	Orta derecede dispersif 1	Dispersif değil 0		
SAR	Puan	Dispersif 2	Orta derecede dispersif 1	Dispersif değil 0		
<b>Toplam puan</b>		=16	12≥	8-11	5-7	≤4
<b>Yeni sınıf</b>		Yüksek dispersif	Dispersif	Orta derecede dispersif	Az dispersif	Dispersif değil

Tezin 3. Bölümü’nde ayrıntılı olarak tartışıldığı gibi, aynı kil örnekleri üzerinde yapılan farklı dispersivite deneylerinden belirlenen dispersivite sınıfları değişkenlik

göstermektedir (bkz Çizelge 3.4 ve 3.6). Buna bağlı olarak, kullanılan deney ve yöntemler sonucunda aynı örnekler için farklı dispersivite sınıfları elde edilmiştir. Bu nedenle, tez çalışmasında incelenen kil örneklerine ait tüm dispersivite deney yöntemlerinden (saf su kullanılarak yapılan dispersivite deneyleriyle) belirlenen dispersivite sınıfları Bell ve Walker [22] tarafından önerilen puanlandırma sisteminde (bkz. Çizelge 6.1) puanlandırılarak her örneğe için tek bir dispersivite sınıfı belirlenmiştir. Dispersivitenin kestirimi için yapılan istatistiksel çözümlerinde belirlenen bu yeni sınıfların kullanılabilmesi amacıyla, elde edilen sınıflara “dispersif değil” sınıfından “yüksek dispersif” sınıfına kadar olmak üzere, 1’den 5’e kadar değişen rakamlar (bkz. Çizelge 6.2) verilerek örnekler sınıflandırılmıştır. Tez çalışmasının bundan sonraki bölümlerinde anlatılan ve dispersivitenin kestirimi için yapılan istatistiksel çözümlerinde yeniden belirlenen bu dispersivite sınıfları kullanılmıştır (Çizelge 6.3).

Çizelge 6.2. Belirlenen yeni dispersivite sınıflarına ait grup numaraları.

<b>Dispersivite sınıfı</b>	<b>Yüksek Dispersif</b>	<b>Dispersif</b>	<b>Orta derecede dispersif</b>	<b>Az dispersif</b>	<b>Dispersif Değil</b>
<b>Sınıf no.</b>	5	4	3	2	1

## **6.2. Dispersivitenin Karar Ağacı Modeliyle Kestirimi**

Son yıllarda mühendislik çalışmalarının karar verme aşamalarında, birtakım yeni mantıksal ve matematiksel tabanlı istatistiksel yaklaşımlara gereksinim duyulmaktadır. Birçok araştırmacı [örneğin, 61-83], özellikle şev tasarımı, mekanik parametrelerin ve süreksizlik verilerinin değerlendirilmesinde ve sınıflamaya dayalı konularda; lojistik regresyon, karar ağaçları, yapay sinir ağları ve bulanık mantık gibi istatistiksel çözümler ve esnek hesaplama yöntemlerini kullanmışlardır.

Tez çalışmasının bu bölümünde, yeniden belirlenen sınıf değerlerinin (bkz Çizelge 6.3) karar ağacı modeli ile kestirimi amaçlanmıştır. Karar ağacı modeli, en kuvvetli

ve en iyi kestirimi gerçekleştirebilmek için bağımlı ve bağımsız değişkenler arasındaki tüm ilişkilerin incelenmesine dayanmaktadır [84].

Çizelge 6.3. Bu çalışmada incelenen örneklerin Bell ve Walker [22] tarafından önerilen puanlandırma sistemi kullanılarak belirlenen yeni dispersivite sınıfları.

Örnek no	Dispersivite deney ve yöntemleri										Toplam puan	Yeni sınıf
	İğne deliği		Dağılıma		TDS-SY		ESP-CEC		SAR			
	Sınıf	Puan	Sınıf	Puan	Sınıf	Puan	Sınıf	Puan	Sınıf	Puan		
K1	ND3	3	K2	1	B	0	ND	0	ND	0	4	1
K2	D2	5	K3	2	B	0	ND	0	ND	0	7	2
K3	SP	0	K3	2	C	1	D	3	D	2	8	3
K4	ND4	3	K3	2	B	0	ND	0	ND	0	5	2
K5	ND3	3	K3	2	C	1	D	3	D	2	11	3
K6	D2	5	K3	2	A	2	HD	4	D	2	15	4
K7	ND3	5	K4	3	C	1	HD	4	D	2	13	4
S1	ND4	5	K3	2	B	0	ND	0	ND	0	5	2
S2	ND4	3	K2	1	B	0	ND	0	ND	0	4	1
SY1	ND3	3	K3	2	B	0	ND	0	I	1	6	2
SY2	ND3	3	K3	2	B	0	ND	0	ND	0	5	2
SY3	ND1	0	K2	1	B	0	ND	0	ND	0	1	1
SY4	ND3	3	K3	2	B	0	ND	0	ND	0	5	2
SY5	ND3	3	K3	2	B	0	ND	0	ND	0	5	2
SY6	D2	5	K3	2	B	0	ND	0	I	1	8	3
SY7	D2	5	K3	2	B	0	D	3	D	2	12	4
A1	ND4	3	K3	2	B	0	ND	0	ND	0	5	2
A2	ND4	3	K3	2	B	0	ND	0	ND	0	5	2
A3	ND4	3	K3	2	B	0	ND	0	ND	0	5	2
G1	D2	5	K4	3	A	2	D	3	D	2	15	4

Çizelge 6.3. (devam ediyor).

Örnek no.	Dispersivite deney ve yöntemleri										Toplam puan	Yeni sınıf
	İğne deliği		Dağılma		TDS-SY		ESP-CEC		SAR			
	Sınıf	Puan	Sınıf	Puan	Sınıf	Puan	Sınıf	Puan	Sınıf	Puan		
G2	ND3	3	K4	3	A	0	HD	4	D	2	14	4
G3	ND4	3	K3	2	B	0	ND	0	ND	0	5	2
G4	ND4	3	K3	2	C	1	D	3	D	2	11	3
T1	ND4	3	K3	2	B	0	HD	4	ND	0	9	3
T2	ND4	3	K3	2	A	2	ND	0	D	2	9	3
Ç1	ND4	3	K3	2	B	0	ND	0	ND	0	5	2
Ç2	ND3	3	K3	2	B	0	ND	0	I	1	6	2
AS1	D2	5	K3	2	B	0	ND	0	ND	0	7	2
AS2	D2	5	K3	2	B	0	ND	0	I	1	8	3

K1: Dispersif değil, K2: Ara zemin, K3: Dispersif, K4: Yüksek dispersif

ND1, ND2: Dispersif değil, ND3, ND4: Ara zemin, D1, D2: Dispersif, SP: Şişen zemin

A: Dispersif, B: Dispersif değil, C: Ara zemin

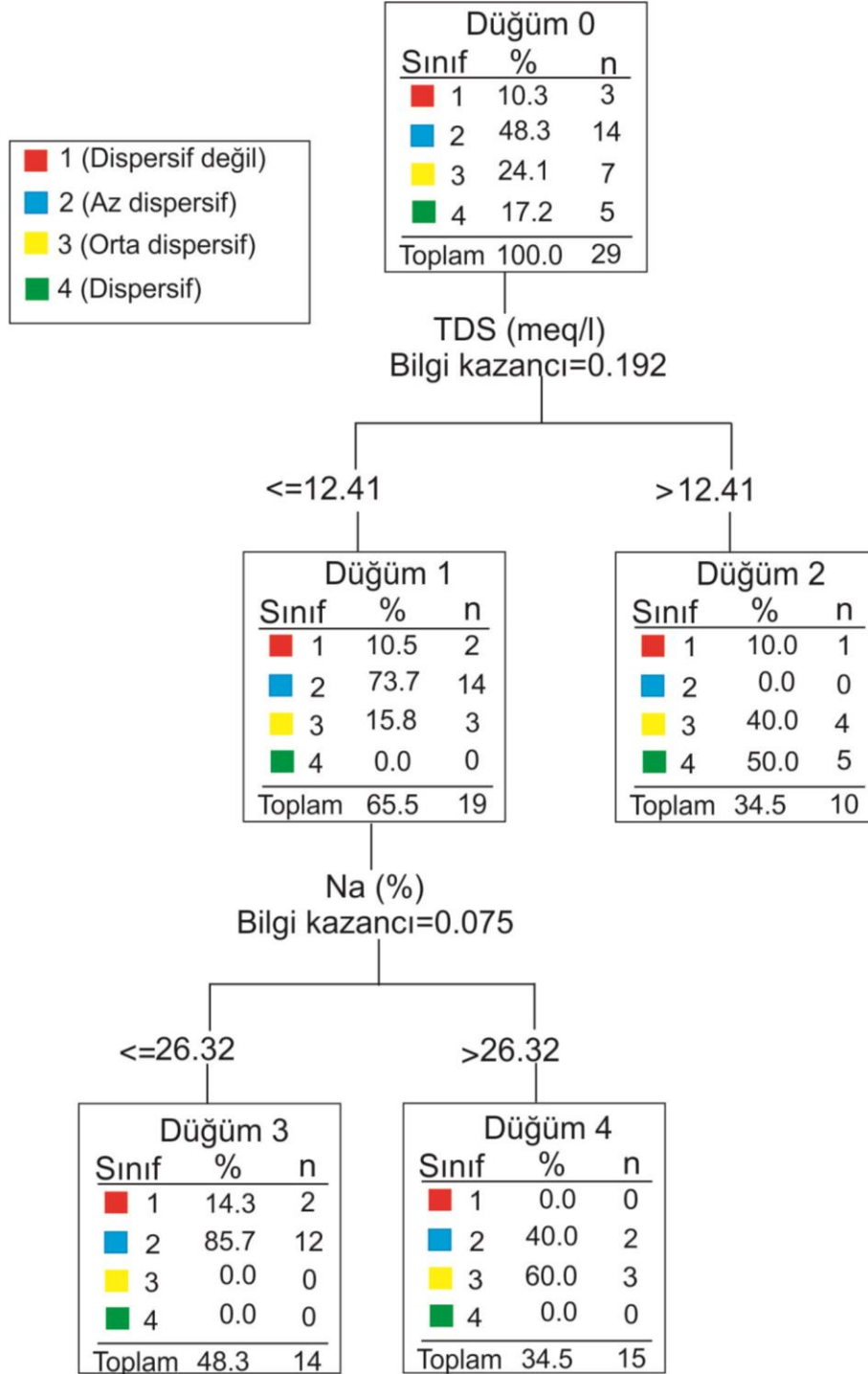
ND: Dispersif değil, HD: Yüksek dispersif, D: Dispersif, I: Ara zemin

Karar ağacı modelleri örneklemedeki tüm gözlemleri içeren bir kök ile başlamaktadırlar. Ağaç boyunca aşağıya doğru inildiğinde veriler karşılıklı tek alt kümeler içerecek biçimde dallara ayrılmaktadır [85]. Kökten hedef yaprağa kadar olan yol, hedefi sınıflandıran kural olarak adlandırılmaktadır [86]. Modelde, en kuvvetli ilişkiye sahip bağımsız değişken bulunduğunda, veri kümesi bu bağımsız değişken değerlerine göre ikiye ayrılmakta ve süreç mümkün bölünmeler tamamlanıncaya kadar devam etmektedir [87]. Bu model, karar alıcıya karar verirken hangi faktörlerin göz önüne alınması ve her bir faktörün kararın farklı çıktıları ile nasıl ilişkili olduğunun belirlenmesi konularında yardımcı olmaktadır [86].

Model oluşturulurken Çizelge 6.3'de verilen dispersivite sınıflarının en az değişken kullanılarak kestirimi amaçlanmıştır. Bunun için dispersivite sınıfları (bkz Çizelge 6.3), bağımlı değişken ve boşluk suyu analizi sonuçlarından elde edilen sayısal değişkenlerden sodyum adsorbsiyon oranı (SAR), değişebilir sodyum yüzdesi (ESP), toplam çözünmüş tuzlar (TDS ve yüzde sodyum (%Na) değerleri ise bağımsız değişkenler olarak seçilmiştir. Bağımsız değişkenlerden birbirleriyle yüksek ilişkiye sahip veriler modele aynı anda dahil edilemediği için iki farklı karar ağacı modeli oluşturulmuştur. Öncelikle, dispersivite sınıflarının kestirimi amacıyla TDS ve % Na değerleri bağımsız değişkenler olarak kullanılmışlardır. Analizlerde SPSS Statistics-21 [88] istatistiksel paket programından yararlanılmıştır. Karar ağacı modeli oluşturulurken sınıflayıcı veya sıralayıcı yapıya sahip kategorik değişkenler üzerinde analiz yapma olanağı sunan CART (classification and regression trees) algoritması seçilmiştir.

Şekil 6.1'de TDS ve %Na bağımsız değişkenleri kullanılarak oluşturulan karar ağacı modeli sunulmuştur. Modelde, dispersivite sınıfları kök düğümü olarak atanmış ve toplam çözünmüş tuzlar ile yüzde sodyum değerlerine göre dispersivite sınıflarını belirleyen kurallar üretilmiştir (Şekil 6.1). Buna göre, TDS değerinin 12.42'den küçük ve eşit olduğu durumda örneklerin büyük çoğunluğu (% 73.7) az dispersif (2. Sınıf) olarak tanımlanmıştır. TDS değeri 12.42'den büyük olduğunda ise, örneklerin % 90'ı orta dispersif ve dispersif (3 ve 4. Sınıf) olarak tanımlanmıştır. Model TDS değerinin 12.42'den küçük ve eşit olduğu durum için % Na değerine göre iki alt dala bölünmüştür. % Na değerinin 26.32'den küçük ve eşit olduğu durumda örneklerin %

85'i az dispersif (2.sınıf), 26.32 'den büyük olduğunda ise % 60'ı orta dispersif (3. sınıf) olarak tanımlanmıştır.



Şekil 6.1. TDS ve %Na bağımsız değişkenleri kullanılarak oluşturulan karar ağacı modeli.

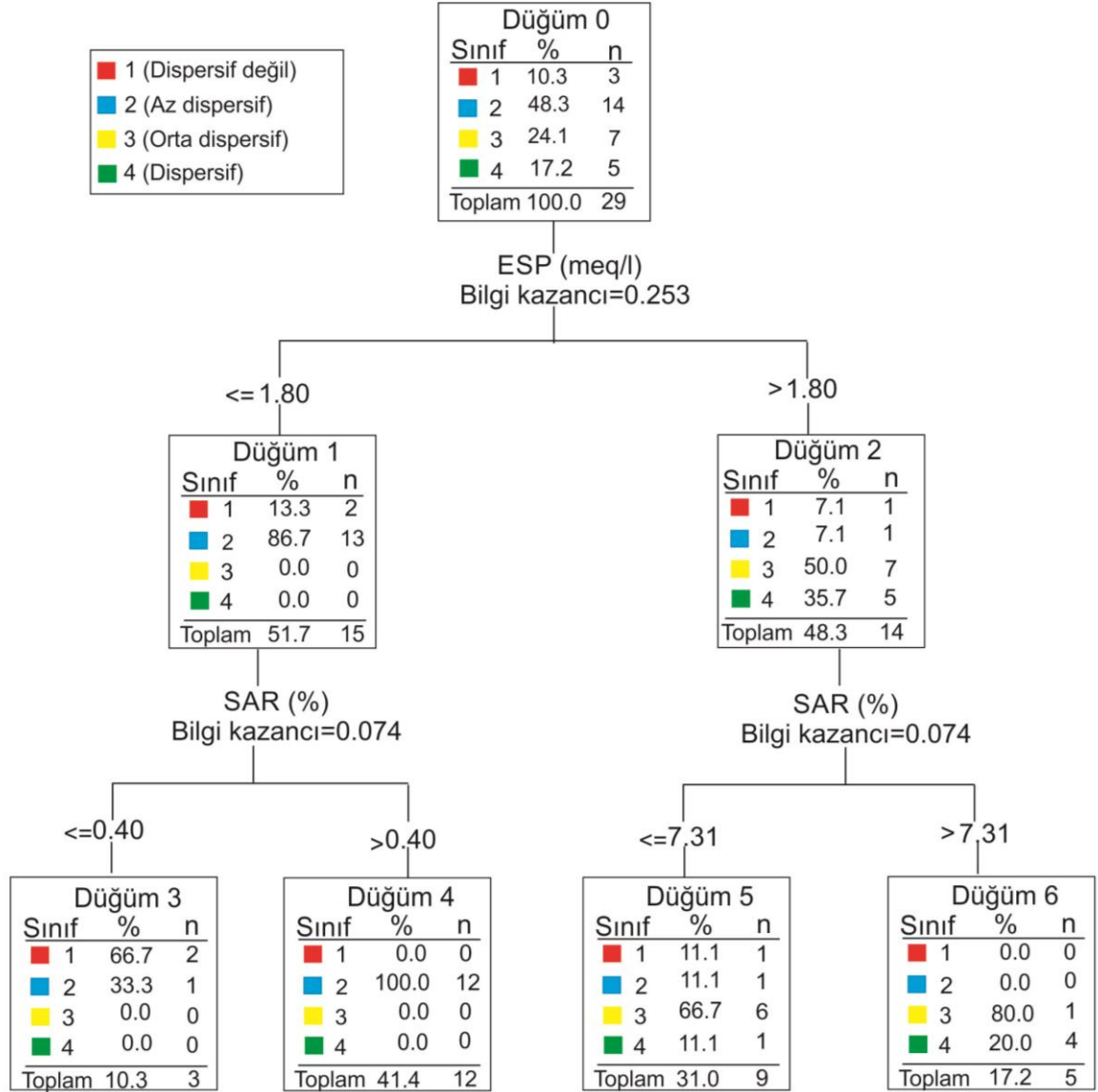
Oluşturulan modelin yeterliliğinin kontrol edilmesi amacıyla modelden kestirilen dispersivite sınıfları ve tez çalışmasından belirlenen dispersivite sınıfları karşılaştırılmıştır (Çizelge 6.4). Buna göre, oluşturulan modelin dispersif sınıfını (4.sınıf) % 100 doğru tahmin etmiş olduğu görülmektedir. Ayrıca, az dispersif sınıfını da (2.sınıf) % 86 oranında doğru tahmin etmiştir. Modele ait genel tahmin yüzdesi ise % 69 olarak belirlenmiştir. Modelin güvenilirliği az olmakla birlikte kullanıcıya yön göstermesi açısından kullanılabilir olduğunu söylemek mümkündür.

Çizelge 6.4.TDS ve % Na değişkenleri kullanılarak oluşturulan karar ağacı modelinden tahmin edilen dispersivite sınıfları ile çalışmadan belirlenen dispersivite sınıflarının karşılaştırılması.

Deneysel	Tahmin edilen				
	Sınıf 1	Sınıf 2	Sınıf 3	Sınıf 4	Doğru sınıflama (%)
<b>Sınıf 1</b>	0	2	0	1	0.0
<b>Sınıf 2</b>	0	12	2	0	85.7
<b>Sınıf 3</b>	0	0	3	4	42.9
<b>Sınıf 4</b>	0	0	0	5	100.0
<b>Genel yüzde (%)</b>	0.0	48.3	17.2	34.5	69.0

İkinci karar ağacı modelinde ise, dispersivite sınıflarının kestirimi amacıyla sodyum adsorbsiyon oranı (SAR) ve değişebilir sodyum yüzdesi (ESP) değerleri bağımsız değişkenler olarak seçilmişlerdir. Şekil 6.2' de sunulan ve SAR ve ESP değişkenleri kullanılarak oluşturulan karar ağacı modelinde kök düğümü olarak atanan dispersivite sınıflarından SAR ve ESP değerlerine göre kurallar oluşturularak alt dallar üretilmiştir. Buna göre; ESP değerinin 1.80'den küçük ve eşit olduğu durumda örneklerin % 86'sı az dispersifken (2. sınıf), SAR değerinin 0.40'a eşit ve küçük olması durumunda % 66'sı dispersif değil (1. sınıf) olarak tanımlanmıştır. SAR değeri 0.40'tan büyük olanların ise tümü az dispersif olarak (2. sınıf) tahmin edilmiştir. ESP değerinin 1.80'den büyük olduğu kuralda ise; örneklerin % 50'si orta dispersifken (3. sınıf), SAR değeri 7.31'e eşit ve küçük olanların % 66.7 'si orta

dispersif (3. sınıf) olarak tahmin edilmiştir. SAR değeri 7.31'den büyük olan örneklerin %80'i orta dispersif (3.sınıf) olarak tanımlanmıştır (bkz. Şekil 6.2).



Şekil 6.2. SAR ve ESP bağımsız değişkenleri kullanılarak oluşturulan karar ağacı modeli.

Modelden kestirilen ve tez çalışmasından belirlenen dispersivite sınıfları karşılaştırıldığında modelin az dispersif (2.sınıf) ve orta dispersif (3.sınıf) sınıfında oldukça iyi tahminlerde bulunduğu görülmektedir. Modelin genel tahmin yüzdesi ise % 82.8 olarak belirlenmiştir (Çizelge 6.5).

SAR ve ESP değişkenleri kullanılarak oluşturulan modelin TDS ve % Na değişkenleri kullanılarak oluşturulan modelden daha kuvvetli kestirim performansına sahip olduğu görülmüştür. Oluşturulan her iki model üzerinde yapılan yeterlilik kontrolleri değerlendirildiğinde, dispersivite sınıfı üzerinde sodyum iyonunun etkili olduğunu söylemek mümkündür. TDS, % Na, ESP ve SAR değerlerinin artışına koşut olarak, dispersivite sınıfında da bir yükselme belirlenmiştir.

Çizelge 6.5. SAR ve ESP değişkenleri kullanılarak oluşturulan karar ağacı modelinden tahmin edilen dispersivite sınıfları ile çalışmadan belirlenen dispersivite sınıflarının karşılaştırılması.

Deneysel	Tahmin edilen				Doğru sınıflama (%)
	Sınıf 1	Sınıf 2	Sınıf 3	Sınıf 4	
<b>Sınıf 1</b>	2	0	1	0	66.7
<b>Sınıf 2</b>	1	12	1	0	85.7
<b>Sınıf 3</b>	0	0	6	1	85.7
<b>Sınıf 4</b>	0	0	1	4	80.0
<b>Genel yüzde (%)</b>	10.3	41.4	31.0	17.2	82.8

### 6.3. Dispersivitenin Lojistik Regresyon Modeliyle Kestirimi

Son dönemlerde, pek çok araştırmacı [örneğin, 89-95] belirli alanlardaki potansiyel heyelan dağılımını haritalamak, barajlarda gözlenen rezervuar kayması, baraj yıkılması gibi yenilmelerin olasılığını tahmin etmek ve belirli gözlemlere ait sonuçları gruplara atamak konularında lojistik regresyon analiz yöntemini kullanmışlardır. Lojistik regresyon analizi bir bağımlı değişken ve birden fazla bağımsız (açıklayıcı) değişken arasında doğrusal olmayan bir ilişki kurarak çok değişkenli bir model oluşturulmasını sağlar [96, 97]. Lojistik regresyonun amacı en az değişkeni kullanarak en iyi uyuma sahip olacak şekilde sonuç değişkeni (bağımlı ya da cevap değişkeni) ile bağımsız değişkenler kümesi (açıklayıcı değişkenler) arasındaki ilişkiyi tanımlayabilen kabul edilebilir bir model kurmaktır [98]

Dispersivite deneyleri sonucunda belirlenmiş olan sınıflar ve boşluk suyu analiz sonuçlarından elde edilen sayısal değişkenler lojistik regresyon analizi için oldukça uygun veri kümeleri oluşturmaktadırlar. Bu nedenle, tez çalışmasında lojistik regresyon modeliyle yeniden belirlenmiş dispersivite sınıflarının (bkz. Çizelge 6.3) boşluk suyu analiz sonuçlarından elde edilen önemli sayısal değişkenlerden kestirimi amaçlanmıştır. Lojistik regresyon modeli oluşturulurken iki kategoriye sahip veri koşulu için kullanılan iki bileşenli regresyon modeli tercih edilmiştir. Matematiksel açıdan son derece esnek ve kolay olması ve bilimsel açıdan anlamlı yorumlara götürmesi nedeniyle ikili lojistik regresyon dağılımı kullanılmıştır [99]. Çizelge 6.3'de dispersif değil (1.sınıf) ve az dispersif (2.sınıf) olarak tanımlanan sınıflar dispersif olmayan zeminler olarak birleştirilirken, orta dispersif (3.sınıf) ve dispersif (4.sınıf) olarak tanımlanan sınıflar ise dispersif zeminler olarak birleştirilmişlerdir. Buna göre, incelenen örnekler için belirlenmiş olan dört dispersivite sınıfı (Çizelge 6.3), dispersif değil (1 no.lu sınıf) ve dispersif (2 no.lu sınıf) olmak üzere iki sınıf olarak yeniden tanımlanmıştır (Çizelge 6.6).

Çizelge 6.6. Lojistik regresyon modelinde kullanılan dispersivite sınıfları.

<b>Dispersivite sınıfı</b>	<b>Dispersif değil (1)</b>	<b>Az dispersif (2)</b>	<b>Orta dispersif (3)</b>	<b>Dispersif (4)</b>
İki değişkenli lojistik regresyon bileşeni	Dispersif değil (1)		Dispersif (2)	

Modelde, bağımlı değişken olarak seçilen dispersivite sınıfları (bkz. Çizelge 6.6) üzerinde boşluk suyu analizi sonuçlarından elde edilen TDS ve % Na bağımsız değişkenleri arasındaki ilişki kestirilmeye çalışılmıştır. Analizler SPSS Statistics -21 [88] istatistiksel paket programı kullanılarak yapılmış ve sonuçlar Çizelge 6.7'de verilmiştir. Lojistik regresyonda bağımsız değişkenlere ait katsayılar kestirildikten sonra, bağımlı değişkenle olan ilişkiyi ortaya koyan lojistik regresyon eşitliği elde edilir. Modelden elde edilen lojistik regresyon eşitliği;

$$\text{Sınıf olasılığı} = -10.548 + 0.190 \text{ TDS} + 0.270 \text{ Na} \quad (R^2=0.866) \quad (\text{Eş 6.1})$$

olarak bulunmuştur.

Çizelge 6.7. İki değişkenli lojistik regresyon modelinden elde edilen eşitlikteki değişkenler.

	Standart katsayı B	Standart hata	Wald değeri	Sebestlik derecesi (df)	Anlamlılık (p)	Risk (B)
TDS (meql)	0.190	0.124	2.341	1	0.126	1.209
Na (%)	0.270	0.181	2.226	1	0.136	1.310
Katsayı	-10.548	5.795	3.313	1	0.069	0.000

Lojistik regresyon analizinde Wald değeri de değişkenlere ilişkin bir değerlendirme ölçütüdür. Wald'ın 2' den büyük değerleri için önemli olduğu kabul edilmekle birlikte Wald değeri büyüdükçe anlamlılık değeri (p) küçülmektedir. Modelde anlamlılık düzeylerinin (p) istatistiksel anlamlılık hesaplamalarında sınır değeri olan 0.05'den yüksek olduğunun belirlenmesine karşın, sınıflama amacıyla kurulan modelde kullanılabilir olarak tanımlanmaktadır. TDS ve % Na bağımsız değişkenlerine ait risk değerlerine (exp) bakıldığında (bkz. Çizelge 6.7); TDS ve % Na değerleri arttıkça örneklerin dispersif sınıfa (2.sınıf) geçme eğiliminin yüksek olduğu belirlenmiştir. Ayrıca modele ait Nangelkerke belirleme katsayısı  $R^2= 0.866$  olarak bulunmuş ve modelin anlamlı olduğu sonucuna varılmıştır.

Model yeterliliğinin kontrolü amacıyla lojistik regresyon analizi yapılarak tahmin edilen sınıflarla deneysel sınıflar karşılaştırılmıştır (Çizelge 6.8). Buna göre. dispersif olmayan sınıfta (1.sınıf) yer alan 17 örneğin 16 tanesinin ve dispersif sınıfta (2. sınıf) yer alan 12 örneğin 11 tanesinin doğru sınıflandığı görülmektedir. Kurulan modelin genel olarak doğru sınıflama oranı % 93.1 olarak belirlenmiştir.

Çizelge 6.8. İki değişkenli lojistik regresyon modelinden tahmin edilen dispersivite sınıfları ile çalışmadan belirlenen dispersivite sınıflarının karşılaştırılması.

Deneysel	Tahmin edilen		
	Sınıf 1	Sınıf 2	Doğru sınıflama (%)
Sınıf 1	16	1	94.1
Sınıf 2	1	11	91.7
Genel yüzde (%)			93.1

İki değişkenli lojistik regresyon analizinde dispersif değil (1. sınıf) ve dispersif (2. sınıf) sınıflarına atanan örneklere ait boşluk suyu analizi ile fiziksel ve indeks deneylerden elde edilen sayısal verilerin istatistiksel açıdan farklılık olup olmadığının araştırılması amacıyla Mann-Whitney U yöntemi kullanılarak değerler karşılaştırılmıştır. Farklılıkların belirlenebilmesi amacıyla tanımlayıcı istatistik değerler (en küçük, en büyük, ortalama, ortanca, standart sapma) incelenmiş ve istatistiksel anlamlılık değerleri (p) dikkate alınarak farklılıklar belirlenmiştir (Çizelge 6. 9). Buna göre her iki sınıfa ait örneklerin TDS, % Na, SAR, ESP ve EC sayısal değişkenlerinin dispersivite sınıfının değişimine koşut olarak değişim gösterdiğini söylemek mümkündür.

Çizelge 6.9. İki değişkenli lojistik regresyon analizinden belirlenen dispersivite sınıflarındaki örneklere ait sayısal değişkenler ve dispersivite sınıfları arasındaki ilişki.

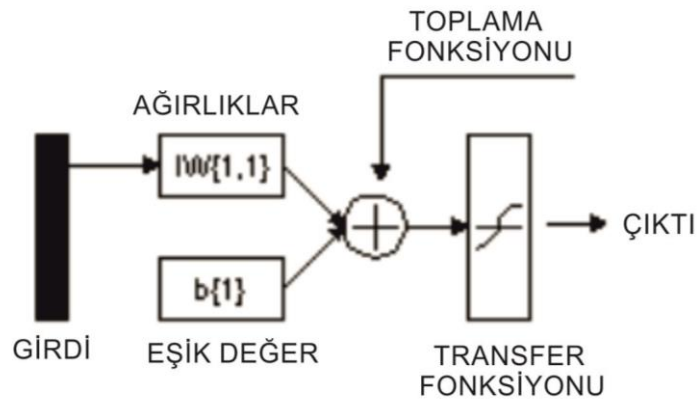
Sayısal veriler	İKİLİ LOJİSTİK REGRESYON ANALİZİNDE KULLANILAN DİSPERSİVİTE SINIFLARI										Anlamlılık (p)
	Dispersif değil (1.sınıf)					Dispersif (2.sınıf)					
	En küçük	En büyük	Ortalama	Ortanca	Standart sapma	En küçük	En büyük	Ortalama	Ortanca	Standart sapma	
CEC	26.68	63.12	41.09	39.38	8.01	29.72	56.08	44.69	47.60	9.88	0.303
EC	0.41	1.04	0.69	0.66	0.18	0.53	10.08	2.74	1.47	2.96	0.001
Ph	8.05	8.53	8.28	8.28	0.14	7.84	8.50	8.21	8.21	0.17	0.325
TDS (meq/l)	5.57	13.99	8.76	8.14	2.44	6.84	125.33	33.15	16.60	35.87	0.001
Na (%)	6.00	34.04	18.30	18.08	7.76	15.17	84.77	56.49	63.13	23.87	0.001
SAR	0.35	1.68	0.89	0.85	0.46	1.17	27.72	8.32	5.54	7.68	0.001
ESP (%)	0.68	2.29	1.31	1.18	0.41	1.85	48.12	13.88	9.00	13.68	0.001
Kil (%)	15	40	31	32	8	17	72	33	29	16	0.419
Silt (%)	18	65	44	45	14	16	64	40	39	14	0.394
Kum (%)	5	42	22	25	11	4	40	26	30	13	0.394
Çakıl (%)	0	10	4	5	3	0	5	1	0	2	0.180
LL	40	47	44	43	2	40	55	46	45	4	0.245
PL	21	27	25	25	2	21	29	25	25	2	0.913
SL	15	17	16	17	1	13	18	16	17	1	0.948
PI	14	25	18	17	3	14	27	21	20	3	0.038
Aktivite	0.38	1.53	0.6806	0.5300	0.34	0.37	1.17	0.73	0.72	0.24	0.37

Gölgeli satırlar farklılık gösteren değişkenleri göstermektedir.

#### 6.4. Dispersivitenin Yapay Sinir Ağları Kullanılarak Kestirimi

Yapay sinir ağları, örneklerden öğrenme ve genelleme yeteneğine sahip hatalı veya uygun olmayan girdi verileri içeren problemlerde anlamlı çözümler üretebilen bağlantılı sistemlerdir [100, 101]. Yapay sinir ağı, bir sisteme ilişkin çeşitli parametrelere bağlı olarak tanımlanan girişler ve çıkışlar arasında ilişki kurabilme yeteneğine sahiptir. Bu ilişkinin doğrusal bir ilişki olması zorunlu değildir. Ayrıca yapay sinir ağları, çıkış değerleri bilinmeyen tanımlanmış sistem girişlerine de uygun çıkışlar sunabilmekte ve böylece çok karmaşık problemlere iyi çözüm üretebilmektedirler [102]. Mühendislik jeolojisindeki problemler, probleme neden olan faktörlerin ve olayların yeterince anlaşılabilmesi yapay sinir ağlarının kullanımı için uygun bir alan oluşturmaktadır [103]. Günümüzde pek çok araştırmacı [örneğin, 104-110] sınıflama ve kestirim amaçlı mühendislik jeolojisi konularında yapay sinir ağlarını kullanmıştır.

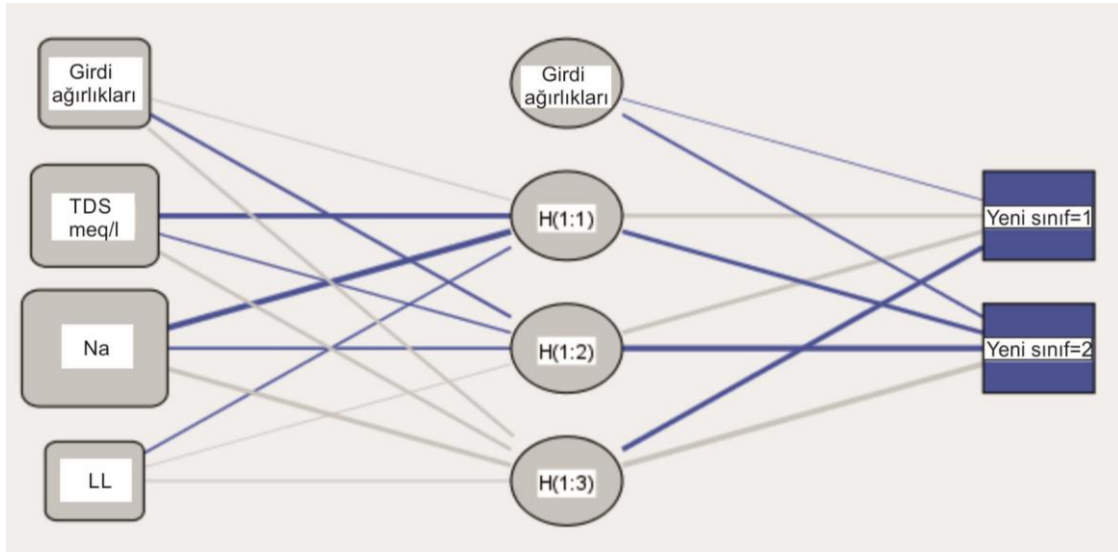
Bu tez çalışmasında Çok Katmanlı Algılayıcı (Multilayer Perception) modeli tercih edilmiştir. Çok katmanlı algılayıcılar modeli; giriş, gizli ve çıktı katmanları olmak üzere üç ana katmandan oluşmaktadır (Şekil 7.3).



Şekil 6.3. Yapay sinir ağı yapısı [108].

Dispersivite sınıflarının, boşluk suyu analiz sonuçları ile fiziksel ve indeks deneylerden elde edilen sayısal değişkenlerle olan ilişkisini ortaya koymak ve en fazla öneme sahip sayısal değişkenleri belirlemek amacıyla yapay sinir ağları modeli

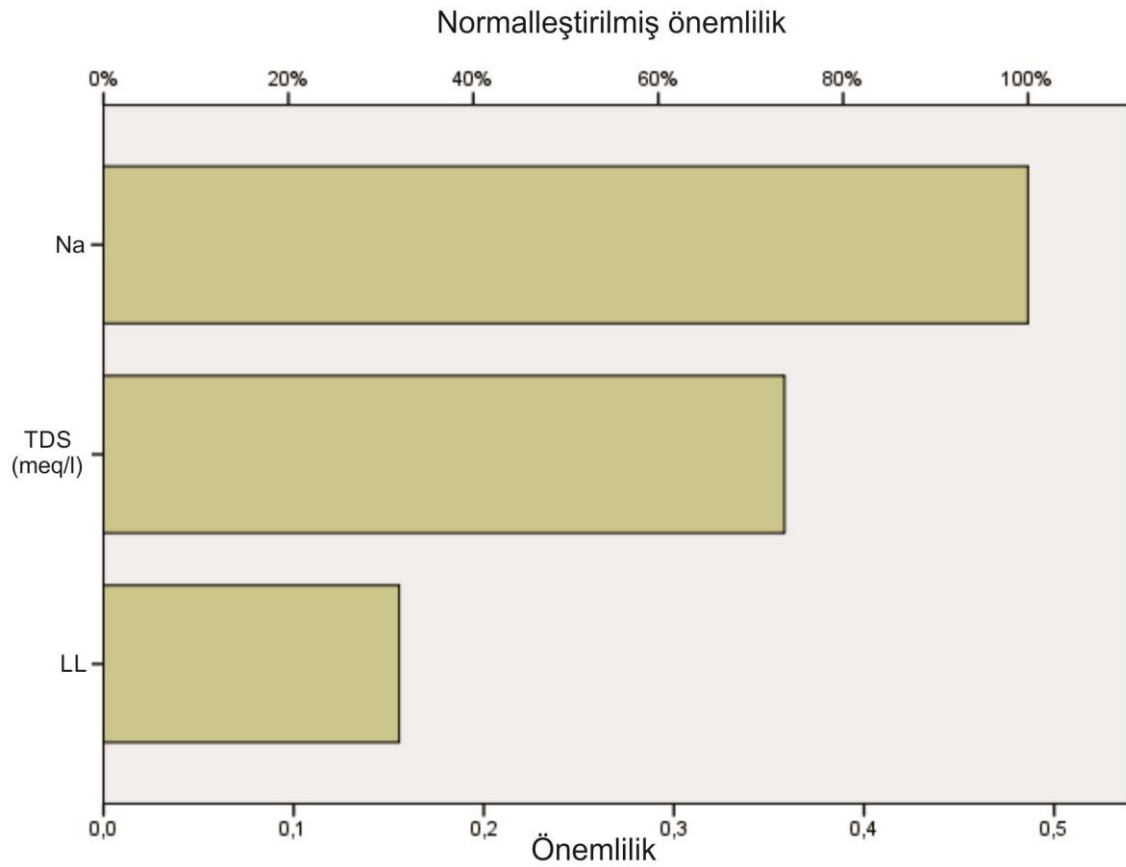
oluşturulmuştur. Yapay sinir ağlarında kullanılan çok sayıda öğrenme algoritması bulunmakta olup bu tez çalışmasında geri yayılım (back propagation) algoritması kullanılmıştır. Çok Katmanlı Algılayıcı modeli kullanılarak oluşturulan modelde öncelikle bağımsız değişkenler olarak tüm sayısal değişkenler (bkz Çizelge 3.2. ve 3.5.), bağımlı değişken olarak ise Bölüm 6.3'te anlatılan ve iki sınıf olarak yeniden tanımlanan dispersivite sınıfları seçilmiştir. Bağımlı değişken olarak iki sınıf olarak yeniden tanımlanan dispersivite sınıflarının seçilmesinin nedeni, veri sayısının az olması ve lojistik regresyon analizinden belirlenen olasılıkları sınamaktır. Toplam verinin % 70'i eğitim verisi (training data), %30'u ise sınama verisi (testing data) olarak seçilmiştir. Buna göre 20 veri eğitim verisi, 9 veri ise sınama verisi olarak analizlerde kullanılmıştır. Bağımsız değişken sayısının çok fazla olması oluşturulan modelin performansını düşürdüğü için, analiz sonuçlarından en fazla öneme sahip olan üç bağımsız değişken belirlenmiştir. Buna göre TDS, % Na, LL bağımsız değişkenleri kullanılarak performansı yüksek yeni bir model oluşturulmuştur. Oluşturulan modele ait ağ yapısı Şekil 6.4'te verilmiştir.



Şekil 6.4. Modelde kullanılan yapay sinir ağ yapısı.

Şekil 6.5'te verilen önemlilik grafiğinde değişkenlerin önemlilik değerleri normalize edilerek hesaplanmıştır. Buna göre; dispersivite sınıfının belirlenmesinde en fazla öneme sahip değişkenler % Na ve TDS (meq/l)'dir. % Na ve TDS değeri arttıkça örneklerin dispersif sınıfa geçme olasılığı da artmaktadır. Bu durum; TDS ve % Na değişkenlerinin dispersiviteyi kontrol ettiğini göstermektedir (Şekil 6.5).

Model yeterliliğinin kontrol edilmesi amacıyla yapay sinir ağıları kullanılarak tahmin edilen sınıflarla deneysel sınıflar karşılaştırılmıştır (Çizelge 6.10). Buna göre; eğitim verisi olarak seçilen veri grubunda dispersif olmayan sınıfta (1. sınıf) yer alan 12 verinin 11 tanesi, dispersif sınıfta (2.sınıf) yer alan 8 verinin 7 tanesi doğru tahmin edilmiştir. Sınama verisi olarak seçilen veri grubunda ise; 9 veri setine ilişkin yapılan kestirimlerin tümünün doğru olduğu görülmektedir. Her iki veri grubu için genel doğru sınıflama yüzdeleri ise sırasıyla %90 ve %100'dür (Çizelge 6.10).



Şekil 6.5. Önerilen modelde kullanılan bağımsız değişkenlerin önemlilik grafiği.

Çizelge 6.10. Yapay sinir ağları modelinden tahmin edilen dispersivite sınıfları ile çalışmadan belirlenen dispersivite sınıflarının karşılaştırılması.

Veri seti	Deneysel	Tahmin edilen		
		Sınıf 1	Sınıf 2	Doğru sınıflama (%)
Eğitim verisi	Sınıf 1	11	1	91.7
	Sınıf 2	1	7	87.5
	Genel yüzde (%)	60	40	90
Sınama verisi	Sınıf 1	5	0	100
	Sınıf 2	0	4	100
	Genel yüzde (%)	55.6	44.4	100

### 6.5. Dispersivitenin Kestirimi İçin Önerilen Modellerin Karşılaştırması

Dispersivitenin belirlenmesi amacıyla yapılan fiziksel ve kimyasal deneylerin sonuçları arasında zaman zaman farklılıklar görülebilmektedir. Kimyasal deneyler fiziksel deneylere göre daha güvenilir sonuçlar vermelerine karşın, uzun zaman alan yüksek maliyetli deneylerdir. Deney yöntemlerinin hangilerinin daha güvenilir olduğu konusundaki belirsizlikler günümüzde de sürmektedir. Bu nedenle, bu tez çalışmasında tüm deney ve yöntemlerin sonuçlarını birlikte değerlendiren bir puanlandırma sistemiyle örnekler puanlandırılarak yeniden sınıflandırılmışlardır. Yeniden sınıflandırılarak belirlenen dispersivite sınıflarının az sayıda değişken kullanarak kestirilmesi amacıyla farklı istatistiksel kestirim modelleri oluşturulmuştur. Böylece, çok daha az veriyle güvenilir ve tek bir dispersivite sınıfının kestirimi mümkün hale gelmiştir. Önerilen istatistiksel modellerde bağımlı ve bağımsız değişken olarak seçilen veri grupları saf su kullanılarak yapılan deneylerden alınmıştır. Bu çalışmada Bölüm 6 'da anlatılan su kimyası değiştirilerek yapılan dispersivite deneylerinden elde edilen veriler istatistiksel modele dahil edilememiştir. Çünkü bu deneylerde örneklere ait sayısal verilerin tümü farklılık göstermemiştir. Ayrıca, farklılık gösteren TDS ve Na (%) değerleri ise TDS değerinin değişimine koşut olarak her bir örnek için aynı oranda değişim göstermişlerdir. Bu değişim istatistiksel açıdan anlamlı olmadığı için söz konusu veriler istatistiksel modellerde kullanılmamıştır. Ağırlıklı puanlandırma yöntemiyle yeniden belirlenen

dispersivite sınıflarının (bkz. Çizelge 6.3) kestirimi amacıyla karar ağacı, lojistik regresyon ve yapay sinir ağları modelleri kurulmuştur.

Modelde kullanılan bağımsız değişkenler değiştirilerek iki farklı şekilde karar ağacı modellemesi oluşturulmuştur. İlk modelde TDS ve % Na verileri ikinci modelde ise SAR ve ESP verileri bağımsız değişken olarak seçilmiştir. Bölüm 6.2'de anlatıldığı gibi TDS ve % Na verileri kullanılarak oluşturulan modelin tahmin yüzdesinin en yüksek olduğu sınıf dispersif (4.sınıf) sınıftır. Modele ait genel tahmin yüzdesi ise % 69 olarak belirlenmiştir (bkz. Çizelge 6.4).

SAR ve ESP değişkenleri kullanılarak önerilen diğer modelden kestirilen dispersivite sınıfları ve tez çalışmasından belirlenen dispersivite sınıfları karşılaştırıldığında ise; bu modelin az dispersif (2. sınıf) ve orta dispersif (3. sınıf) sınıfında oldukça yüksek kestirimlerde bulunduğu görülmektedir. Modelin genel tahmin yüzdesi ise % 82.8 olarak belirlenmiştir (Çizelge 6.5). Farklı iki bağımsız değişken seçilerek oluşturulmuş karar ağacı modellemeleri genel kestirim yüzdeleri açısından karşılaştırıldığında; SAR ve ESP değişkenleri kullanılarak oluşturulan modelin TDS ve % Na değişkenleri kullanılarak oluşturulan modelden daha yüksek kestirimler gerçekleştirdiği belirlenmiştir. Oluşturulan her iki modelde de sodyum iyonunun dispersivite üzerinde oldukça etkili olduğu görülmektedir.

Dispersivitenin kestirimi amacıyla önerilmiş bir diğer model lojistik regresyon modelidir. Kurulan model ile TDS ve % Na verilerinin, bağımlı değişken olan dispersivite sınıfı ile olan ilişkisini ortaya koyan belirleme katsayısı yüksek bir lojistik regresyon eşitliği (bkz. Eş. 6.1) elde edilmiştir. Söz konusu denklem ile örneklerin dispersif ya da dispersif olmayan sınıfa geçme olasılığına ilişkin bir ön kestirim yapmak mümkündür. Ayrıca TDS ve % Na verilerine ait risk değerleri de bu değerler yükseldikçe dispersif olan sınıfa geçme yüzdesinin arttığını göstermektedir. TDS, % Na SAR, ESP ve EC sayısal değişkenlerinin dispersivite sınıfının değişimine koştur olarak değiştiği görülmüştür. Söz konusu değişkenler yükseldikçe örneklerin dispersif sınıfa geçme olasılığı artmaktadır.

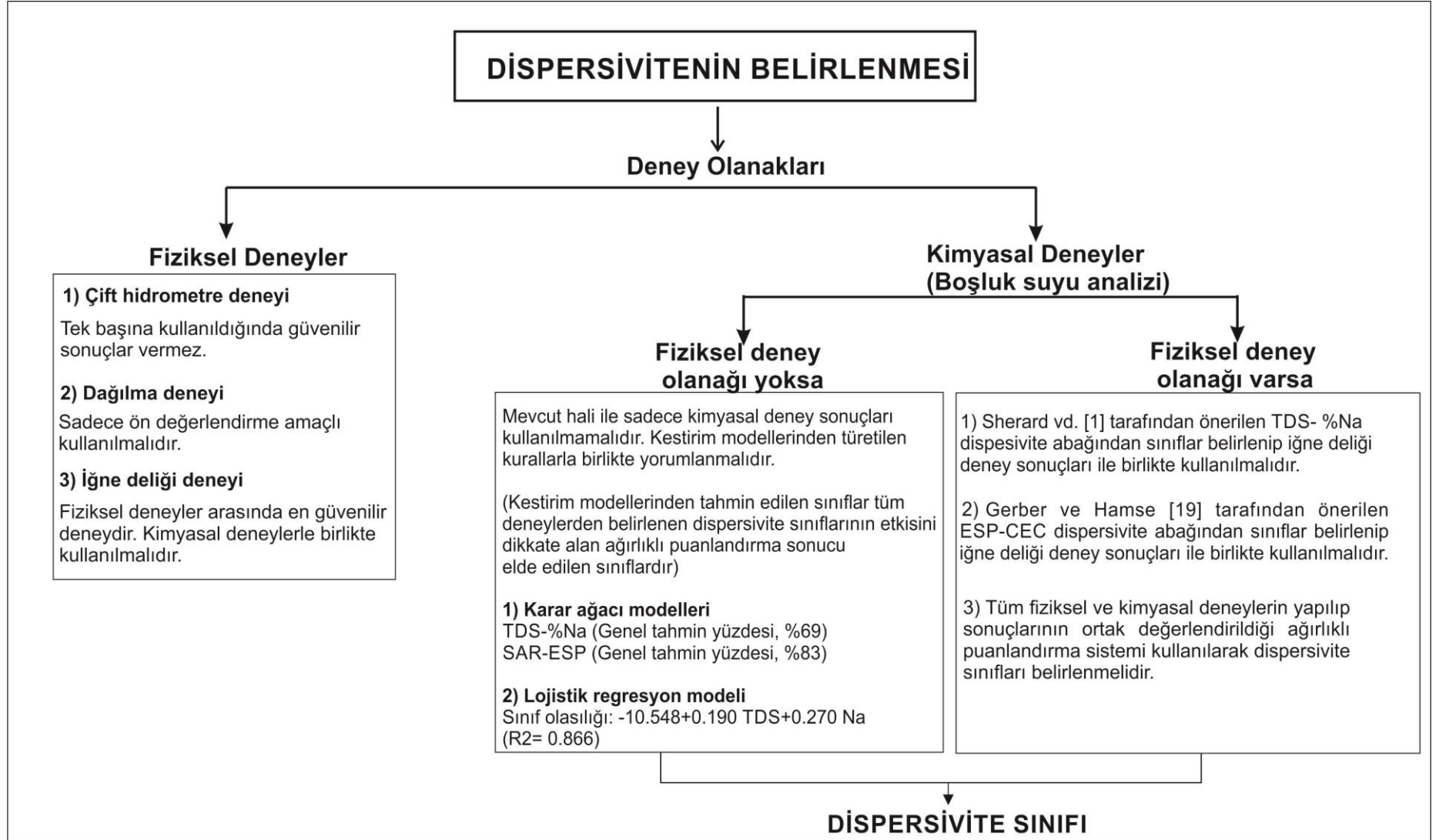
Dispersivite sınıflarının, sayısal değişkenlerle olan ilişkisini ortaya koymak ve en fazla öneme sahip sayısal değişkenleri belirlemek amacıyla yapay sinir ağları modeli

oluşturulmuştur. Buna göre; dispersivite sınıfının belirlenmesinde en fazla öneme sahip değişkenler % Na ve TDS (mg/l)'dir. % Na ve TDS değeri arttıkça örneklerin dispersif sınıfa geçme olasılığı da artmaktadır. Bu durum; TDS ve % Na değişkenlerinin dispersiviteyi kontrol ettiğini göstermektedir. Model yeterliliğinin kontrol edilmesi amacıyla yapay sinir ağları kullanılarak tahmin edilen sınıflarla deneysel sınıflar karşılaştırıldığında oluşturulan modelin tahmin yüzdesinin oldukça yüksek olduğu görülmektedir.

Dispersivitenin kestirimi için önerilen tüm modellerde dispersiviteyi kontrol eden faktörler ve bunların dispersivite sınıfı üzerindeki etkisinin belirlenmesi amaçlanmıştır. Yapay sinir ağları modeli ile en fazla öneme sahip üç değişken belirlenmiştir. Bunlardan özellikle % Na ve TDS değişkenlerinin oldukça önemli olduğu görülmektedir. En fazla öneme sahip üçüncü değişken olarak görülen LL değerinin önem yüzdesinin diğer iki değişkenin önem yüzdesine göre oldukça düşük olduğu belirlenmiştir. Bu durum dispersivitenin tanımlanması için Atterberg limitlerinin yeterli olmadığını da ortaya koymaktadır. Ayrıca, % Na ve TDS değerlerinin artmasına koşut olarak dispersiflik özelliğinin de arttığı belirlenmiştir. Belirlenen önemli değişkenler dikkate alınarak önerilen karar ağacı modellerinde ise değişkenlere bağlı kurallar üretilmiştir. TDS, % Na, SAR, ESP değişkenlerinin belirli değerleri için dispersivite sınıfında herhangi bir değişim olup olmadığı kontrol edilmiştir. Buna göre, SAR ve ESP değişkenleri kullanılarak önerilen modelin oldukça kuvvetli tahminler gerçekleştirdiği görülmüştür. Lojistik regresyon yöntemi kullanılarak önerilen modelde ise, TDS ve % Na değişkenlerine bağlı bir lojistik regresyon eşitliği oluşturulmuş ve bu eşitlikle örneklerin dispersif ve ya dispersif olmayan sınıfa geçme olasılığı belirlenmiştir. Modelden elde edilen TDS ve % Na değerlerine ait risk değerleri de sodyum iyonunun artmasına koşut olarak dispersif olan sınıfa geçme olasılığının yüksek olduğunu göstermiştir. Bu yöntemle, örneklere ait TDS ve % Na verileri önerilen eşitliğe konularak örneklerin dispersif ya da dispersif olmayan sınıfa geçme olasılıklarının kestirimi yapılabilmektedir. Dolayısıyla, lojistik regresyon yöntemi örneklerin dispersif karakterlerinin belirlenmesi için kullanıcıya fikir vermesi açısından oldukça kullanışlı bir yöntemdir. Tez çalışması kapsamında incelenen K6 no.lu örneğe ait veriler kullanılarak lojistik regresyon ve karar ağacı modellerinin uygulamalı bir örneği yapılmış ve Ek 1'de sunulmuştur.

## 6.6. Tartışma

Dispersif killeri tanımlamak amacıyla önerilmiş olan fiziksel (dağılma deneyi, çift hidrometre deneyi, iğne deliği deneyi) ve kimyasal deneylerle (boşluk suyu analizi) sonucunda örneklere ait dispersivite sınıfları belirlenmektedir. Ancak aynı kil örneği üzerinde yapılan deneylerden belirlenen dispersivite sınıfları arasında uyumsuzluklar görülebilmektedir. Deney yöntemlerinden herhangi biri tek başına yeterli olmadığından, güvenilir sonuçlara ulaşılabilmesi için farklı yöntemlerin bir arada kullanılarak sonuçların birlikte değerlendirilmesi gerekmektedir. Bu tez çalışmasında yapılan tüm fiziksel ve kimyasal deneylerden elde edilen sonuçlar ve çeşitli istatistiksel kestirim modellerinden türetilen kural ve olasılıklar da dikkate alınarak dispersivitenin belirlenmesinde kullanıcılara kolaylık sağlaması açısından bir akım şeması önerilmiştir (Şekil 6.6). Bu akım şemasında, dispersivitenin belirlenmesi için mevcut olanaklar göz önünde bulundurularak en güvenilir sonuçlara ulaşılması amaçlanmıştır. Akım şemasında fiziksel deneylerden çift hidrometre ve dağılma deneyi kullanılmazken, en güvenilir yöntem olarak önerilen iğne deliği deneyinin kimyasal deneylerle birlikte yapılması önerilmiştir. Fiziksel deney yapma olanağı olmadığına; dispersivite sınıflarının belirlenmesinde kimyasal deney sonuçlarının bu çalışmada önerilen kestirim yöntemlerinden türetilen kurallar ve olasılıklarla birlikte kullanılmasının güvenilir olduğu sonucuna varılmıştır. Bu yolla belirlenen dispersivite sınıfları ağırlıklı puanlandırma sisteminden belirlenmiş dispersivite sınıfları olacağı için, hem fiziksel hem de kimyasal deney sonuçlarının etkisini birlikte ele alan bir sınıf olacaktır. Fiziksel deney yapma imkanı olduğunda ise, hem fiziksel hem kimyasal deneyler yapılarak tümünün sonuçları ağırlıklı puanlandırma sistemiyle yeniden puanlanarak dispersivite sınıflarının belirlenmesi önerilmektedir (Şekil 6.6).



Şekil 6.6. Dispersivitenin belirlenmesinde izlenmesi önerilen aşamalar için akım şeması.

## 7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu tez çalışması kapsamında yapılan deney ve çözümlenmeler sonucunda aşağıda verilen başlıca sonuçlara ulaşılmıştır.

- (1) Örneklerin dispersif özelliklerinin belirlenmesi amacıyla yapılan fiziksel dispersivite deneylerinden elde edilen dispersivite sınıflarının birbirleriyle uyumlu olmadığı görülmüştür.
- (2) Kimyasal dispersivite deneyleri kapsamında yapılan sınıflamalar karşılıklı incelendiğinde elde edilen sonuçların genel anlamda birbiriyle uyumlu olduğunu söylemek mümkündür.
- (3) İğne deliği ve dağılma deney sonuçlarına göre dispersif ve ara zemin olarak sınıflandırılan örneklerin tümünde simektit grubu kil mineralleri %50 ve bu değer üzerinde yer almaktadır. İğne deliği, çift hidrometre ve kimyasal dispersivite deneylerine göre dispersif olmayan zemin grubuna giren SY3 örneğinde tüm örnekler arasındaki en yüksek kaolinit yüzdesi saptanmıştır. Söz konusu örneğe ait boşluk suyu analiz sonuçları örneğin tüm örnekler arasında en düşük sodyum yüzdesi ( $Na=6\%$ ) ve sodyum adsorbsiyon oranı ( $SAR=0.35$ ) değerine sahip olduğunu göstermektedir.
- (4) Farklı TDS değerlerine sahip çözeltiler kullanılarak yapılan deneylerde, TDS'in belli bir değere kadar artmasıyla birlikte dispersivite derecelerinde artış gözlenirken, bu değerden sonra TDS değerinin artışıyla birlikte dispersivite derecelerinde azalma belirlenmiştir. TDS=100 mg/l değerinde örnekler en yüksek dispersivite derecesine ulaşmış olup, TDS=100 mg/l değerinden itibaren, sırasıyla TDS=300 ve 500 mg/l değerlerinde dispersivite derecelerinde birer derece azalma gözlenmiştir. TDS=1000 mg/l değerinde ise örnekler en düşük dispersivite derecesine ulaşmıştır.
- (5) Sodyum iyonunun dispersivite üzerindeki etkisinin belirgin bir biçimde gözlenebilmesi amacıyla en düşük dispersivite derecesinin gözlemlendiği TDS=1000 mg/l değerinde, yalnızca NaCl eklenerek hazırlanan 1 no.lu ve

NaCl eklenmeden hazırlanan 2 no.lu çözeltiler kullanılarak yapılan deneyler sonucunda örneklerin dispersivite derecelerinde değişiklikler gözlenmiştir. 1 no.lu çözelti kullanılarak yapılan deneylerde örneklerin %52'sinin yüksek dispersif (K4) olarak, 2 no.lu çözelti kullanılarak yapılan deneylerde ise, örneklerin %55'inin dispersif olmayan zemin (K1) olarak belirlenmiştir. Deneylerde kullanılan çözeltilerdeki sodyum iyonunun konsantrasyonu örneklerin dispersivite derecelerini tamamen değiştirmiştir. Yalnızca sodyum iyonu kullanılarak hazırlanan çözeltilerde örnekler dispersifken, sodyum iyonunun hiç kullanılmadığı çözeltilerle yapılan deneylerde aynı örneklerin dispersif olmadığı görülmüştür.

(6) Hem sıkıştırma işlemi hem de deneyler sırasında TDS değeri 1000 mg/l olan 1 no.lu çözelti kullanılarak yapılan iğne deliği deneylerinde seçilen 5 adet örneğin dispersivite dereceleri ara zeminden (ND4-ND3) dispersif zemine (D2) geçiş gösterirken, 2 no.lu çözelti kullanılarak yapılan deneylerde dispersivite dereceleri ara zeminden (ND4-ND3) dispersif olmayan zemine geçiş (ND2) göstermiştir. Benzer şekilde hem sıkıştırma hem de deneyler sırasında TDS değeri 1000 mg/l olan 1 no.lu çözelti kullanılarak yapılan dağılma deneylerinden elde edilen dispersivite dereceleri de dispersif olmayan zemin sınıfından (K1-K2) dispersif zemine (K3-K4) geçiş göstermiştir. Deneylerde sıkıştırma işleminde kimyası değiştirilmiş suyun kullanılması örneklerin dispersivite derecelerinde daha belirgin değişiklikler gözlenmesine neden olmuştur.

(7) Farklı istatistiksel kestirim ve esnek hesaplama yöntemleri kullanılarak oluşturulan modeller sonucunda dispersivite üzerinde % Na ve TDS değişkenlerinin oldukça önemli olduğu belirlenmiştir. Lojistik regresyon yöntemi kullanılarak önerilen model, TDS ve Na (%) değişkenlerine bağlı olarak örneklerin dispersif ve ya dispersif olmayan sınıfa geçme olasılığına ilişkin kuvvetli kestirimler yapma olanağı sunmuştur. Dolayısıyla, lojistik regresyon yöntemi örneklerin dispersif karakterlerinin belirlenmesi için oldukça kullanışlı bir yöntemdir.

(8) Tüm fiziksel ve kimyasal deneylerle istatistiksel kestirim modellerinden elde edilen sonuçlar dikkate alınarak, dispersivitenin kestiriminde izlenmesi önerilen aşamaları gösteren bir akım şeması oluşturulmuştur. Bu akım şemasıyla, fiziksel ve kimyasal deney yapma olanakları göz önünde bulundurularak bazı değerlendirmeler yapılmıştır. Fiziksel dispersivite deneylerinden birisi olan çift hidrometre deneyinden elde edilen sonuçların güvenilir olmadığı, bu deneylerden sadece iğne deliği deneyinin güvenilir sonuçlar verdiği anlaşılmıştır. Bununla birlikte; fiziksel deney yapma olanakları göz önünde bulundurularak; bu çalışmada önerilen ve tüm fiziksel ve kimyasal dispersivite deneyleriyle istatistiksel kestirim modellerinden elde edilen sonuçların birlikte değerlendirildiği akım şemasının kullanılmasıyla dispersivite sınıfının güvenilir bir biçimde kestirilebileceği sonucuna varılmıştır.

Bu çalışmadan elde edilen bulgular dikkate alınarak bundan sonraki dönemde örnek sayısı ve çeşitliliği artırılarak dispersivitenin incelenmesi ve istatistiksel modellerin sınanması önerilmektedir.

Ayrıca, dispersif killerin daha çok barajlarda duraysızlık sorununa yol açtığı ve baraj projelerinin bütçelerinin büyüklüğü de göz önünde bulundurularak, barajın inşa edileceği sahadaki akarsudan alınmış örneklerin dispersivite deneylerinde kullanılarak sonuçların değerlendirilmesinin faydalı olacağı düşünülmektedir.

## KAYNAKLAR

- [1] Sherard, J.L., Decker, R.S., Ryker, N.L., Piping in earth dams of dispersive clays, Proceedings, *Speciality Conference on Performance of Earth and Earth-Supported Structures*, ASCE, Vol1, part 1, 584-626, **1972**.
- [2] Mitchell, J.K., *Fundamentals of soil behaviour*, John Wiley and Sons, Newyork, USA. 560, **1976**.
- [3] Knodel, P.C., *Characteristics and problems of dispersive clay soils*, USBR Materials Engineering Branch, Report no:R-91-09,17, Denver, CL, USA, **1991**.
- [4] Clark, M.R.E., *Mechanics, identification, testing and use of dispersive soils in Zimbabwe*, September, **1986**.
- [5] Steele, E.F., Characteristics and identification of dispersive clay soils, *Annual Meeting of American Society of Agricultural Engineers*, **1976**.
- [6] Sherard, J.L., Decker, R.S., Ryker, N.L., *Hydraulic fracturing in low dams of dispersive clays*, Proceedings, *Speciality Conference on Performance of Earth and Earth-Supported Structures*, ASCE, Vol 1, part 1, 653-689. **1972b**.
- [7] Sherard, J.L., Cluff, L.S., Allen, C.R., *Potentially active faults in dam foundations*, *Geotechnique*, 24, 367-428.,**1974**.
- [8] Sherard, J.L., Dunnigan, L.P., Decker R.S., *Pinhole test for identifying dispersive soils*, *Journal Geotechnical Engineering Division*, ASCE, vol. 102, 69-85. **1976a**.
- [9] Tosun, H., Dolgu barajlar yönünden dispersif killer ve DSİ çalışmaları.5. *Ulusal Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği Kongresi*, 98-110, Ankara, **1994a**.
- [10] Tosun, H., *Dispersif killer ve toprak dolgu barajlar açısından önemi*, DSİ Teknik Bülteni, 80, 51-60, **1994b**.
- [11] Tosun, H., Importance of dispersive soils for earthfill dams an a research on control tests adopted in Turkey, *Symposium on Research and Development in the Field of Dams,Switzerland*, 133-144, **1995**.
- [12] Tosun, H., *Comparative study on physical tests of dispersibility of soils used for earthfill dams in Turkey*, ASTM Geotechnical Testing Journal, V.20, No. 2, 242-25, **1997**.

- [13] Tosun, H., Zorluer, İ., Tozluk, H., Savaş, H., *Toprak dolgu barajlarda dispersif killerin kullanımı ve tasarım ve kontrol kriterlerinin araştırılması*, TÜBİTAK Proje raporu, Eskişehir, **2000**.
- [14] Aydın, M.C., Aydın, S., *Dispersif killerin dolgu baraj yapımı açısından önemi*, Kil Bilimi ve Teknoloji Dergisi,1, 49-54. **2006**.
- [15] Fernando, J., *Effect of water quality on the dispersive characteristics of soil found in Morwell area, Victoria, Australia*, Geotechnical and Geological Engineering, 28, 835-850, **2010**.
- [16] Sherard, J.L., Dunnigan, L.P., Deckeri R.S., *Identification and nature of dispersive soils*, Journal Geotechnical Engineering Division, ASCE, vol. 102, No:GT4, **1976b**.
- [17] Arulanandan, K., Heinzen, R.T., Factors influencing dispersive clays and methods of identification, *ASTM Symposium on Dispersive Clays, Chicago, Illinois*. **1976**
- [18] Düzceer, R., *An investigation on internal erosion phenomenon in earth dams*, Yüksek Lisans Tezi, Orta Doğu Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, **1984**.
- [19] Gerber, A., Harmse H.J. Von M., *Proposed procedure for identification of dispersive soils by chemical testing*, The civil engineer in South Africa, V.29, 397-399, **1987**.
- [20] Bell, F.G., de Bruyn, A., *Sensitive, expansive, dispersive and collapsive soils*, Bulletin of the International Association of Engineering Geology, Oct., 56, 19-38, **1997**.
- [21] Sridharan, A., Sudhakar, M.R., Dwarkanath, H.N., *Dispersive behaviour of nonswelling clays*, Geotechnical Testing Journal, 15 (4), 380-387, **1992**.
- [22] Bell, F.G., Walker, D.J.H., *A further examination of the nature of dispersive soils in Natal, South Africa*, Quaterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology, V.33,187-199, **2000**.
- [23] Tosun, H. Savaş, H., *Düşük plastisiteli killerde dispersibilite özelliğinin farklı yöntemlerle değerlendirilmesi*, OGÜ, Müh. Mimarlık Fakültesi Dergisi, C, XIV, No.2, 37-52, **2001**.
- [24] Zorluer, İ., *Toprak dolgu barajlar yönünden dispersif killer ve tanımlama yöntemlerinin karşılaştırılması*, Doktora Tezi, Eskişehir OGÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü, **2003**.

- [25] Nontananandh, S., Thongmit, C., Jotikansa, A., Suriyavanagul, P., Chantawaran K., *A preliminary study of dispersive soil erosions of reservoirs and road embankments in Kasetsart University Chalermphrakiat Sakon Nakhon province campus*, Kasetsart University Project, 1-10, **2006**.
- [26] Lashkaripouri, G.R., Khamechiyan, M., Soloki, H.R., Rahimi, E., *The characteristics of dispersive soils in Sistam plain, eastern Iran*, Journal of Applied Geology, Vol.3, No.1, 75-80, **2009**.
- [27] Bhuvaneshwari, S., and Soundara, B., *Stabilization and microstructural of dispersive clayey soils*, *First International Conference on Soil and Rock Engineering by Srilonkon Geotechnical Society*, Coulumb, Srilanka, August 5-11, **2007**.
- [28] Savaş, H., Tosun, H., *Dispersif killerin tanımlanması için kullanılan iğne deliği deneyinin geliştirilmesi ve karşılaştırmalı analizi*. Eskişehir OGÜ, Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi, XXII, sayı 2, **2009**.
- [29] Maharaj, A., *The use of the crumb test as a preliminary indicator of dispersive soils*. *Proceedings of the 15th African Regional Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*, 299-306, **2011**.
- [30] Dixit, M., and Gupta, S.L., *Problems in characterization and identification of dispersive soils-a case study*, International Journal of Earth Sciences and Engineering, Vol.4,143-146, **2011**.
- [31] Türköz, M., Savaş, H., Tosun H., *Problemlili kil zeminlerin magnezyum klorür solüsyonu ile iyileştirilmesi*, Gazi Üniv. Müh. Mim. Fak. Dergisi, Cilt 26, 233-242, **2011**.
- [32] Western Plant Health Association., *Western Fertilizer Handbook*, Produced by the soil improvement of comminute of the California Fertilizer Association Interstate Publishers, Inc., Sacramento, California, 356, **1995**.
- [33] Anonymous, *Effect of sodicity and salinity on soil structure*. [www.ricerc.org/reader/csp-backinfo/csp-e3.pdf](http://www.ricerc.org/reader/csp-backinfo/csp-e3.pdf). 2006b, (Kasım, 2012).
- [34] Aitchison, G.D., Wood, C.C., *Some interactions of compaction, permeability and post-construction deflocculation affecting the probability of piping failures in small dams*, *Proceedings, 6th International Conference on Soil Mechanics and Foundtaion Engineering, Montreal, Canada, International Society of Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Vol II, 442, **1965**.

- [35] Ingles, O.G., Wood, C.C., The contribution of soil and water cations to deflocculation phenomena in earth dams, *Proceedings, 37th Congress of Australian and New Zealand Assoc. for the Advancement of Sciences*, Canberra, Australia, January, **1964a**.
- [36] Rallings, R. A., *An Investigation into the causes of failure of farm dams in the Brigalow Belt of Central Queensland*, Water Research Foundation of Australia, Bulletin No. 10, **1966**.
- [37] Warrence, N.J., Bauder, J.W., Pearson, E.K., *Basic of salinity and sodicity effects on soil physical properties*, **2002**.
- [38] Elges, H.F.W.K., *Problem soils in South Africa-state of the art*, The civil engineering in South Africa, Vol.27, No.7, 347-349, **1985** .
- [39] Volk, G.M., Method of determination of the degree of dispersion of the clay fraction of soils, *Proceedings Soil Science Society of America*, vol. 2, 561. **1937**.
- [40] Sherard, J.L., Decker, R.S., N.L., Ryker, *Dispersive clays, related piping and erosion in geotechnical projects*, STP 623, ASTM, Philadelphia, PA, **1977**.
- [41] Emerson, W.W., *A classification of soil aggregates based on their coherence in water*, Australian Journal of Soil Research, 47-57, **1967**.
- [42] ASTM, *Annual Book of ASTM Standards-Soil and Rock, Building Stones, Section-4, Construction*, V.04.08, ASTM Publication, 972, **2000**.
- [43] DNR Water Facts, *Dispersive Soils Guide for Use in Farm Dam Construction*, The Department of Natural Resources, State of Queensland, Australia, **1995**.
- [44] Acciardi, R.G., Improvements to USBR pinhole test equipment design and test result evaluation, *Forth Annual USCOLD Lecture, Dam Safety and Rehabilitation*, Denver, Co, January, **1984**.
- [45] USBR 5410-89, *Determining dispersibility of clayey soils by the pinhole test method, Earth manual II*, United States Department of the Interior Bureau of Reclamation, 425-437. **1989**.
- [46] ASTM, *Annual Book of ASTM Standards*, Natural building stones, soil and rock, Vol: 04, ASTM, Philadelphia, Pa, **1989**.

- [47] TS 1900-2/T1, *İnşaat Mühendisliğinde Zemin Deneyleri*, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, **2006**.
- [48] Bergado, D.T., Kang, K.Y., *Improvement of dispersive soils by mixing with Bangkok clay or bentonit*, Geotechnical Engineering, V.18, 65-97, **1987**.
- [49] Sherard, J.L., Decker, R.S., *Dispersive clays related piping, and erosion in Geotechnical Projects*, STP 623, ASTM, Philadelphia, **1977**.
- [50] Perry, E.B., *Susceptibility of dispersive clay at Grenada Dam, Missisipi, to piping and rainfall erosion*, Technical report GL 79-14. U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station, 49-52, **1979**.
- [51] Esrig, M.I., *The contribution of dispersive clays to the failure of open excavations in Lake Charles, Louisiana*, The Art and Science of Geotechnical Engineering, Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, USA, **1989**.
- [52] Sherard, J.L., Dunnigan, L.P., Talbot, J.R., *Filters for silts and clays*, Journal, Geotechnical Engineering Division, ASCE, vol.110, No.6, June, **1984b**.
- [53] Bell, F.G., Maud, R.R., *Dispersive soils: a review from a South African perspective*, Quaterly Journal of Engineering Geology, 27, 195-210, **1994**.
- [54] ASTM, *Inorganic index to the powder diffraction file. Joint Committee on Powder Diffraction Standards*, Philedelphia, 1432, **1972**.
- [55] Gündoğdu, M.N., *Neojen yaşlı Bigadiç sedimanter baseninin jeolojik,mineralojik ve jeokimyasal incelenmesi*, Doktora Tezi, Hacettepe Üniversitesi, Yerbilimleri Entitüsü, **1982**.
- [56] Resendiz, D., *Relevance of Atterberg Limits in Evaluating piping and Breaching Potential*, Dispersive Clays, Related Piping and Erosion in Geotechnical Projects, ASTM 623, 341-353, **1977**.
- [57] DSİ, *Afyon-Tınaztepe Göleti Islah Çalışmaları Raporu*, DSİ XVIII. Bölge Müdürlüğü, Isparta, **2000a**.
- [58] DSİ, *Su ve Toprak Analizleri Rehberi*, Ankara, **2000b**.
- [59] Warrence , N.J., Bauder, J.W., Pearson, E.K., *Basic of salinity and sodicity effectson soil properties*. Land Resources and Environmental Sciences Department Montana State University – Bozeman. **2002**.

- [60] Irvine, S.A., Doughton, J.A., Salinity and sodicity, Implications for farmers in Central Queensland , *Proceeding of the 10th Australian Agronomy Conference*,Hobart, **2001**.
- [61] Chowdhury, R.N., *Geomechanics risk model for multiple failures along rock discontinuities*, Mining Science and Geomechanics Abstracts, 23 (5) 337-346, **1986**.
- [62] Chowdhury, R.N., Xu, D.W., *Geotechnical system reliability of slopes*, Reliability Engineering and System Safety, 4, 41-151, **1995**.
- [63] Leventhal, A.R., Barker, C.S., Ambrosis, L.P., Malanjkh and copper project-overview of the geotechnical investigation for optimum mining exploration, *Regional Symposium on Rock Slopes*, India, 69-78. **1992**.
- [64] Sculla, P., Franklib, J., Chadwickc, O.A., *The application of classification tree analysis to soil type prediction in a desert landscape*, Ecological Modelling, 181, 1-15, **2005**.
- [65] Chang, K., Chiang, S., Hsu, M., *Modeling typhoon-and earthquake-induced landslides in a mountainous watershed using logistic regression*, Geomorphology 89, 335–347, **2007**.
- [66] Luzi, L., Pergalani, F., Terlien, M.T.J., *Slope vulnerability to earthquakes at subregional scale, using probabilistic techniques and geographic information systems*, Engineering Geology, 58, 313–336, **2000**.
- [67] Xu, M., Watanachaturaporn, P., Varshney, P., Arora, M., *Decision tree regression for soft classification of remote sensing data*, Remote Sensing of Environment 97, 322–336, **2005**.
- [68] Arditi, D., Pulket,T., *Predicting the outcome of construction litigation using boosted decision trees*, Journal of Computing in Civil Engineering 19 (4) 387–393, **2005**.
- [69] Miller, H.J., and Han. J., *Geographic Data Mining and Knowledge Discovery*, CRC Press, Boca Raton, Fla, USA, **2001**.
- [70] Lee, S., Ryu, J., Won, J., Park, H., *Determination and application of weights for landslide susceptibility mapping using an artificial neural network*, Engineering Geology, 71, 289–302, **2004**.
- [71] Ayalew, L., Yamagishi, H., *The application of GIS-based logistic regression forlandslide susceptibility mapping in the Kakuda-Yahiko Mountains, Central Japan*, Geomorphology 65, 15–31, **2005**.

- [72] Lee, S., Pradhan, B., *Landslide hazard mapping at Selangor, Malaysia using frequency ratio and logistic regression models*, *Landslides* 4, 33–41, **2007**.
- [73] Nefeslioglu, H., Duman, T., Durmaz, S., *Landslide susceptibility mapping for a part of tectonic Kelkit Valley (Eastern Black Sea region of Turkey)*, *Geomorphology* 94, 401–418, **2008**.
- [74] Şengezer, B., Ansal A., Bilen, Ö., *Evaluation of parameters affecting earthquake damage by decision tree techniques*, *Natural Hazards* 47, 547–568, **2008**.
- [75] Saito, H., Nakayama, D., Matsuyama, H., *Comparison of landslide susceptibility based on a decision-tree model and actual landslide occurrence: the Akaishi Mountains, Japan*, *Geomorphology*, 108–121, **2009**.
- [76] Choi, M., Lee, G., *Decision tree for selecting retaining wall systems based on logistic regression analysis*, *Automation in Construction*, 19, 917–928, **2010**.
- [77] Wan, S., Lei, T.C., *A knowledge-based decision support system to analyze the debris-flow problems at Chen-Yu-Lan River, Taiwan*, *Knowledge-Based Systems* 22, 580–588, **2009**.
- [78] Nefeslioglu, H., Sezer, E., Gokceoglu, C., Bozkir, A., Duman, T., *Assessment of landslide susceptibility by decision trees in the metropolitan area of Istanbul, Turkey*. *Mathematical Problems in Engineering* 2010, Article ID 901095, **2010**.
- [79] Pradhan, B., Lee, S., Buchroithner, M.F., *A GIS-based back-propagation neural network model and its cross-application and validation for landslide susceptibility analyses*, *Computers, Environment and Urban Systems* 34 (3), 216–235, **2010a**.
- [80] Pradhan, B., Lee, S., Buchroithner, M.F., *Remote sensing and GIS-based landslide susceptibility analysis and its cross-validation in three test areas using a frequency ratio model*, *Photogrammetrie, Fernerkundung, Geoinformation* 1, 17–32, **2010b**.
- [81] Pradhan, B., Lee, S., Buchroithner, M.F., *Use of geospatial data for the development of fuzzy algebraic operators to landslide hazard mapping: a case study in Malaysia*. *Applied Geomatics* 1, 3–15, **2009**.
- [82] Yeon, Y.K., Han, J.G., Ryu, K.H., *Landslide susceptibility mapping in Injae, Korea, using a decision tree*. *Engineering Geology* 116, 274–283, **2010**.

- [83] Zorluer, İ., İcaga, Y., Yurtcu, S., Tosun, H., *Application of a fuzzy rule based method for the determination of clay dispersibility*, Geoderma, 160, 189-196, **2010**.
- [84] Ma, Y. *Data Warehousing, OLAP and Data Mining: An Integrated Strategy For Use At FAA*, Department of Electrical Engineering and Computer Science, Massachusetts Institute of Technology, **1998**.
- [85] Roiger J.R., Geatz M.W., *Data mining a tutorial-based primer*, Addison Wesley, Boston, 150s, **2003**.
- [86] Bounsaythip, C., Esa, R. R., *Overview of Data Mining For Customer Behavior Modeling*, VTT Information Technology Research Report, Version:1, 1-53, **2001**.
- [87] Akpınar, H., *Veri Tabanlarında Bilgi Keşfi ve Veri Madenciliği*, İ.Ü. İşletme Fakültesi Dergisi, C:29, S: 1/ Nisan 2000, 1-22, **2000**.
- [88] IBM, *Statistical package for social sciences*, Property of IBM SPSS Statistics for Windows, Version 20.0. Armonk, NY, IBM Corp., **2011**.
- [89] Piegorsch, W., *Complementary log-Regression for Generalized Linear Models.*, The American Statistician, Vol: 46, No:2, 94-99, **1992**.
- [90] Strauss, D., *The Many Faces of Logistic Regression*, The American Statistician, Vol:46, No:4, 321-327, **1992**.
- [91] Yeşilnacar, E., Topal, T., *Landslide susceptibility mapping: A comparison of logistic regression and neural networks methods in a medium scale study, Hendek region (Turkey)*, Engineering Geology, 79, 251-266, **2005**.
- [92] Rodríguez, M.J.G., Malpica, J.A., Benito, B., Díaz, M., *Susceptibility assessment of earthquake-triggered landslides in El Salvador using logistic regression*, Geomorphology 95, 172–191, **2008**.
- [93] Das I., Sahoo S., Westen Van C., Stein, A., Hack, R., *Landslide susceptibility assessment using logistic regression and its comparison with a rock mass classification system, along a road section in the northern Himalayas (India)*, Geomorphology, 114, 627–637, **2010**.

- [94] Yılmaz, I., *A case study from Koyulhisar (Sivas-Turkey) for landslide susceptibility mapping by Artificial Neural Networks*, Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 68 (3), 297-306, **2009**.
- [95] Dong, J.J., Tung Y.H., Chen, C.C., Liao, J.J., Pan, Y.W., *Logistic regression model for predicting the failure probability of a landslide dam*. Engineering Geology 117, 52–61, **2011**.
- [96] Süzen, M.L., *Data driven landslide hazard assessment using geographical information systems and remote sensing.*, Ph.d. Thesis, Middle East Technical University, The Graduate School of Natural and Applied Science, Ankara, **2002**.
- [97] Akgün, A., Bulut, F., *GIS-based landslide susceptibility for Arsin-Yomra (Trabzon, North Turkey) region*, Environmental Geology, 51,1377-1387, **2007**.
- [98] Coşkun, S., Kartal, M., Coşkun, A., Bircan, H., *Lojistik regresyon analizinin incelenmesi ve dış hekimliğinde bir uygulaması*, Cumhuriyet Üniversitesi Dış Hekimliği Fakültesi Dergisi, Sayı 1, 10s, **2004**.
- [99] Hosmer, D.W., Lemeshow, S., *Applied Logistic Regression*, 2nd edition, Wiley, New York, 428p. **2000**.
- [100] Rumelhard, S., McClelland, J.L., *Parallel distributed processing. Explorations in the microstructure of cognition*, vols. 1-2, Mit Press. Cambridge. Mass.,**1986**.
- [101] Lippmann, R.P., *An introduction to computing with neural nets*, IEEE acoustic Speech and signal processing 2, 4-22. **1987**.
- [102] Haykin, S. 1994. *Neural Networks: A Comprehensive Foundation*, New York, Macmillan College Publishing Company, 1994, ISBN 0-02-352761-7.
- [103] Mohamedzein, Y.E.A., Ibrahim, R., Alsanosi, A., *Prediction of swelling pressure of expansive soils using Neural Networks*, Expansive Soils: Recent advances in characterization and treatment, Chapter 17, 245-256, **2007**.
- [104] Sönmez, H., Tuncay E., Gokceoglu, C., *Models to predict the uniaxial compressive strength and the modulus of elasticity for Ankara Agglomerate*, International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences 41, 717–729, **2004**.

- [105] Sönmez, H., Gokceoglu, C., Nefeslioglu, H.A., Kayabasi, A., *Estimation of rock modulus: for intact rocks with an artificial neural network and for rock masses with a new empirical equation*, International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 43, 224–235, **2006**.
- [106] Tunusluoglu, M.C., Gokceoglu, C., Sonmez, H., Nefeslioglu, H.A., *An artificial neural network application to produce debris source areas of Barla, Besparmak, and Kapi Mountains (NW Taurids, Turkey)*, Natural Hazards and Earth System Sciences 7, 557–570, **2007**.
- [107] Türköz, M., Tosun, H., *Harran kili şişme potansiyelinin belirlenmesinde yapay sinir ağları ve çoklu regresyon modellerinin kullanımı*, Eskisehir Osmangazi Üniversitesi Müh. Mim. Fak.Dergisi C.XXI, 125-140, **2008**.
- [108] Dipova, N., Cangir B., *Lagün Kökenli Kil-Silt Zeminde Sıkışabilirlik Özelliklerinin Regresyon ve Yapay Sinir Ağları Yöntemleri ile Belirlenmesi*, İMO Teknik Dergi, 5069-5086, **2010**.
- [109] Sağıroğlu, Ş., Beşdok, E., Erler, M., *Mühendislikte Yapay Zeka Uygulamaları, Yapay Sinir Ağları*, Ufuk Yayınevi, Kayseri, **2003**.
- [110] Yurtoğlu, H., *Yapay Sinir Ağları Metodolojisi İle Öngörü Modellemesi: Bazı Makroekonomik Değişkenler İçin Türkiye Örneği*, Uzmanlık Tezi, Ekonomik Modeller ve Stratejik Araştırmalar Genel Müdürlüğü, DPT, **2005**.

## ÖZGEÇMİŞ

### Kimlik bilgileri

Adı Soyadı: Ayşegül Turgut

Doğum Yeri: Ankara

Medeni Hali: Bekar

E-posta: aturgut@hacettepe.edu.tr

Adres: Hacettepe Üniversitesi, Mühendislik Fak., Jeoloji Müh. Böl., Uygulamalı Jeoloji Anabilim Dalı, 06800 Beytepe, Ankara.

### Eğitim

Lise (1996-2000): Sincan Y.D.A Lise

Lisans (2000-2004): Hacettepe Üniversitesi Jeoloji Mühendisliği Bölümü

Yüksek Lisans (2004-2007): Hacettepe Üniversitesi Jeoloji Mühendisliği Bölümü

Doktora (2007-2013): Hacettepe Üniversitesi Jeoloji Mühendisliği Bölümü

### Yabancı Dil ve Düzeyi

İngilizce (Çok iyi)

### İş Deneyimi

Eylül 2004-Aralık 2005: Form & Beril Jeoteknik Mühendislik Ltd. Şti, Jeoloji Mühendisi

Aralık 2005-Nisan 2013: H.Ü. Jeoloji Mühendisliği Bölümü, Araştırma Görevlisi

Nisan 2013-halen devam ediyor: Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, Jeoloji Mühendisi

### Deneyim Alanları

Mühendislik jeolojisi, kaya ve toprak mekaniği.

### Tezden Üretilmiş Projeler ve Bütçesi

Hacettepe Üniversitesi Bilimsel Araştırmalar Birimi tarafından desteklenen 012D06602001 numaralı “Killerde Dispersiviteyi Etkileyen Yeni Faktörlerin Araştırılması ve Bunlar Kullanılarak Dispersivitenin Kestirimi” başlıklı proje.

Proje Bütçesi: 10200 TL

**Tezden Üretilmiş Yayınlar**

**Tezden Üretilmiş Tebliğ ve /veya Poster Sunumu İle Katıldığı Toplantılar**

## EKLER

### EK 1: Lojistik regresyon ve karar ağaç modellerine ilişkin uygulama örneği.

#### (a) TDS-% Na Karar Ağacı Modeli Örneği

A	B	C	D	E	F	G
	Veriler	TDS (meq/l)	11	Karar	Dispersif değil veya Az Dispersif	
		Na (%)	20			



=EĞER(C2>12,41;"Orta Dispersif veya Dispersif";(EĞER(C3>26,32;"Az Dispersif veya Orta Dispersif";"Dispersif değil veya Az Dispersif")))

Yukarıda verilen formül kullanılarak tez çalışması kapsamında incelenen K6 no.lu örneğe ait TDS ve % Na değerleri kullanılarak yapılan sınıflandırma aşağıda verilmiştir.

B	C	D	E	F	G
Veriler	TDS (meq/l)	125,33	Karar	Orta Dispersif veya Dispersif	
	Na (%)	78,82			

### (b) SAR-ESP Karar Ağacı Modeli Örneği

A	B	C	D	E
Veriler	ESP	1,79	Karar	Az Dispersif veya Dispersif Değil
	SAR	0,39		



=EĞER(C1>1,8;(EĞER(C2>7,31;"Dispersif veya Orta Dispersif";"Orta Dispersif"));(EĞER(C2>0,4;"Az Dispersif";"Az Dispersif veya Dispersif Değil")))

Yukarıda verilen formül kullanılarak tez çalışması kapsamında incelenen K6 no.lu örneğe ait SAR ve ESP değerleri kullanılarak yapılan sınıflandırma aşağıda verilmiştir.

A	B	C	D	E
Veriler	ESP	48,12	Karar	Dispersif veya Orta Dispersif
	SAR	27,72		

### (c) Lojistik Regresyon Modeli Örneği

Öncelikle tez çalışması kapsamında lojistik regresyon modeli kullanılarak önerilen eşitlik yardımıyla verilerin olasılık değerleri kestirilmiştir. Daha sonra elde edilen olasılık değerlerine göre ilgili istatistiksel formül kullanılarak dispersivite sınıfı kestirilmiştir.

$$\text{Sınıf olasılığı} = -10.548 + 0.190 \text{ TDS} + 0.270 \text{ Na}$$

<b>Veriler</b>	<b>TDS (meq/l)</b>	<b>13</b>	<b>Sınıf Olasılığı</b>	<b>0,022</b>
	<b>Na (%)</b>	<b>30</b>	<b>Karar</b>	<b>Dispersif</b>



$$\text{Sınıf olasılığı} = (-10,548 + (0,19 * C2) + (0,27 * C3))$$

$$\text{Karar} = \text{EĞER}(((\text{ÜS}(E2))/1 + (\text{ÜS}(E2)))) > 0,5; \text{"Dispersif"}; \text{"Dispersif Değil"})$$

Yukarıda verilen formül kullanılarak tez çalışması kapsamında incelenen K6 no.lu örneğe ait SAR ve ESP değerleri kullanılarak yapılan sınıflandırma aşağıda verilmiştir.

	<b>A</b>	<b>B</b>	<b>C</b>	<b>D</b>	<b>E</b>	<b>F</b>
<b>Veriler</b>	<b>TDS</b>	<b>125,33</b>	<b>Sınıf Olasılığı</b>	<b>34,5461</b>		
	<b>Na</b>	<b>78,82</b>	<b>Karar</b>	<b>Dispersif</b>		