

**T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**ADAPAZARI ZEMİNLERİNE AİT FİZİKSEL,
MEKANİK ve DİNAMİK ÖZELLİKLER
ARASINDAKİ İLİŞKİLERİN İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Mustafa İLHAN

Enstitü Anabilim Dalı : JEOFİZİK MÜHENDİSLİĞİ
Tez Danışmanı : Yrd. Doç. Dr. T. Fikret KURNAZ

Eylül 2016

T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**ADAPAZARI ZEMİNLERİNE AİT FİZİKSEL,
MEKANİK ve DİNAMİK ÖZELLİKLER
ARASINDAKİ İLİŞKİLERİN İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Mustafa İLHAN

Enstitü Anabilim Dalı : JEOFİZİK MÜHENDİSLİĞİ

Bu tez 30 / 09 /2016 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oybirliği ile kabul edilmiştir.


Yrd. Doç. Dr. Can
KARAVUL
Jüri Başkanı


Yrd. Doç. Dr. Uğur
DAĞDEVİREN
Üye


Yrd. Doç. Dr. T. Fikret
KURNAZ
Üye

BEYAN

Tez içindeki tüm verilerin akademik kurallar çerçevesinde tarafımdan elde edildiğini, görsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçların akademik ve etik kurallara uygun şekilde sunulduğunu, kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapılmadığını, başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunulduğunu, tezde yer alan verilerin bu üniversite veya başka bir üniversitede herhangi bir tez çalışmasında kullanılmadığını beyan ederim.



Mustafa İLHAN

30/09/2016

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans eğitimim boyunca danışmanlığımı yapan, tez çalışmam süresince bilgi ve tecrübelerini benden esirgemeyen değerli hocam Yrd.Doç.Dr. T. Fikret KURNAZ'a sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Yüksek lisans eğitimim sırasında katkılarından dolayı, Yrd.Doç.Dr. Uğur DAĞDEVİREN'e, Yrd.Doç.Dr. Alparslan S. DEMİR 'e ve Yrd.Doç.Dr. Eray YILDIRIM'a ayrıca teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR	i
İÇİNDEKİLER	ii
SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ	v
ŞEKİLLER LİSTESİ	vii
TABLolar LİSTESİ	xi
ÖZET	xii
SUMMARY	xiii
BÖLÜM 1.	
GİRİŞ	1
BÖLÜM 2.	
ZEMİNLERİN DİNAMİK, MEKANİK ve FİZİKSEL ÖZELLİKLERİ.....	5
2.1. Zeminlerin Dinamik Özellikleri	5
2.1.1. Cisim dalgaları.....	5
2.1.2. Yüzey dalgaları	7
2.1.3. Sismik hızların önemi ve elde edilme yöntemleri.....	10
2.1.3.1. Sismik kırılma yöntemi.....	12
2.1.3.2. Sismik yansıma.....	14
2.1.3.3. Kuyu içi ölçümleri.....	14
2.1.3.4. Yüzey dalgası analizi yöntemleri.....	14
2.2. Zeminlerin Fiziksel ve Mekanik Özellikleri.....	15
2.2.1. Standart penetrasyon deneyi.....	15
2.2.2. Elek analizi.....	19
2.2.3. Kıvam limitleri deneyi.....	22
2.2.3.1. Kıvam limitlerinin mühendislikte kullanımı.....	26

2.2.4. Zeminlerin kayma mukavemeti.....	27
2.2.4.1. Mohr kırılma teorisi.....	29
2.2.4.2. Mohr–Coulomb kırılma hipotezi.....	30
 BÖLÜM 3.	
ADAPAZARI’NIN JEOLJİK ÖZELLİKLERİ.....	33
3.1. Doğu Marmara Bölgesinin Jeolojik Evrimi.....	33
3.1.1. Sakarya ilinin jeolojisi.....	34
3.1.2. Adapazarı ovası (Akova).....	35
3.1.3. Akovanın oluşumu hakkında görüşler.....	36
3.1.4. Adapazarı jeolojisi ve jeomorfolojisi.....	42
3.2. Adapazarı Zeminlerine Genel Bir Bakış.....	43
3.2.1. Adapazarı yeraltı suyu.....	52
 BÖLÜM 4.	
UYGULANAN YÖNTEMLER.....	53
4.1. Regresyon Analizi.....	53
4.1.1. Basit doğrusal regresyon analizi.....	54
4.1.2. Çoklu doğrusal regresyon analizi.....	57
4.2. Yapay Zeka.....	59
4.2.1. Yapay zekanın tanımı.....	59
4.2.2. Yapay sinir ağlarının kısa tarihçesi.....	61
4.2.3. Yapay sinir ağlarının bileşenleri.....	62
4.2.4. Yapay sinir ağlarının sınıflandırılması.....	65
4.2.5. Yapay sinir ağlarında öğrenme kuralları.....	67
4.2.6. Çok katmanlı algılayıcı.....	68
4.2.7. Levenberg-marquardt algoritması.....	71
4.2.8. Yapay sinir ağlarının avantaj ve dezavantajları.....	72
4.2.9. Yapay sinir ağlarının uygulama alanları.....	73

BÖLÜM 5.

UYGULAMALAR	74
-------------------	----

BÖLÜM 6.

TARTIŞMA ve SONUÇLAR.....	93
---------------------------	----

KAYNAKLAR	102
-----------------	-----

ÖZGEÇMİŞ	109
----------------	-----



SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

μ	: Makaslama modülü
a	: Maksimum deprem ivmesi
β_0, β_1	: Regresyon katsayıları
c	: Kohezyon
ε	: Hata terimi
CPT	: Koni Penetrasyon Testi
ÇKA	: Çok Katmanlı Algılayıcı
D_{50}	: Orta dane boyutu
D_r	: Bağlı birim hacim ağırlık
E	: Young (elastisite) modülü
f	: Aktivasyon fonksiyonu
FC	: İnce dane oranı
I_c	: Relatif konsistans
I_p	: Plastisite indisi
I_L	: Likitlik indisi
İEÇ	: İşlemci Eleman Çıkışı
k	: Bulk modülü
L	: Love dalgaları
MASW	: Yüzey Dalgalarının Çok Kanallı Analizi
N	: Ölçülen (ham) SPT değeri
N_{60}	: Düzeltilmiş N değeri
P	: Boyuna dalgalar
q_c	: Direnç
r	: Korelasyon katsayısı
R	: Rayleigh dalgaları
R_f	: Sürtünme oranı

S	: Enine dalgalar
$SASW$	: Yüzey Dalgaları Spektral Analizi
S_H	: S dalgası yatay bileşeni
SPT	: Standart Penetrasyon Testi
S_V	: S dalgası düşey bileşeni
u_o	: Boşluk suyu basıncı
V_p	: P dalga hızı
V_s	: S dalga hızı
V_{s30}	: 30 metre derinlikteki ortalama kayma dalgası hızı
w_L	: Likit limit
w_p	: Plastik limit
w_n	: Su içeriği
x	: Bağımsız değişken
y	: Bağımlı değişken
YSA	: Yapay Sinir Ağları
λ	: Lamé sabiti
ρ	: Yoğunluk
σ	: Poisson oranı
Σ	: Toplam fonksiyonu
σ'	: Ortalama efektif gerilme
σ'_v	: Dikey efektif gerilme
τ_f	: Kırılma anında zeminin kayma direnci
ϕ	: Kayma mukavemeti açısı

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 2.1. P dalgası hareketi.....	5
Şekil 2.2. S dalgası hareketi.....	6
Şekil 2.3. SH ve SV dalga yayınımları.....	6
Şekil 2.4. Rayleigh dalgası hareketi.....	8
Şekil 2.5. Love dalgası hareketi.....	8
Şekil 2.6. Göle bir taş atma neticesinde oluşan dalgacıklar.....	9
Şekil 2.7. Poisson değerleri ile P, S ve Rayleigh dalgalarının hız ilişkisi.....	9
Şekil 2.8. Homojen, izotrop ve yarı sonsuz ortamda dalgaların yayılımı.....	10
Şekil 2.9. Sismik kırılma çalışması şematik gösterimi.....	13
Şekil 2.10. Basit iki tabakalı yeraltı modeli.....	13
Şekil 2.11. SPT, örselenmiş numune alıcı.....	17
Şekil 2.12. Donut ağırlık sistemi.....	17
Şekil 2.13. Emniyetli ağırlık düşürme.....	17
Şekil 2.14. Kohezyonlu Zeminlerde, SPT Sayısından Tek Eksenli Dayanımın Belirlenmesi.....	19
Şekil 2.15. Tipik bir tane çapı dağılımı (granülometre) eğrisi.....	21
Şekil 2.16. Zeminlerde su içeriği - hacim değişimi davranışı ve kıvam limitleri.....	25
Şekil 2.17. Casagrande plastisite kartı.....	26
Şekil 2.18. Çeşitli gerilme durumları için Mohr daireleri I) çekme II) kayma III) tek eksenli sıkışma IV – V) iki eksenli sıkışma.....	29
Şekil 3.1. Jeolojik zaman cetvelinin bir bölümü.....	34
Şekil 3.2. Adapazarı' nın KD'dan GB' ya doğru morfolojik görünümü.....	43
Şekil 3.3. Adapazarı İlçesi' nde açılan bazı sondaj yerleri.....	45
Şekil 3.4. Adapazarı' nın ilk 15 metredeki zemin tabakaları.....	46
Şekil 3.5. Adapazarı şehrinin tipik kesidi.....	47
Şekil 3.6. Adapazarı' nda ağır hasar alan bölgeden zemin kesidi (B6).....	47

Şekil 3.7. Adapazarı sayısal haritası.....	48
Şekil 3.8. Belli derinliklerde Adapazarı zemin haritası.....	49
Şekil 3.9. Adapazarı YASS seviyeleri.....	52
Şekil 4.1. Biyolojik nöronun yapısı.....	60
Şekil 4.2. Bir nöronun YSA modeli (İEC; İşlem Elemanının Çıkışı).....	60
Şekil 4.3. Çok katmanlı ağ yapısı.....	63
Şekil 4.4. Lineer aktivasyon fonksiyonu.....	64
Şekil 4.5. Sigmoid aktivasyon fonksiyonu.....	64
Şekil 4.6. Tan-sigmoid aktivasyon fonksiyonu.....	64
Şekil 4.7. Danışmanlı öğrenme yapısı.....	66
Şekil 4.8. Danışmansız öğrenme yapısı.....	66
Şekil 4.9. Takviyeli öğrenme yapısı.....	67
Şekil 4.10. Geri yayımlı çok katmanlı algılayıcılarda çalışma prosedürü.....	70
Şekil 5.1. (a) Likidite indisi değerine göre c değerini tahminleyen YSA modelinin şematik gösterimi. (b) YSA modelinin verdiği sonuç.....	79
Şekil 5.2. (a) Plastisite indisi değerine göre c değerini tahminleyen YSA modelinin şematik gösterimi. (b) YSA modelinin verdiği sonuç.....	79
Şekil 5.3. (a) SPT değerine göre c değerini tahminleyen YSA modelinin şematik gösterimi. (b) YSA modelinin verdiği sonuç.....	80
Şekil 5.4. (a) SPT değerine göre Φ değerini tahminleyen YSA modelinin şematik gösterimi. (b) YSA modelinin verdiği sonuç.....	80
Şekil 5.5. (a) V_s değerine göre c değerini tahminleyen YSA modelinin şematik gösterimi. (b) YSA modelinin verdiği sonuç.....	81
Şekil 5.6. (a) V_s değerine göre kayma açısı değerini tahminleyen YSA modelinin şematik gösterimi. (b) YSA modelinin verdiği sonuç.....	81
Şekil 5.7. (a) c ve Φ değerine göre SPT değerini tahminleyen YSA modelinin şematik gösterimi. (b) YSA modelinin verdiği sonuç.....	82
Şekil 5.8. (a) c ve Φ değerine göre V_s değerini tahminleyen YSA modelinin şematik gösterimi. (b) YSA modelinin verdiği sonuç.....	82
Şekil 5.9. (a) w_L ve w_P değerine göre c değerini tahminleyen YSA modelinin şematik gösterimi. (b) YSA modelinin verdiği sonuç.....	83

Şekil 5.10. (a) w_L ve I_p değerine göre c değerini tahminleyen YSA modelinin şematik gösterimi. (b) YSA modelinin verdiği sonuç.....	83
Şekil 5.11. (a) w_p ve I_p değerine göre c değerini tahminleyen YSA modelinin şematik gösterimi. (b) YSA modelinin verdiği sonuç.....	84
Şekil 5.12. (a) SPT ve V_s değerine göre c değerini tahminleyen YSA modelinin şematik gösterimi. (b) YSA modelinin verdiği sonuç.....	84
Şekil 5.13. (a) SPT ve V_s değerine göre Φ değerini tahminleyen YSA modelinin şematik gösterimi. (b) YSA modelinin verdiği sonuç.....	85
Şekil 5.14. (a) w_n ve w_L değerine göre c değerini tahminleyen YSA modelinin şematik gösterimi. (b) YSA modelinin verdiği sonuç.....	85
Şekil 5.15. (a) w_n ve I_p değerine göre c değerini tahminleyen YSA modelinin şematik gösterimi. (b) YSA modelinin verdiği sonuç.....	86
Şekil 5.16. (a) w_n ve w_p değerine göre c değerini tahminleyen YSA modelinin şematik gösterimi. (b) YSA modelinin verdiği sonuç.....	86
Şekil 5.17. (a) w_n ve SPT değerine göre c değerini tahminleyen YSA modelinin şematik gösterimi. (b) YSA modelinin verdiği sonuç.....	87
Şekil 5.18. (a) #4, #200 ve I_L değerine göre c değerini tahminleyen YSA modelinin şematik gösterimi. (b) YSA modelinin verdiği sonuç.....	87
Şekil 5.19. (a) #4, #200 ve I_L değerine göre Φ değerini tahminleyen YSA modelinin şematik gösterimi. (b) YSA modelinin verdiği sonuç.....	88
Şekil 5.20. (a) w_L , w_p ve I_p değerine göre c değerini tahminleyen YSA modelinin şematik gösterimi. (b) YSA modelinin verdiği sonuç.....	88
Şekil 5.21. (a) w_n , w_L ve I_p değerine göre c değerini tahminleyen YSA modelinin şematik gösterimi. (b) YSA modelinin verdiği sonuç.....	89
Şekil 5.22. (a) w_n , w_L , ve w_p değerine göre c değerini tahminleyen YSA modelinin şematik gösterimi. (b) YSA modelinin verdiği sonuç.....	89
Şekil 5.23. (a) w_n , w_p ve I_p değerine göre c değerini tahminleyen YSA modelinin şematik gösterimi. (b) YSA modelinin verdiği sonuç.....	90
Şekil 5.24. (a) w_n , w_L , w_p ve I_p değerine göre c değerini tahminleyen YSA modelinin şematik gösterimi. (b) YSA modelinin verdiği sonuç.....	90
Şekil 5.25. (a) w_n , #4, #200, w_L ve w_p değerine göre c değerini tahminleyen YSA modelinin şematik gösterimi. (b) YSA modelinin verdiği sonuç.....	91

Şekil 5.26. (a) w_n , #4, #200, w_L ve w_p değerine göre Φ değerini tahminleyen YSA modelinin şematik gösterimi. (b) YSA modelinin verdiği sonuç..... 91



TABLolar LİSTESİ

Tablo 2.1. Zemin Tanelerinin Boyutlarına Göre Sınıflandırılması.....	20
Tablo 2.2. Zeminlerin tane çapı dağılımını belirlemek için kullanılan elek aralıkları.....	21
Tablo 2.3. İnce taneli zeminlerin kıvamı.....	27
Tablo 4.1. Regresyon analizinde sebep - sonuç durumu.....	53
Tablo 5.1. Veri seti istatistik özellikleri.....	75
Tablo 5.2. Adapazarı zeminlerine ait mekanik, fiziksel ve dinamik özellikler arasındaki ilişkiler için çoklu regresyon analizi sonuçları.....	76
Tablo 5.3. YSA modelleri (R^2) katsayıları ve nöron sayıları.....	78
Tablo 5.4. Çoklu regresyon ve YSA sonuçlarının karşılaştırılması.....	92

ÖZET

Anahtar kelimeler: İndeks özellikleri, kayma mukavemeti, Adapazarı, basit regresyon analizi, çoklu regresyon analizi, yapay sinir ağları (YSA).

Zeminlerin fiziksel, mekanik ve dinamik parametrelerini belirlemek geoteknik mühendisliği uygulamaları açısından oldukça önemlidir. Sığ ve derin temeller, şev stabilitesi ve derin kazılar, taşıma gücü gibi pek çok geoteknik mühendisliği projelerinde zeminlerin özellikleri doğru hesaplanmalıdır. Pek çok araştırmacı zeminlerin fiziksel, mekanik ve dinamik özellikleri arasındaki ilişkileri araştırmıştır. Son zamanlarda, klasik regresyon analizine göre daha iyi tahmin yeteneğine sahip olan Yapay Sinir Ağları (YSA) yöntemi geoteknik mühendisliği problemlerinin çözümünde kullanılmaya başlanmıştır. Bu çalışmada Adapazarı zeminlerinin fiziksel, mekanik ve dinamik özellikleri arasındaki ilişki çoklu regresyon ve yapay sinir ağları yöntemleri ile incelenmiştir. Bu amaçla Adapazarı sınırları içerisinde Zemin etüdü amacıyla yapılan sondaj çalışmalarından elde edilen örselenmemiş numunelerin laboratuvar sonuçları kullanılmıştır. İlk olarak, ince daneli zeminlerin fiziksel, mekanik ve dinamik özellikleri arasındaki ilişki çoklu regresyon analizi ile incelenmiş, daha sonra aynı analizler yapay sinir ağları yöntemi ile yapılmıştır. Sonuç olarak, çalışma alanındaki karmaşık zemin yapısı dikkate alındığında YSA analizleri Kabul edilebilir sonuçlar vermiştir.

BELONGING TO SOILS OF ADAPAZARI; INVESTIGATION OF THE RELATIONSHIPS BETWEEN PHYSICAL, MECHANICAL AND DYNAMIC PROPERTIES

SUMMARY

Keywords: Index properties, shear strength, Adapazari, simple regression analysis, multiple regression analysis, artificial neural networks (ANN).

To determine the physical, mechanical and dynamic properties of soils is very important for geotechnical engineering applications. In the analysis of many geotechnical engineering projects such as bearing capacity of shallow and deep foundations, slope stability and deep excavations, shear strength parameters of soils must be correctly estimated. Many researchers have been performed statistical studies on relationships between the physical, mechanical and dynamic properties of soils. Recently, Artificial Neural Networks (ANN) which is capable of higher estimates compared to classical regression analysis has begun to take place frequently in geotechnical engineering practice. In this study, the relationships between the physical, mechanical and dynamic properties of fine-grained soils have been investigated with multiple regression analysis and artificial neural network methods. For this purpose, experimental results belonging to the undisturbed samples obtained from drilling studies applied in Adapazari city borders are used. Firstly, the presence of relationships between the physical, mechanical and dynamic properties of the undisturbed samples were investigated with regression analysis. In addition, the predictability of shear strength from the index properties was evaluated by using ANN. Consequently, ANN has provided acceptable results on determining the shear strength of fine-grained soils from index properties considering the local soil conditions in the study area.

BÖLÜM 1. GİRİŞ

Zemin özelliklerinin doğru bir şekilde belirlenmesi geoteknik mühendisliği açısından hayati öneme sahiptir. Zeminlerin fiziksel, mekanik ve dinamik özelliklerinin doğru tespiti ise arazi ve laboratuvar çalışmalarının ilgili standartlara uygun olarak yürütülmesi ile mümkün olmaktadır.

Zeminlerin fiziksel, mekanik ve dinamik özellikleri arazi ve laboratuvar deneyleri ile belirlenebilmektedir. Bazı durumlarda olumsuz arazi koşulları, arazi deneylerinin yapılamamasına ya da laboratuvar deneyleri için uygun numune alınamamasına neden olabilmektedir. Bu durumlar karşısında bir çok araştırmacı zeminlerin fiziksel, mekanik ve dinamik özelliklerinin bir birleri ile olan ilişkilerini inceliyerek, olumsuz arazi koşulları nedeniyle tespit edilemeyen özelliklerin, tespit edilebilen özelliklerden yararlanılarak tahmini konusunda çalışmalar yapmışlardır.

Goh 1995'te yaptığı çalışmada, zemin korelasyonlarının modellenmesi adlı çalışmasının birinci aşamasında, normal yüklenmiş ve aşırı konsolide kumlar üzerinde gerçekleştirdiği YSA modellemesinde bağıl birim hacim ağırlık (D_r) ve ortalama efektif gerilmeyi (σ') girdi olarak almıştır. Çıktı olarak CPT (cone penetration test) koni uç direnci (q_c) ni tahmin etmiştir. Bu çalışmada eğitim için 93, test için 74 veri kullanmıştır. Doğrusal olmayan bu ilişkide korelasyon katsayısı eğitim için 0.97, test için 0.91 gibi yüksek düzeylerde elde edilmiştir. İkinci aşamada ise sıkıştırılmış killerin hidrolik iletkenliğini tahmin etmek amacıyla kurduğu modelde, girdi parametreleri olarak likit limit (w_L), plastisite indisi (I_P), çakıl, kum ve incelerin yüzdesi, kompaksiyon başlangıç doygunluk derecesi ve sıkıştırılmış durumdaki ağırlığı girdi olarak almıştır [1].

Ellis ve diğerleri 1995'te yaptığı çalışmada, kumlu zeminlerde gerilme-şekil değiştirme grafiklerini YSA ile modelleyerek, bunların deney eğrilerine çok benzerlik gösterdiğini açıklamışlardır [2]. Aynı yıl Cal; likit limit, plastisite indisi ve kil içeriğini kullanarak zemin sınıflandırmasını sayısal olarak belirlemiştir [3]. Basheer ve diğ. 1996'da yaptıkları çalışmada, atık depolama alanlarında yeraltı su seviyesine bağlı olarak zemin geçirimlilik değişimlerinin harita üzerinde tahmin ve sınırlarının belirlenmesinde YSA kullanmışlardır [4]. Aynı yıl Rizzo ve diğerleri, yeni alan karakterizasyonu metodu SCANN (Site Characterisation using Artificial Neural Networks) ile ayrık uzaysal dağılım (discrete spatially-distributed fields) haritalaması yapmışlardır [5].

Penumadu ve Zhao 1994'te yaptıkları çalışmada, YSA kullanarak drenajlı üç eksenli sıkışma koşullarında kumlu zeminlerde gerilme-deformasyon ve hacim değişikliği davranışlarını modellemişlerdir [6]. Romero ve Pamukcu 1996'da yaptıkları çalışmada, kayma modülü [7], Gribb ve Gribb 1994'te yaptıkları çalışmada, doymun olmayan zeminlerde hidrolik iletkenliğin bulunması [8], Najjar ve Basheer 1996'de yaptıkları çalışmada, kil dolgulara geçirimliliğin tahmini ve zemin sıkıştırması ile ilgili YSA modelleri geliştirmişlerdir [9]. Zhu ve diğerleri 1997 ve 1998'de yaptıkları çalışmalarda, zemin davranışları ile ilgili olarak yerinde oluşmuş zeminlerin modellenmesini yapmışlardır [10]. Ghaboussi ve Sidarta 1998'de yaptıkları çalışmada, üç eksenli deneyler yaparak kumlu zeminlerin drenajlı ve drenajsız davranışını modellemişlerdir [11]. Basheer 2000'de yaptığı çalışmada, zeminlerin histeresis modellemesi ile (Extended Konder stress - strain curve with one hysteresis loop) 960 veri kullanarak $R^2 = 0.99$ gibi çok yüksek değere ulaşmıştır [12]. Sivrikaya ve diğerleri 2004'te yaptıkları çalışmada, su muhtevası (w_n), likit limit (w_L), plastisite indisi (I_p), efektif gerilme (σ_v'), SPT N_{arazi} , N_{60} ile oluşturdukları iki benzer YSA modelinde drenajsız kayma dayanımını (c_u) $R^2 = 0.78$ ve $R^2 = 0.81$ düzeyinde bulmuşlardır [13].

Güllü ve diğerleri 2007'de yaptıkları çalışmada, YSA ile en büyük yer ivmesinin tahmin edilmesi başlıklı eserlerinde; ağ modelinde girdi parametrelerini büyüklük, uzaklık ve zemin koşulu, çıktı parametresini ise en büyük yer ivmesi olarak almışlardır. Ağın eğitim aşamasında, tahmin edilen en büyük yer ivmeleri ile ölçülen

ivmeler arasındaki korelasyon katsayısı %92, test aşamasında ise %64 olarak bulunmuştur [14]. Sinha ve Wang 2008’de yaptıkları çalışmada, iri ve ince daneli zeminlerde sıkıştırma ve geçirimsizlik özelliklerini bulma amacıyla fiziksel özellikleri girdi parametreleri olarak almışlardır ($R^2=0.92$). Altun ve diğerleri 2008’de yaptıkları çalışmada, üniform kumlarda sıkıştırma deneyi ile maksimum kuru birim hacim ağırlığın tahmininde $R^2=0.98$ bulmuşlardır [15].

Sivakugan ve diğerleri 1998’de yaptıkları çalışmada, iri daneli zeminlerde yüzeysel temellerin oturmasını YSA’da tahmin etmiştir. Girdi olarak 5 parametre kullanmıştır. Bunlar; uygulanan net basınç, ortalama SPT-N, temel genişliği, temel biçimi ve temel derinliğidir [16]. 2002 yılında Shahin ve diğerleri ise, kohezyonlu zeminler üzerinde yüzeysel temellerin oturmasını tahmin etmişlerdir. Burada girdiler; temel boyu, temel genişliği, taban basıncı ve zeminin sıkışabilirliğidir [17]. Bulunan korelasyon katsayıları geleneksel metodlarla karşılaştırıldığında; Meyerhof 1965’te yaptığı çalışmada [18], Schultze ve Sherif 1973’te yaptıkları çalışmada [19], Schmertmann ve diğerleri 1978’de yaptıkları çalışmada, temellerin oturmasını 60 mm’nin üzerinde aşırı tahminle (overpredict) bulmuşken YSA ile yapılan tahminde 10 - 20 mm gibi gerçeğe yakın oldukça düşük bir değer elde edilmiştir [20]. Goh 2002’de yaptığı çalışmada, olasılıksal YSA (PNN, Probability Neural Network) ile sismik ve zemin parametreleri arasındaki ilişkileri irdeleyerek sınıflama potansiyelini belirlemiştir [21]. Diğer bir çalışma ile Baziar ve Nilipour 2003’te yaptıkları çalışmada, Statistica programı ile D_{50} (orta dane boyutu), a (maksimum deprem ivmesi), σ'_0 (efektif gerilme), FC (ince dane miktarı), M_w (büyüklük), Z (zemin tabakasının derinliği), q_c (CPT koni uç direnci) parametreleri arasında güçlü ilişkilerin varlığını saptamışlardır. Daha sonra bu parametreler ile YSA’da 3 farklı model geliştirerek sınıflama potansiyelini değerlendirmişlerdir [22]. Kurup ve Griffin 2006’da yaptıkları çalışmada, çok katmanlı, ileri beslemeli (GRNN General Regression Neural Network) algoritması ile CPT verilerinden koni direnci (q_c), sürtünme oranı (R_f), toplam örtü yükü eşdeğer gerilmesi (σ_{v0}), efektif gerilme (σ'_{v0}), denge boşluk suyu basıncı (u_0) parametrelerini girdiler olarak almışlar ve kum (%), silt (%) ve kil (%) miktarlarını tahmin etmişlerdir [23].

Eray YILDIRIM, Cengiz SERTKAYA ve Can KARAVUL 2007’de yaptıkları çalışmada, Kuvaterner Alüvyonal zemin özellikleri taşıyan Adapazarı’nda 33 ölçüm yerinde yapılan 44 SCPT (Sismik Koni Penetrasyon Testi) ölçümlerinden elde edilen Kayma Dalgası Hızları (V_s) ile 64 Sondaj noktasından elde edilen SPT-N değerleri arasındaki ilişkileri inceleyerek modeller oluşturmuşlardır. Model olarak Yapay Sinir Ağları ve Sugeno – BM kullanmışlardır. Yaptıkları çalışma ile SPT-N ölçümleri ile kayma dalgası hızı (V_s) tahmininde $R^2=0.87$ bulmuşlardır. Oluşturulan bu modelin, Adapazarı’nda veya zemin özelliği benzer olan yerlerde çeşitli sebeplerle sismik deneylerin yapılamadığı durumlarda zemin dinamik özellikleri hakkında yaklaşık fikir edinmek veya sınırlı sayıda sismik deneylerin uygulanabildiği durumlarda ise, ölçülen hız değerlerini kontrol etmek ve sismik deney programını desteklemek amacıyla kullanılabileceğini önermişlerdir [24].

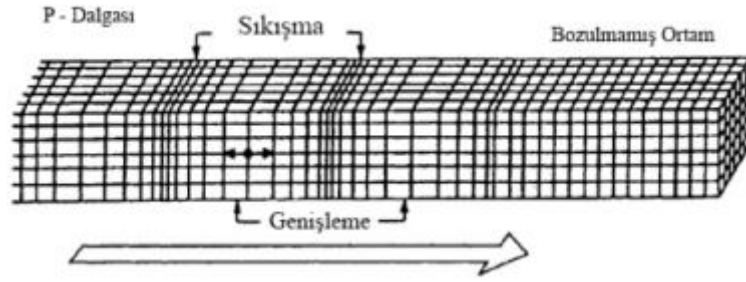
Bu çalışmada Adapazarı zeminlerine ait fiziksel, mekanik ve dinamik özellikler arasındaki ilişkiler incelenerek ortaya konmaya çalışılmıştır. Çalışmada kullanılan veriler Sakarya Büyükşehir Belediyesi arşivinde bulunan zemin etüt raporlarından temin edilmiştir.

BÖLÜM 2. ZEMİNLERİN DİNAMİK, MEKANİK ve FİZİKSEL ÖZELLİKLERİ

2.1. Zeminlerin Dinamik Özellikleri

2.1.1. Cisim dalgaları

Deprem oluştuğunda cisim ve yüzey dalgaları olmak üzere iki farklı dalga türü oluşur. Yeryüzünün iç kısımları boyunca hareket eden cisim dalgaları P ve S olmak üzere ikiye ayrılır. P dalgaları aynı zamanda birincil, sıkışma veya boyuna dalgalar olarak bilinir ve geçtikleri materyalde sıkışma ve genişlemeye sebep olurlar. P dalgaları, ses dalgaları gibi katı ve sıvılarda hareket edebilir [25]. Deprem kayıtlarında ilk olarak P dalgalarının görülmesinden dolayı, bu dalgalar birincil olarak adlandırılır [26].



Şekil 2.1. P dalgası hareketi [27].

P dalgaları diğer dalgalardan daha hızlıdır. Dış merkez (episantr) bölgesinde P dalgasının periyodu 1 s'den azdır. 1 s periyotlu dalgalar çok uzak mesafelere seyahat edebilir. P dalgasının hızı aşağıdaki bağıntılarla bulunabilir:

$$V_p = \sqrt{\frac{\lambda + 2\mu}{\rho}} = \sqrt{\frac{K + \frac{4\mu}{3}}{\rho}} \quad (2.1)$$

$$V_p = \sqrt{\frac{E}{\rho} \left(1 + \frac{2\sigma^2}{1-\sigma-2\sigma^2} \right)} = \sqrt{\frac{E}{\rho} \frac{1-\sigma}{(1-2\sigma)-(1+2\sigma)}} \quad (2.2)$$

Burada,

E; Young modülü,

K; Bulk modülü,

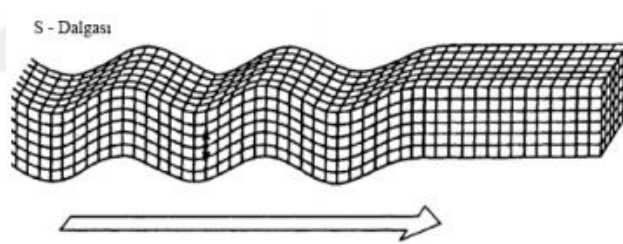
μ ; Makasalama (shear) modülü,

σ ; Poisson oranı,

λ ; Lamé sabiti,

ρ ; yoğunluğu göstermektedir [28].

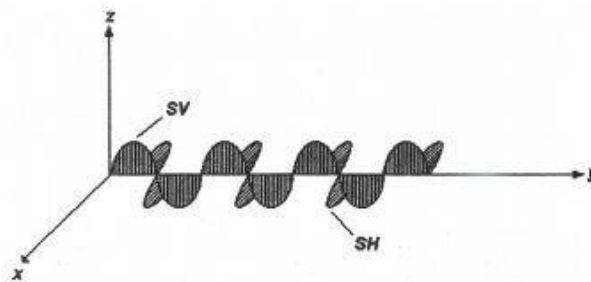
Deprem kayıtlarında ikincil olarak gözlenen dalgalar kesme, enine, rotasyonel veya S dalgası olarak bilinir [26]. S dalgaları geçtikleri materyallerde makaslama deformasyonlarına neden olurlar. Tanecik hareketi S dalgası yayılma yönüne diktir [25].



Şekil 2.2. S dalgası hareketi [27].

S dalgalarına taneciklerin hareket ettikleri doğrultuda polarize olmuş dalgalar da denir.

S dalgasının hareketi düşey (S_V) ve yatay (S_H) bileşen olarak ikiye ayrılabilir.



Şekil 2.3. SH ve SV dalga yayınımları [28].

S dalgalarının hızı aşağıdaki bağıntılar ile verilir:

$$V_s = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}} \quad (2.3)$$

$$V_s = \sqrt{\frac{E}{\rho} \frac{1}{2(1+\sigma)}} \quad (2.4)$$

Sıvılarda $\mu = 0$ olduğundan sıvı ortamlarda S dalgaları yayılamaz. P ve S dalga hızları ile elastik sabitler arasında aşağıdaki bağıntılar vardır:

$$\sigma = \frac{\left(\frac{V_p}{V_s}\right)^2 - 2}{2\left(\frac{V_p}{V_s}\right)^2 - 2} \quad (2.5)$$

$$E = \frac{V_p^2 \rho (1-2\sigma)(1+\sigma)}{1-\sigma} \quad (2.6)$$

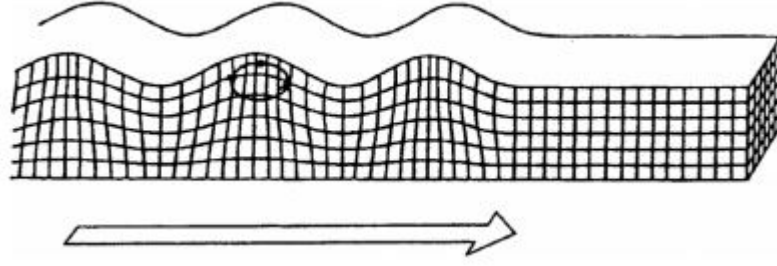
$$\frac{V_s}{V_p} = \sqrt{\frac{K}{\mu} + \frac{4}{3}} = \sqrt{\frac{1-\sigma}{\frac{1}{2}-\sigma}} \quad (2.7)$$

Poisson oranı σ , 0 ile 0,5 arasında değer alacağından (2.7) formülünde V_s/V_p oranında $\sigma = 0$ alınırsa V_s/V_p oranının alacağı en yüksek değer $\frac{V_s}{V_p} = \frac{1}{\sqrt{2}} = 0,70$ olur. Dolayısı ile V_s hızı V_p hızının en fazla %70 ine kadar değer alabilecektir [28].

2.1.2. Yüzey dalgaları

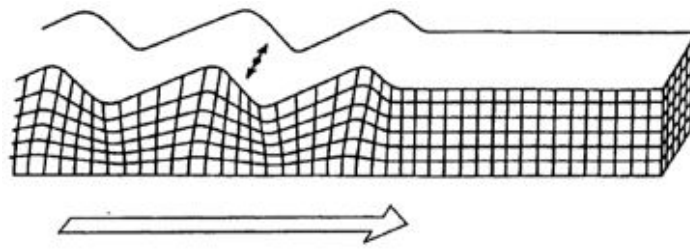
Sonsuz, homojen ve izotrop bir ortamda yalnızca P ve S dalgaları oluşmaktadır. Eğer ortam sınırlı ise, diğer dalgalar meydana gelebilir. Bu tarz dalgalara yüzey dalgaları adı verilir. Sismogramlar incelendiğinde yüzey dalgaları arasında en çok Rayleigh ve Love dalgaları görülmektedir. Yüzey dalgaları serbest yüzey ve altındaki tabaka sınırları boyunca yayılırlar. Bu nedenle özellikleri mantonun üst kısımları ve yer kabuğu tarafından etkilenmektedir [29]. Ground Roll olarak da adlandırılan Rayleigh dalgaları yüksek genlik, düşük frekans özelliği gösterir. Klasik sismik çalışmalarda gürültü olarak değerlendirilen yüzey dalgaları, yansıma ve kırılma sismiği

alışmalarında veri işlemlaşamasında filtrelenerek giderilir. Rayleigh dalgaları serbest yüzey boyunca hareket eder ve genlikleri derinlik ile üstel olarak azalır. Serbest yüzey üzerinde taneciğın hareketi elips şeklinde ve kaynak yönündedir (retrograde hareketi). Rayleigh dalgaları ancak katı ortamlarda ilerleyebilir [27].



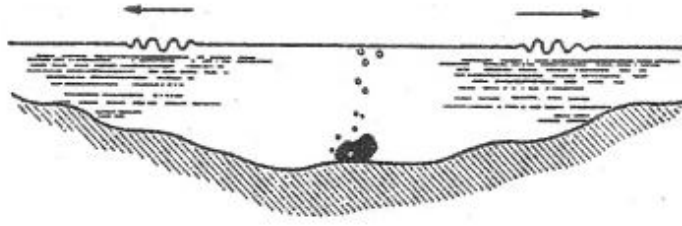
Şekil 2.4. Rayleigh dalgası hareketi [27].

Love dalgaları ise düşük S dalga hızına sahip ortamın, yüksek S dalga hızına sahip ortam üzerinde bulunması durumunda açığa çıkar [27]. Tanecik hareketi yer yüzeyine paralel şekilde ve enlemesinedir. Bu dalgalar polarize olmuş kesme dalgaları (S_H) olarak da adlandırılır. Sismik çalışmalarda kullanılan kaynaklar ile önemli ölçüde Love dalgaları oluşmaz. Bu nedenle genel sismik uygulamalarda Love dalgaları kullanılmaz. Love dalgalarının hızı Rayleigh dalgalarından yüksektir ve sismogramlar da daha önce görölmektedir [26].



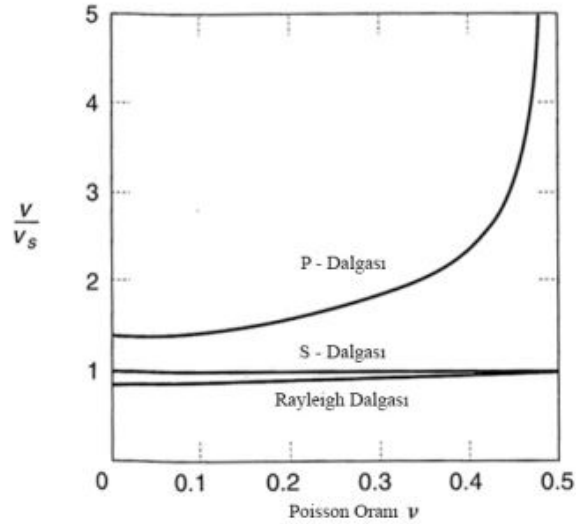
Şekil 2.5. Love dalgası hareketi [27].

Rayleigh dalgaları yer yüzeyi ile P ve S_V dalgalarının etkileşimi sonucu oluşmaktadır. Hem düşeyde hem de yatay da tanecik hareketleri vardır. Rayleigh dalgaları Şekil 2.6'da gösterildiği gibi göle atılmış bir taşın oluşturduğu dalgacıklara benzetilebilir [25].



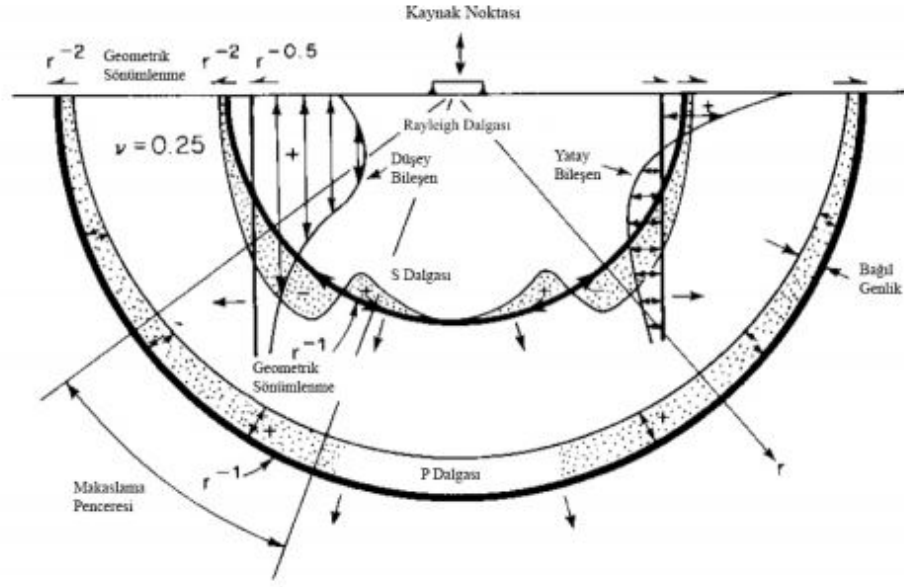
Şekil 2.6. Gölde bir taş atma neticesinde oluşan dalgacıklar [30].

Poisson oranı $\sigma = 1/4$ olduğu durumda, Rayleigh dalgasının hızı $V_R = 0.919V_S$ olarak elde edilmiştir [28]. Şekil 2.7’de Poisson değerleri ile P, S ve Rayleigh dalgalarının hız ilişkileri gösterilmektedir.



Şekil 2.7. Poisson değerleri ile P, S ve Rayleigh dalgalarının hız ilişkisi [31].

Deprem sonucunda veya yapay bir kaynak ile yüzeyde oluşturulan elastik dalgalar içerisinde en fazla enerjiye sahip olan Rayleigh dalgalarıdır. Yüzey dalgalarının enerjisi %67, S dalgaları %26 ve P dalgaları %7 enerji oranına sahiptir. Enerji içeriklerinin yüksek olması nedeni ile deprem hasarlarında da etkin olan yüzey dalgaları, deprem mühendisliğinde önemli bir araştırma konusudur [31]. Şekil 2.8’de homojen, izotrop ve yarı sonsuz ortamda dalgaların yayılım özellikleri gösterilmektedir.



Şekil 2.8. Homojen, izotrop ve yarı sonsuz ortamda dalgaların yayılımı [31].

Yüzey dalgalarının dalga hızı, grup hızı ve soğurulma karakteristikleri, kabuk ve üst mantonun yapısının belirlenmesine olanak sağlamıştır. Yüzey dalgalarının kaynak özellikleri ve yayılma şekilleri, deprem mühendisliğinde sismik momentlerin, odak mekanizmaları ve odak derinliği çalışmalarında da kullanılmıştır [32].

2.1.3. Sismik hızların önemi ve elde edilme yöntemleri

Yakın yüzey zemin özelliklerinin belirlenmesi, depreme dayanıklı yapı tasarımının yapılabilmesi için gereklidir. Yer altı tabakalarının elastik ve dinamik özellikleri, jeofizik yöntemler ile dalga hızlarının belirlenmesi ve sonrasında yapılacak hesaplamalar ile elde edilebilir. Makaslama dalgası hız bilgisi, geoteknik çalışmalarda ve deprem mühendisliğinde geniş çapta kullanılmaktadır. S dalgası hız dağılımı bilgisinden yararlanarak sismik risk çalışmaları, zemin sınıflaması, sıvılaşma, büyütme analizi gibi farklı mühendislik uygulamaları gerçekleştirilmektedir.

Deprem hareketlerinin büyütülmesine neden olan en önemli faktör, yumuşak sedimanların genlikleri arttırmasıdır. Makaslama dalgası hız bilgisi zemin durumunu belirlemek için kullanılabilir [33].

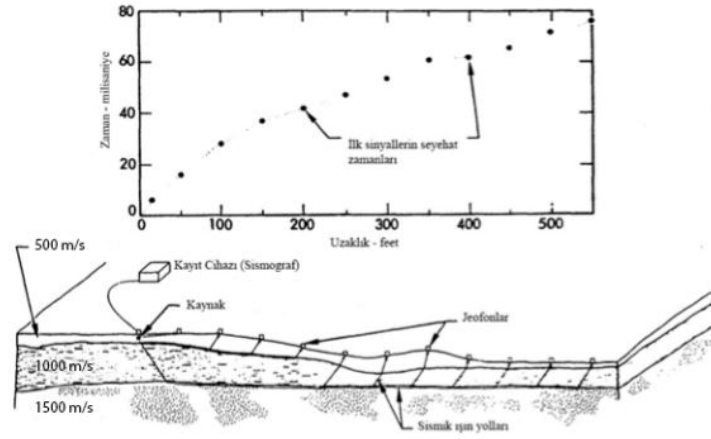
Makaslama dalgası hızı (V_s) zeminin dinamik özelliklerinin değerlendirilmesindeki en önemli parametredir. Yer yüzeyinden 30 metre derinlikteki ortalama makaslama dalgası hızı $V_{s,30}$ olarak bilinmektedir. $V_{s,30}$ hız bilgisi, NEHRP Provisions, 2001 Uniform Building Code ve Euro Code'da mühendislik dizaynı için bölgelerin sınıflara ayrılmasında kullanılmaktadır [34]. Bu sınıflamaya göre aynı sınıftaki zeminin deprem anında benzer tepkileri vermesi öngörülmektedir. 2000 International Building Code (IBC), 100 metre derinlikteki $V_{s,100}$ bilgisini kullanarak benzer bir sınıflama yapmaktadır [35]. P ve S dalga hızları aynı zamanda yer altındaki birimler ile ilgili de bilgiler vermektedir. Tablo 2.1'de toprak ve kaya örneklerinin P ve S dalga hızları ile yoğunluk değerleri verilmiştir.

Makaslama dalgası hızı (V_s) verilerinin elde edilmesinde, ölçümler çapraz kuyu (crosshole) ve kuyu altı (downhole) yöntemleri ile gerçekleştirilebilir. Bununla beraber gerekli olan delgi sayısı nedeniyle maliyet artmaktadır. Ayrıca bu yöntemler kentsel alanlarda problem oluşturmaktadır. Yüzeyden gerçekleştirilen sismik yöntemler, sismik hızların belirlenmesindeki en iyi alternatiflerdir. Sismik yansıma ve kırılma verileri ile P ve S hızlarının belirlenebilmektedir. Fakat sismik kırılma yöntemi hız terslenmeleri nedeniyle oluşan saklı tabakaların belirlenmesinde etkin değildir. Cisim dalgaları trafik ve çevresel gürültülere oldukça duyarlıdır. Ayrıca kırılma yöntemi ile derin araştırmalar için uzun dizilimlere ihtiyaç vardır. Bu durum kentsel alanlarda ölçümlerin gerçekleştirilebileceği alanların bulunmasını zorlaştırmaktadır. Sismik yansıma yöntemi için de benzer problemler geçerlidir. Veri işlem kısmı oldukça zaman alıcı ve araştırmanın maliyeti yüksektir [33]. Yüzey dalgaları geleneksel cisim dalgası çalışmalarında gürültü olarak kabul edilmesine rağmen, gösterdikleri dispersif özellik yakın yüzey elastik özelliklerle ilgili bilgi edinmek için kullanılabilir. Tüm sismik dalga türleri içerisinde yüzey dalgaları en yüksek enerjiye ve sinyal/gürültü oranına sahiptir. Bu durum yakın yüzey çalışmalarında yüzey dalgalarını etkili bir araç yapmaktadır. Tabakalı ortamda, yüzey dalgalarının yayılım hızı geometrik dispersiyon nedeniyle frekansa (veya dalga boyuna) bağlıdır. Makaslama dalgası hızları yüzey dalgası faz hızlarının ters çözümü ile belirlenebilir. Yakın yüzey çalışmaları için farklı test, veri işlem ve ters çözüm algoritmaları kullanan yüzey dalgası yöntemleri önerilmiştir. Genel olarak yüzey dalgalarının spektral analizi

(SASW) ile yüzey dalgalarının çok kanallı analizi (MASW) çalışmalarda tercih edilmektedir [34].

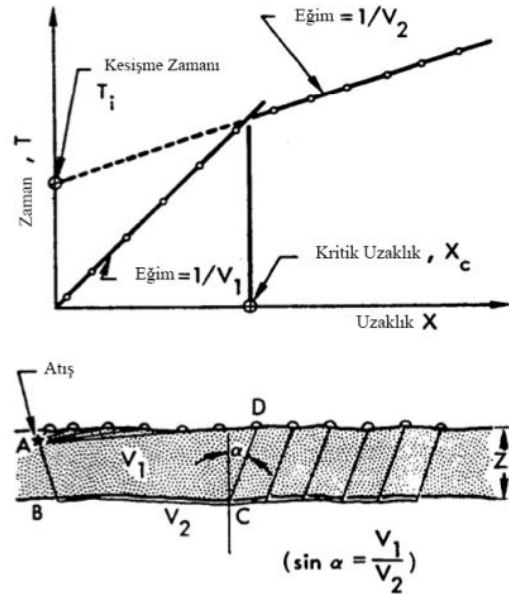
2.1.3.1. Sismik kırılma yöntemi

Sismik kırılma çalışmaları genel olarak üç farklı ölçekte yapılabilir. Bunlar: global ölçekte deprem dalgalarının kullanılması ile gerçekleştirilen, kabuk araştırmaları için patlatmalı sismoloji ve yakın yüzey çalışmaları için mühendislik uygulamaları olarak ayrılabilir. Kırılma yönteminin en önemli özelliği belirli bir derinlikteki kırıcının üzerinde, yatay değişikliklerin çözülebilmesidir. Türetilen en önemli jeofizik parametre sismik dalga hızlarıdır. Bu değerler sayesinde kayaç sıklığı, sökülebilirlik, potansiyel sıvı içeriği gibi farklı geoteknik faktörler belirlenebilir. Geleneksel kırılma sismiği yer belirleme çalışmalarında (baraj, önemli yapılar gibi) kullanılmasıyla beraber, hidrojeolojik çalışmalarda doymuş haldeki katman kalınlıklarının belirlenmesinde, yıpranmış fay zonlarının tespitinde kullanılmaktadır. Fay kırık ve çatlakların kırılma yöntemi ile belirlenmesi, katı atık bölgesi seçimleri çalışmalarında da kullanılmaktadır [27]. Kırılma yöntemi temel olarak impulsif bir kaynaktan oluşturulan P veya S tipi dalgaların, kaynaktan belli aralıklar ile doğrusal olarak dizilmiş alıcılar ile seyahat zamanının ölçülmesi esasına dayanır [25]. Enerji kaynağı genel olarak küçük patlatmalardır. Bu enerji belirlenir, büyütülür ve kayıt edilir. Patlama anı veya sıfır zamanı, sismik kayıtlara ilk varış sinyali ile kaydedilir. Dolayısı ile işlenmemiş veri, varış zamanı ve mesafelerden oluşmaktadır. Daha sonra bu bilgiler derinlik-hız değerlerine dönüştürülür [37]. P dalgaları genellikle ara yüz derinliği hakkında bilgi vermekle beraber, makaslama dalgaları yer altının mühendislik özellikleri hakkında bilgi vermektedir [38]. Kırılma çalışması Şekil 2.9'da gösterilmektedir. Ölçümler yer yüzeyinde gerçekleştirilir ve yeraltı yapısı enerji yayılımı teorilerine göre belirlenmektedir.



Şekil 2.9. Sismik kırılma çalışması şematik gösterimi [37].

Kullanılan jeofon türüne (düşey veya yatay) ve kaynağın iletilme şekline göre P veya S tipi elastik dalgalar oluşturularak sismik kırılma çalışmaları gerçekleştirilebilir. Daha sonra oluşturulan zaman-uzaklık grafiklerinin eğimlerinden yararlanarak dalga hızlarına ulaşılabilir. Kırıcı tabakanın derinlik bilgileri sismik kırılma çalışması ile elde edilebilir. En basit durum olarak Şekil 2.10'daki iki tabakalı yeraltı modeli örnek verilebilir.



Şekil 2.10. Basit iki tabakalı yeraltı modeli [37].

2.1.3.2. Sismik yansıma

Sismik yansıma çalışmaları karadan veya denizden gerçekleştirilerek dalga yayılım hızı ve tabaka kalınlıklarının elde edilmesine olanak sağlar. Sismik yansıma geniş ölçekteki çalışmalarda, derin stratigrafiyi ortaya çıkarmak için kullanılmaktadır. Yakın yüzey tabaka özelliklerinin belirlenmesinde fazla tercih edilmez.

2.1.3.3. Kuyu içi ölçümleri

Sismik hızların elde edilmesi için gerçekleştirilen kuyu ölçümleri, Kuyu İçi (Downhole), Kuyu Üstü (Uphole), Çapraz Kuyu (Crosshole) ve Süspansiyon P-S Logu çalışmaları olarak gerçekleştirilmektedir.

2.1.3.4. Yüzey dalgası analizi yöntemleri

Yüzey dalgası yöntemleri sismik yer karakterizasyonu çalışmalarında uzun yıllardır kullanılmaktadır. Veri toplama ve analiz programlarının giderek gelişmesi ile, yüzey dalgası testleri kullanılması kolay sistemler olarak yaygınlaşmıştır. Yüzey dalgası yöntemleri, yeraltı sıklığındaki değişimleri belirlemek için Rayleigh dalgalarının dispersif özelliklerinden yararlanır. Yüzey dalgası yöntemleri aktif ve pasif kaynaklı olmak üzere ikiye ayrılabilir. Aktif kaynaklı yöntemler doğrusal dizilimli alıcılar kullanarak, bilinen bir kaynaktan (dizilimle aynı doğrultuda) ortaya çıkan ve alıcılara geri gelen dalgaların hızını hesaplar. Pasif yöntemler ise iki boyutlu alıcı dizilimi kullanarak, bilinmeyen kaynak veya kaynaklardan ortaya çıkan mikrotremorların (pasif çevresel gürültü) dalga hızını hesaplar. Bilinmeyen kaynaktan ortaya çıkan dalgaların yayılma yönü bilinemediğinden, pasif kaynaklı yöntemlerde doğrusal dizilim yerine iki boyutlu dizilimler tercih edilir. Dispersif materyal içerisinde dalga yayılım doğrultusu ve yayılımın gerçek hızı karşılıklı olarak birbirine bağlıdır. Biri diğerinden bağımsız olarak hesaplanamaz. Bununla beraber, alıcı dizilimlerini basitleştirmek ve hızlı veri toplamak için pasif yöntemlerde doğrusal alıcı diziliminin kullanıldığı yöntemlerde geliştirilmektedir [39, 40]. Aktif kaynaklı yöntemler, kısa dalga boyları yani yüksek frekanslarda pasif yöntemlere göre daha etkindir. Bunun

nedeni kaynak ve alıcı dizilimlerinin yakın yüzey tabakaların çözülmesi için gerekli olan frekans aralığına göre düzenlenebilmesidir. Diğer taraftan pasif yöntemler genel olarak uzun dalga boylarını ayırabilir. Çünkü mikrotremorlar önemli ölçüde düşük frekanslı enerji içerir. Bazı araştırmacılar [41] her iki tekniğin başarılı yönlerini kullanabilmek ve daha geniş aralıkta frekans ayırımı yapabilmek için aktif ve pasif yöntemleri birlikte kullanmışlardır. Fakat dispersiyon eğrisini aktif ve pasif kaynaklı yöntemler kullanılarak birleştirmek her durumda kolay olmamaktadır [42].

2.2. Zeminlerin Fiziksel ve Mekanik Özellikleri

2.2.1. Standart penetrasyon deneyi

Standart penetrasyon deneyinde şekil 2.2’de gösterilen dış çapı 5 cm, iç çapı ise 3,5 cm olan standart bir "örselenmiş" numune alıcı; sondaj kulesinden ağırlığı 63.5 kg olan, bir kütlenin 76 cm yüksekten sistem üzerine serbest düşürülmesi ile zemine çakılır. 63.5 kg ağırlık test yapılan derinlikte, SPT ucu zemine toplam 45 cm derinliğe girene kadar 76 cm’den serbest düşürülmeye devam edilir ve düşüş sayıları not edilir. İstenilen derinlikte deney yapabilmek için sondaj durdurulur, SPT ucu bu derinliğe indirilir ve deneye başlanır. İlk 15 cm penetrasyon için gereken düşüş sayısı yok sayılır. Son 30 cm penetrasyon için gereken düşüş sayısı rapor edilir. İlk 15 cm’lik penetrasyonun ihmal edilmesinin sebebi, bu kısımdaki zeminin sondajdan dolayı örselendiği ve zeminin davranışını temsil edemeyeceği düşüncesidir. Eğer 30 cm penetrasyon, 50 kez ağırlık düşürülerek elde edilemez ise SPT sonucu penetrasyon miktarı/50 şeklinde (örneğin 10cm/50) rapor edilir. Deneyin adı, standart penetrasyon deneyi olmasına rağmen gerçekte sadece SPT, örselenmiş numune alıcısı standarttır. Ağırlık düşürme sistemi ise çeşitlilik göstermektedir. İki adet ağırlık düşürme sistemi bulunmaktadır. Bunlar emniyet çekici (şekil 2.14) ve donut (halka) çekicidir (şekil 2.13) [43]. Ayrıca ağırlık düşürme sistemi bir halat ve makara vasıtasıyla sondör tarafından, halat çekilip (76 cm) bırakılarak yapılabileceği gibi, otomatik bir makine tarafından da gerçekleştirilebilir. Bu durum çok önemlidir. Çünkü kullanılan sistem serbest düşen ağırlığın enerjisinin ne kadarının SPT ucuna iletileceğini belirler. Örneğin ülkemizde çok kullanılmakta olan halat-makara, donut gibi ağırlıktan oluşan

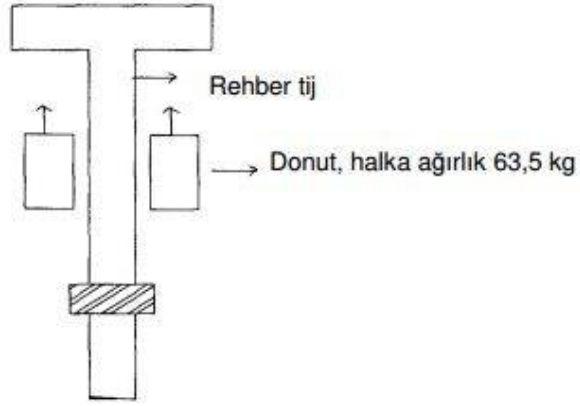
elle yapılan sistemde, enerjinin yaklaşık %45'i SPT ucuna iletilmektedir. Bununla birlikte Amerika ve Avrupa ülkelerinde kullanılan sistemde (emniyet çekiçli otomatik sistem) düşen ağırlığın enerjisinin %60 ile %70'i SPT ucuna iletilmektedir. SPT deneyini uygulayan kişi, kendi sisteminin enerji oranını bilmek ve bunu proje mühendisine bildirmek zorundadır. Eğer enerji oranına ilişkin detaylı bilgi yoksa, ülkemizde sık kullanılan halatlı makaralı sistemde %45 enerji oranı kabul edilebilir. Ancak şunu da belirtmek gerekir ki, yurdumuzda SPT ucunun bozulmuş, özelliğini kaybetmiş olması ve ağırlığın 76 cm yükseklikten düşürülmemesi gibi, operatör hatalarından kaynaklanan yanlış uygulamalara oldukça sık rastlanmaktadır. Bu duruma çok dikkat edilmesi gerekir. Çünkü zeminden örselenmemiş numune alınamadığında (özellikle kohezyonsuz zeminlerde), eldeki tek veri hemen hemen sadece SPT değeri olmaktadır. SPT, örselenmemiş numune alınamayan kohezyonsuz zeminler için geliştirilmiş olmakla birlikte kohezyonlu zeminlerde de başarılı sonuçlar vermektedir.

Zemine iletilen enerji oranının önemli olduğu yukarıda belirtilmiş ve SPT değeri kullanılarak hesap yapılırken (taşıma gücü, oturma, sıvılaşma potansiyeli vb.) hesap metodunda belirtilen enerji oranına SPT sayısının çevrilmesi gerekir. Örneğin kullanılacak metotta N_{70} yani %70 enerji oranlı SPT sayısı kullanımı belirtilmiş ise, enerji oranının ters orantı kullanılarak bu sisteme çevrilmesi gerekir. Eğer çevrilmez ise ve elde edilen değer %45 enerjiye göre düzenlenmiş ise, daha az enerji oranında, daha yüksek darbe sayıları elde edileceğinden, hesaplamalar sonucunda zemin olduğundan daha sağlamış gibi yorumlanabilir.

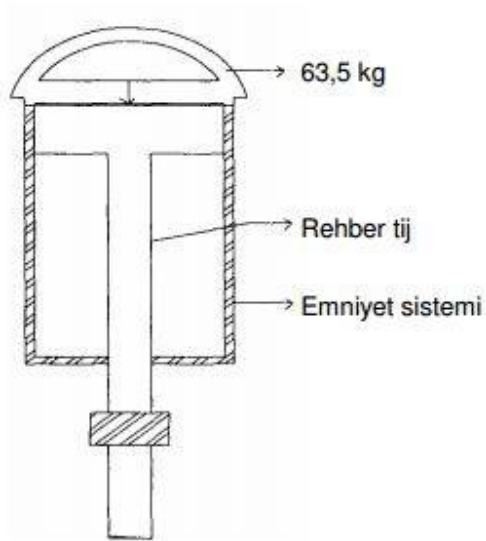
SPT arazide 1,5 - 2 m gibi sabit aralıklarla, sondaj boyunca tekrarlanır. Örselenmiş numune alıcısından çıkartılan numuneler laboratuvara sınıflandırma deneyleri yapılması için gönderilir.



Şekil 2.11. SPT, örselenmiş numune alıcı [43].



Şekil 2.12. Donut ağırlık sistemi [43].



Şekil 2.13. Emniyetli ağırlık düşürme [43].

SPT deneyi sonucunun, sadece enerji oranı için değil aşağıda sıralanan faktörler için de düzeltilmesi gerekir. Aynı zemin, daha derin bir seviyede SPT yapılırken çevresel basıncın daha yüksek olması sebebiyle daha yüksek direnç gösterir ve dolayısıyla SPT - N sayısı daha yüksek elde edilir. Bunun getireceği yanlış değerlendirmeleri önlemek için, SPT sayılarının seçilen referans bir derinliğe göre (efektif gerilmenin 1 atm olduğu derinlik) düzeltilmesi gerekir. Bu düzeltmeyi yapabilmek için gereken düzeltme katsayısı C_N aşağıdaki bağıntıyla belirlenir. Zeminin ince kum-silt karışımından oluşması ve suya doymun olması halinde;

$$C_N = \sqrt{\frac{P_a}{\sigma_v}} \quad (2.8)$$

Bu eşitlikte;

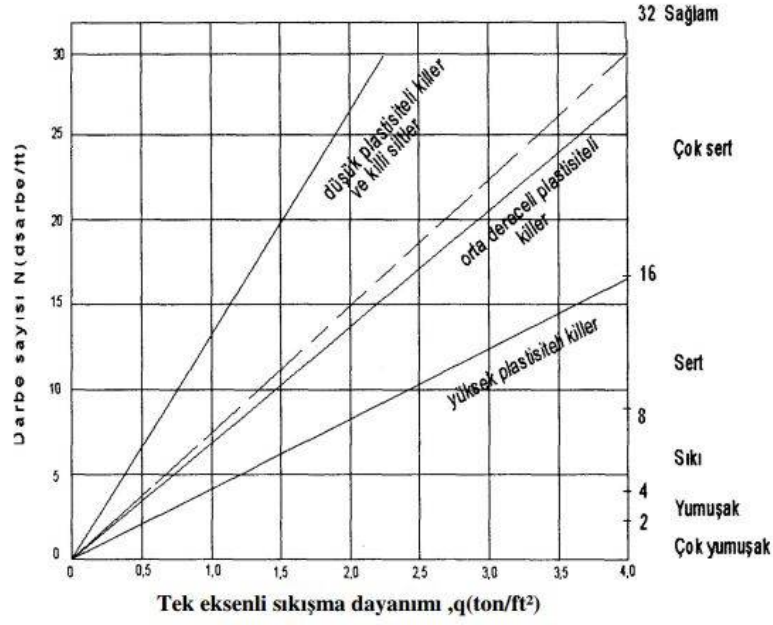
P_a = Referans derinlikteki gerilme ($1 \text{ atm} \cong 95,76 \text{ kPa}$),

σ_v' = Test derinliğindeki efektif gerilmedir.

Test anında darbeden dolayı, zeminde aşırı boşluk suyu basıncı gelişimi oluşabilir. Bu durumun getireceği yanılmayı düzeltmek için eğer SPT sayısı 15'den büyük olarak elde edilmiş ise ($N > 15$ ise düzeltme yapılmaz)

$$N_{düz} = 15 + \frac{1}{2}(n + 15) \quad (2.9)$$

bağıntısıyla düzeltilir. Bu düzeltme tij çapları değişikçe sistem sürtünmesinin değişebileceği vb. sebeplerden dolayı yapılır. Sondaj çapı düzeltme katsayısı (C_B) aşağıdaki değerlerden seçilir. Eğer sondaj çapı 60-120 mm arasında ise düzeltme uygulanmaz; eğer çap 150 mm ise N sayısı 1,05 ile; çap 200 mm ise N, 1,15 ile çarpılır. Şekil 2.15 kohezyonlu zeminlerde SPT sayısı ile tek eksenli basınç dayanımı arasındaki ilişkiyi göstermektedir [44].



Şekil 2.14. Kohezyonlu zeminlerde, SPT sayısından tek eksenli dayanımın belirlenmesi [44].

Daha önce de belirtildiği gibi standart penetrasyon deneyi, orjinal olarak örselenmemiş numune alınamayan, kohezyonsuz zeminler için geliştirilmiştir, bu sebeple kohezyonlu zeminler için "N" değerini kullanan ampirik bağıntılar, kohezyonsuz zeminlerde olduğu kadar yaygın bir şekilde geliştirilmemiştir. Şekil 2.15’de verilen abak kullanılırken unutulmaması gereken, abağın verilen bir "N" değeri için tek eksenli sıkışma dayanımını oldukça geniş bir aralıkta tahmin etmesidir. Örneğin "N" değeri 15 olan, orta dereceli plastisitede bir kilin tek eksenli sıkışma dayanımı yaklaşık 2.2 ton/ft² ile 3.5 ton/ft² arasında tahmin edilir.

2.2.2. Elek analizi

Tabii zeminleri oluşturan katı taneler çok değişik boyutlarda olabildiği gibi, aynı zemin içinde birbirinden çok farklı boyutlarda taneler bir karışım halinde bulunabilmektedir. Zeminleri bu açıdan bir sınıflandırmaya tabi tutabilmek için, boyutları belirli büyüklükler arasında kalan taneleri tanımlayan bazı terimler kullanılmaktadır. Zemin taneleri, büyüktен küçüğe doğru, çakıl, kum, silt ve kil olmak üzere dört ana gruba ayrılmaktadır. Bu grupları birbirinden ayıran boyut aralıkları

değişik sınıflandırma sistemlerinde bazı küçük farklılıklar göstermekle beraber, yaygın olarak kabul gören sınır değerleri Tablo 2.1’de gösterilmiştir.

Tablo 2.1. Zemin tanelerinin boyutlarına göre sınıflandırılması [21].

Zemin Cinsi	Tane Boyutu
Çakıl	2,00 (veya 4,75) – 75,0
Kum	0,075 – 2,00 (veya 4,75)
Silt	0,002 (veya 0,005) – 0,0075
Kil	<0,002 (veya 0,005)

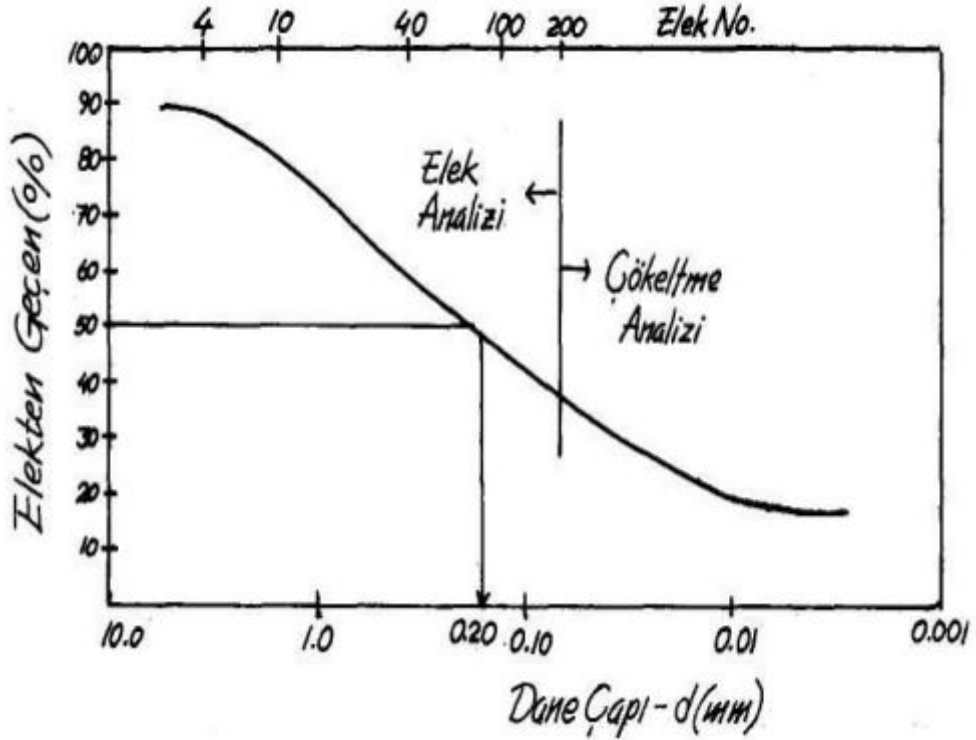
Yukarıdaki ilk iki grubu oluşturan zeminler (çakıllar ve kumlar) iri taneli zeminler, siltler ve killer ise ince taneli zeminler olarak nitelendirilmektedir. İri taneli zeminler, tane boyutuna göre, kaba, orta ve ince kum (veya çakıl) olarak alt gruplara ayrılmaktadır. Tabii zeminler değişik boyutlarda tanelerin karışımından meydana geldiği için, bunların içindeki tane boyutlarının istatistiksel dağılımını ve zeminin esas olarak hangi gruba girdiğini deneysel olarak saptamak gerekmektedir. Gerçekte, taneler küresel olmadıkları için, tek bir tane çapının onların üç boyutlu büyüklüklerini tanımlamakta yeterli olmadığı açıktır. Fakat kullanılan deneysel yöntemlerin gereği, iri taneli zeminlerde tane çapı tanenin en büyük boyutuna, ince taneli zeminlerde ise eşdeğer kürenin çapına eşit olarak kabul edilmektedir.

İri taneli zeminlerdeki tane çapı dağılımını bulmak için, zemin değişik büyüklükte açıklıkları olan bir seri standart elekten geçirilmekte ve değişik boyutlar arasında kalan tanelerin ağırlık yüzdesi (toplam kuru ağırlığa oranı) saptanmaktadır. Yaygın olarak kullanılan standart elekler Tablo 2.3’te gösterilmiştir. Zemin sırasıyla en büyük açıklıklı elekten en küçük açıklıklı eleğe doğru bir seri elekten geçirildiği zaman, birbirini takip eden bir elekten geçip öbürünün üzerinde kalan tanelerin içinde kaldığı çap sınırları belirlenmiş olmaktadır, örneğin, No. 10 elekten geçip 40 No’lu eleğin üzerinde kalan taneler çapları 2.00 mm ile 0. 425 mm arasında kalan taneler olmaktadır. Deney sonuçları kümülatif dağılım eğrileri olarak gösterilmektedir. Şekil 2.16’da yatay eksenle tane çapı (log) dikey eksenle ise değişik eleklerden geçen (belirli çaptan küçük) tanelerin kuru ağırlığının toplam kuru ağırlığa oranı (yüzde

olarak) gösterilmiştir. Tane çapları çok geniş bir aralık içinde değiştiği için yarı-logaritmik çizimler kullanılmaktadır. Şekil 2.16'daki bu eğriler zeminlerin tane çapı dağılımı (granülometri) eğrileri olarak adlandırılmaktadır.

Tablo 2.2. Zeminlerin tane çapı dağılımını belirlemek için kullanılan elek aralıkları [21].

Elek No	Elek Açıklığı
4	4,75
10	2,00
20	0,85
40	0,425
60	0,25
100	0,15
200	0,075



Şekil 2.15. Tipik bir tane çapı dağılımı (granülometre) eğrisi [45].

Bu eğri üzerinde herhangi bir noktanın koordinatları bize, ağırlık oranı olarak, zemin içindeki tanelerin ne kadarının belirli bir çaptan daha küçük olduğunu göstermektedir.

Örneğin, granülometri eğrisi Şekil 2.15’de gösterilen zeminde tanelerin % 50’si (ağırlık oranı olarak) 0.20 mm’den daha küçük olmaktadır. Elek analizi yaparken dikkat edilmesi gereken en önemli noktalar, deney uygulanan numunenin arazideki tabakayı temsil etmesinin ve tanelerin birbirinden ayrılmasının sağlanması olmaktadır. Özellikle içinde ince taneler bulunan zeminlerde (siltli ve killi zeminler) taneler birbirine yapışmaktadır. Bu tür zeminler eleklerden geçirilmeden önce, tanelerin mekanik olarak veya yıkamak sureti ile (su altında eleklerden geçirmekten ibaret olan bu yöntemle ıslak analiz adı verilmektedir) birbirinden ayrılması sağlanmadığı takdirde çok yanıltıcı sonuçlar elde edebilmektedir.

Zemin mekaniğinde kullanılan en ince elek (açıklıkları en küçük elek) 200 No’lu elek olmaktadır. Bu elekten geçen taneler silt ve kil sınıfına girmekte, bu eleğin üstünde kalanlar ise kumları ve çakılları oluşturmaktadır (Tablo 2.1 ve Tablo 2.2). Dolayısıyla 200 No’lu elek ince ve iri taneli zeminleri birbirinden ayırmaktadır. Aynı şekilde, 4 No’lu (veya 10 No’lu) elek’te zeminlerin kum ve çakıl kısımlarını birbirinden ayırmakta kullanılmaktadır. 200 No’lu elekten geçen ince taneli zeminlerin çapı dağılımının saptanması için ise başka bir deney yöntemi kullanmak gerekmektedir.

2.2.3. Kıvam limitleri deneyi

İnce taneli zeminlerin mühendislik davranışının büyük oranda içerdikleri su içeriğine bağlı olarak değişiklik gösterdiği bilinmektedir. Killi bir zeminin kıvamı, yalnızca içindeki su miktarı artırılarak, çok katı bir kıvamdan viskoz bir sıvı kıvamına kadar çok geniş bir aralık içinde değişebilmektedir. Buna bağlı olarak da, mukavemet, yük altında şekil değiştirme ve sıkışma gibi mühendislik özelliklerinde büyük farklılıklar meydana gelebilmektedir. İnce taneli zeminlerin mühendislik özelliklerinde su içeriğine bağlı olarak meydana gelen değişiklikler, esas olarak taneleri oluşturan minerallerin kristal yapısına, zeminin arazideki çökelme koşullarına ve boşluklardaki zemin suyunun kimyasal özelliklerine bağlı olmaktadır. Bu açıdan, tabii zeminlerin kıvamında ve mühendislik özelliklerinde su içeriğine bağlı olarak gözlenen değişimler büyük farklılıklar gösterebilmektedir.

Killi zeminlerin, belirli su içerik aralıklarında, plastik davranış (uygulanan yükler altında kalıcı şekil değiştirmeler) gösterdiği çok eskiden beri bilinmektedir. Killi zeminlere yeterince su eklenince, istenilen şekil verilebilmekte ve kurumaya bırakılınca bu verilen şekli koruyabilmektedirler. Bu özelliklerinden dolayı çok eski zamanlardan beri insanlar killi zeminlerden kaplar, çanaklar ve heykelcikler yapmak için yararlanmışlardır.

Killerin kıvamının su içeriğine bağlı olarak katı-plastik-viskoz sıvı kıvamları arasında değişmesinin nedenlerini anlayabilmek için, taneleri oluşturan minerallerin kristal yapısını ve taneler ile boşluklardaki suyun ve içindeki kimyasal maddelerin çökeltme sırasında ve daha sonraki arazi koşullarında karşılıklı etkileşimini incelemek gerekmektedir. Bu üçlü etkileşim oldukça karmaşık bir problem oluşturmakla beraber, yapılan birçok araştırmalar sonucu konunun oldukça açıklığa kavuştuğu söylenebilir.

Killi zeminlerin tanelerini oluşturan minerallerin ince plakalardan oluşan bir kristal yapısına sahip oldukları anlaşılmıştır. Bu nedenle kil taneleri plakalar şeklindedir. Bu plakaların genişlik, uzunluk ve kalınlık oranları mineral yapılarına bağlı olarak farklılıklar göstermektedir. Plaka şeklindeki kil tanelerinin yüzeylerinde negatif elektrik şarjları, kenarlarında ise negatif veya pozitif elektrik şarjları bulunmaktadır. Su molekülleri ise, bir ucu negatif bir ucu pozitif elektrik yüklü çift polariteli bir karaktere sahiptir. Ayrıca, zemin suyu içinde bulunabilecek kimyasal maddeler negatif (katyonlar) veya pozitif (anyonlar) elektrik yüklü olabilmektedir. Kil tanelerinin yüzeyinde ve su molekülleri ile kimyasal maddelerde birbirinden farklı elektrik yüklerinin mevcut olması sonucu aralarında elektriksel çekim ve itki kuvvetleri ortaya çıkmaktadır. Bu kuvvetlerin şiddeti büyük oranda tanelerin mineral yapısına bağlı olmaktadır.

Elektriksel çekim kuvvetleri sonucu su molekülleri kil tanelerinin yüzeyine yapışmakta ve taneler yüzeylerinin adsorbe su olarak nitelendirilen bir su tabakası ile kaplanmasına yol açmaktadır. Adsorbe su, yüksek viskoziteye ve yoğunluğa sahip olmakla beraber tane yüzeyinden uzaklaştıkça elektriksel kuvvetlerin şiddeti uzaklığın karesi ile ters orantılı olarak azaldığı için, özellikleri değişmekte ve belli bir uzaklıktan

sonra boşluklardaki serbest suya dönüşmektedir. Zeminin düşük su muhtevalarına sahip olduğu durumlarda taneler arasında adsorbe su tabakaları ile temas meydana gelmekte ve bu su tabakasının sahip olduğu yüksek viskoziteden dolayı tanelerin birbirine göre hareketi zorlaşmaktadır (Zemin katı bir kıvamdadır). Zeminin su içeriği arttıkça, taneler birbirinden uzaklaştığı için adsorbe su tabakaları arasında temas kaybolmakta, taneler birbirine göre daha kolay hareket edebilmekte ve zemine istenilen şeklin verilmesi kolaylaşmaktadır (dolayısıyla zemin plastik bir kıvama gelmiş olmaktadır). Su içeriğinin çok yüksek değerlerinde ise çok küçük olan kil taneleri su içinde bir süspansiyon haline gelmektedir.

Yukarıda killi zeminlerin kıvamlarında su içeriğine bağlı olarak meydana gelen değişimler basitleştirilmiş şekilde açıklanmıştır. Tabii zeminlerde tanelerin mineral yapısının ve zemin suyunun kimyasal özelliklerinin farklılıklar gösterdiği bilinmektedir. Killerin kıvamında su içeriğine bağlı olarak meydana gelen değişimleri deneysel olarak saptayabilmek için bazı sınır su içeriği değerleri tanımlamıştır. Başlıca üç kıvam limiti tanımı kullanılmaktadır:

- a. Likit limit (w_L) : Zeminin viskoz bir sıvıdan plastik bir kıvama dönüştürdüğü su içeriğidir. Başka bir deyişle, zeminin kendi ağırlığı altında akabildiği en düşük su içeriğidir. 25 vuruşa karşılık gelen su içeriğidir.
- b. Plastik limit (w_p): Zeminin plastik bir malzemeden yarı plastik bir malzemeye dönüştüğü su içeriğidir. Diğer bir deyişle, zeminin el altında cam bir yüzey üzerinde, çubuk haline getirilirken çubukların çapları yaklaşık 3 mm olduğunda, kopmaların meydana geldiği durumdaki su içeriğidir.
- c. Büzülme limiti (w_s): Zeminin yarı plastik bir malzemeden katı bir malzemeye dönüştüğü su içeriğidir. Diğer bir tanımla, zeminin suya tam doymuş olabildiği en düşük su içeriğidir.

Su içeriğine bağlı olarak zeminin hacminde meydana gelen değişimlerin kıvam limitleri ile ilişkisi ile Şekil 2.16'da gösterilmiştir. Likit limit değerine kadar su içeriği değişimleri ile hacim değişimi arasında doğrusal bir ilişki varken likit limit ile plastik limit arasında bu ilişki doğrusal olmaktan uzaklaşmakta, büzülme limiti değerinden

sonra ise zeminin hacmi sabit kalmaktadır (daha fazla kuruma zemin hacminde azalmaya yol açmamaktadır).



Şekil 2.16. Zeminlerde su içeriği - hacim değişimi davranışı ve kıvam limitleri [45].

Likit limit ile plastik limit arasında kalan su içeriklerinde zemin plastik davranış gösterdiği için, bu iki limitin farkı plastisite indisi (I_p) olarak tanımlanmaktadır.

$$I_p = (w_L - w_P) \quad (2.10)$$

Bu bağıntıda;

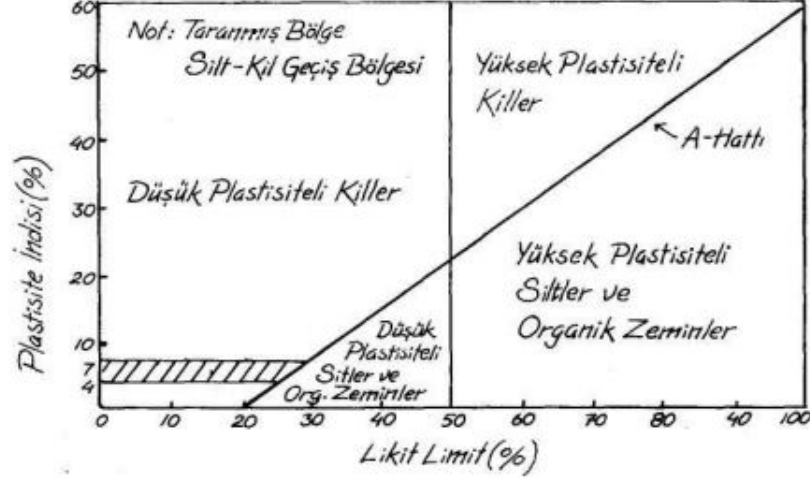
I_p : plastisite indisi,

w_L : likit limit,

w_P : plastik limit'i göstermektedir.

Plastisite indisi, zeminin plastik davranış gösterdiği su içerikleri aralığının genişliğini göstermektedir. Likit limit ve plastisite indisinin birlikte değerlendirilmesi zeminin plastisitesinin bir ölçüsü olarak kullanılmaktadır. Şekil 2.17'de gösterilen Casagrande plastisite kartında, $w_L = \% 50$ 'den geçen düşey doğru ile A-hattı olarak bilinen eğik doğrunun (bu doğrunun denklemi $I_p = 0.73 (w_L - 20)$ olmaktadır), ayırdığı dört bölge tanımlanmaktadır. Yüksek plastisiteli zeminlerin $w_L = \% 50$ doğrusunun sağında, düşük plastisiteli zeminlerin ise bu doğrunun solunda yer aldığı kabul edilirken, A hattının üstündeki zeminler killeri, altındaki zeminler ise siltleri oluşturmaktadır. Casagrande

plastisite kartı olarak bilinen bu şekildeki taranmış alana düşen zeminlerin ise düşük plastisiteli siltler ile killere arasında geçiş bölgesi oluşturduğu kabul edilmektedir.



Şekil 2.17. Casagrande plastisite kartı [45].

2.2.3.1. Kıvam limitlerinin mühendislikte kullanımı

Kıvam (Atterberg) limitleri esas olarak ince taneli zeminlerin değişik su içeriklerindeki mukavemetlerinin bir göstergesi olmaktadır. Zeminin tabii su içeriğinin kıvam limitleri ile karşılaştırılması bize o zeminin mukavemeti hakkında bir fikir vermektedir. Bu karşılaştırmayı yaparken bazı boyutsuz katsayılar kullanmak yararlı olmaktadır. Bunlar arasında yaygın olarak kullanılan iki tanesi:

Likitlik indisi;

$$I_L = \frac{W - W_P}{W_L - W_P} = \frac{W - W_P}{I_P} \quad (2.11)$$

Relatif konsistans,

$$I_C = \frac{W_L - W}{W_L - W_P} = \frac{W_L - W}{I_P} \quad (2.12)$$

olmaktadır. Bu katsayıların değerleri ile zeminin kıvamı arasındaki ilişki Tablo 2.3'te gösterilmiştir.

Tablo 2.3. İnce taneli zeminlerin kıvamı [45].

Zemin Kıvamı	I_L	I_c
Viskoz sıvı	$I_L > 1$	$I_c < 0$
Plastik	$0 < I_L < 1$	$0 < I_c < 1$
Katı	$I_L < 0$	$I_c > 1$

Ayrıca, kıvam limitleri zeminin plastisitesine göre sınıflandırılmasını sağlamakta, ince taneli zeminlerin yükleme tarihçesi, su geçirgenlik özellikleri, değişik amaçlar için inşaat malzemesi olarak seçilmesi, yükler altında sıkışması, şişme potansiyeli ile arazi sıkıştırma ve çalışma koşulları yönünden çok yararlı ön bilgiler vermektedir. Genel olarak, zeminin plastisitesi arttıkça sıkışma ve şişme potansiyeli artmakta, su geçirgenliği azalmakta, arazi kazı ve dolgu işlemleri sırasında ise zorluklarla karşılaşmaktadır. İnce taneli zeminlerin plastisite indisinin kil yüzdesine (0.002 mm'den küçük taneler miktarı) oranı ise zeminin aktivite katsayısı olarak tanımlanmaktadır.

$$A = \frac{I_p}{\text{Kil Yüzdesi}} \quad (2.13)$$

A, ağırlıkça kil yüzdesi olarak tanımlanmaktadır.

2.2.4. Zeminlerin kayma mukavemeti

Zeminlerde göçme meydana gelmesi için, olası bir kayma düzlemi boyunca kayma direncinin aşılması gerekmektedir. Bu düzlem her zaman en büyük kayma gerilmesi düzlemi olmayabilmektedir. Genel olarak göçme belli bir kayma düzlemi üzerine etkiyen normal ve kayma gerilmelerinin ortaklaşa etkisi sonucu ortaya çıkmaktadır. Zeminin kayma mukavemeti ise, göçmeye meydan vermeden karşı koyabileceği en büyük kayma gerilmesi olarak tanımlanabilir [45].

Temel görevi yapacak zeminin seçilen kırılma kriterine göre kayma mukavemeti tarifi yapılabilmesi için kayma mukavemeti açısı ϕ , kohezyonu c , bunu sağlayacak gerilmelerle boy kısalması bağıntısı ve makaslama sırasında oluşan boşluk suyu

basınçlarının bilinmesi; zeminin türü, oluşan gerilmeler, jeolojik geçmişinde geçirdiği evreler ve ortam sıcaklığına bağlıdır. c ve ϕ ' ye zeminin kayma direnci parametreleri denir [46].

Diğer inşaat gereçlerinde söz konusu olmayan boşluk suyu basınçları zeminlerin kayma direncinde önemli bir etken olarak bilinir. Bir başka deyişle zeminin toplam ve efektif gerilme türünden ifade edilen kayma direnci önemli farklar gösterebilmektedir. Problemlerin çözümünde analizin hangi yaklaşımla yapılacağına zemin türü, yükleme hızı ve drenaj koşullarına göre karar verilir. Zeminin kayma direncinin aşılması için etkiyen yükler farklı özellik taşırlar. Statik ve tekdüze yüklemede gerilme sıfır ya da belirli bir düzeyden başlayarak değişmez veya değişen hızla yükselir. Oysa birçok yük tekrarlı ve geri dönüşlüdür (trafik, makine yükleri gibi). Öte yandan, deprem olduğu gibi genliği ve frekansı değişen geçici yükleme zemin ortamında çok farklı etkiler yapmaktadır. Zeminler günümüzde sadece statik yük değil, endüstri, trafik ve özel yapıların uyguladığı tekrarlı ve titreşimli yüklerin de etkisi altındadır. Bu yüklerin yukarıda değinildiği gibi genlik ve sıklıkları çok farklı olabilmektedir. Bunun yanında deprem yükleri de farklı etkiler getirdiğinden son yıllarda zemin dinamiği geoteknik mühendisliğinde ayrı bir bilim dalı olarak gelişmiştir. Bazı zeminler yüklerin tekrarlı uygulanışı sırasında dayanımlarının önemli bir bölümünü korudukları gibi, bazı zeminlerde 105 ve daha fazla çevrim sonunda direncin arttığı da izlenir. Plastik killer bu gruba girer [47].

Gevşek kumlar gibi ortamlarda ise gerilmelerin tekrarlı uygulanması aşırı hacim kaybı getirmektedir. Bunun nedeni, gerilme yön değiştirdiğinde yükün kalkışından yeniden uygulanmasına kadar oluşmuş önceki birim kısalmaların sıfıra dönmeden ortamın yeni gerilmeler almasıdır. Boşluk hacminde beliren bu azalmanın doğal sonucu boşluk suyu basıncında belirecek sürekli artıştır. Böylece zemin drenaj olanağı bulamadan artan gerilmelere maruz kalmaktadır. Sonuçta, boşluk suyu basıncı çevre basıncı düzeyine yükseldiğinden zeminin direnci sıfıra düşecektir. Bu olaya günümüzde "sıvılaşma" denmekte ve özellikle kum ve siltlerde önemli sorunlar getirmektedir. Bu durumda kayma direncinin aşılması sıvılaşmanın belirmesi veya aşırı deformasyonların oluşması biçiminde ortaya çıkar [47].

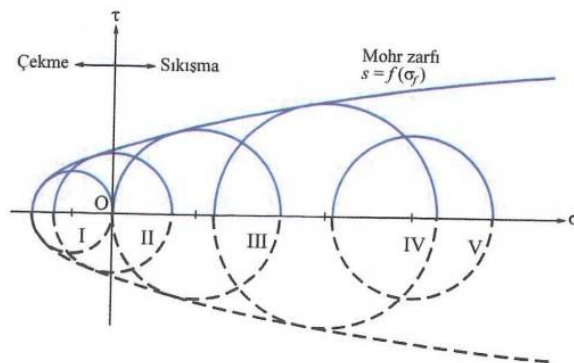
2.2.4.1. Mohr kırılma teorisi

Zemin kütlelerinin yenilmesi özellikle de kohezyonsuz zeminlerin yenilmesi en iyi Mohr kırılma teorisi ile açıklandığı biçimde kabul görmektedir. Mohr teorisine göre kayma düzleminde kayma gerilmesi, zeminin özelliklerine ve normal gerilmenin aynı düzlemdeki etkisine bağlı olarak maksimum sınır değerine ulaşır. Zeminin bu maksimum gerilmeyi karşılayabileceği değer kayma direnci olarak tanımlanır [48].

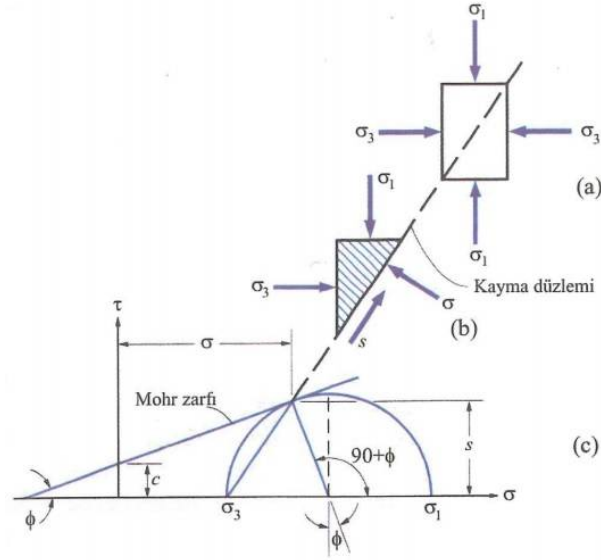
$$s = \tau_f = f(\sigma_f) \quad (2.14)$$

Normal gerilmeyi değiştirmek suretiyle farklı kayma direnci değerleri elde edilebilir. Ancak burada göz önüne alınması gereken konu, bir düzlem boyunca kayma direnci o düzlemde alacağı maksimum değerdir. Buna karşılık bir noktadaki kayma direnci o noktadan geçen sonsuz sayıdaki düzlemlerden en zayıfının direncidir [48].

Eşitlik 2.14 zeminin yenilme koşulundaki kayma direncini yansıtır. Kayma direncini gösteren bu doğru Mohr zarfı olarak tanımlanır. Mohr teorisine göre gerilmeler bu zarf içinde kaldığı zaman zemin duraylıdır. Şekil 2.18 de beş Mohr dairesi de duraylı konum içinde yer almaktadır. Dairelere teğet noktaları eğim açısı için normal ve kayma gerilmelerine işaret eder. Zarfın teğet olduğu ilk dört daire yenilmeye eğilimin olduğu durumu, diğer deyişle zeminin plastik dengeye geldiğini göstermektedir. Beşinci daire ise Mohr zarfı içinde kalmaktadır. Bu durumda kayma gerilmesi kayma direncinin altındadır ve kırılma için yeterli gerilme olmadığı anlamına gelir [48].



Şekil 2.18. Çeşitli gerilme durumları için Mohr daireleri I) çekme II) kayma III) tek eksenli sıkışma IV-V) iki eksenli sıkışma [48]



Şekil 2.19. Mohr kırılma teorisi a) zemin elemanında gerilmeler b) kırılma aşamasında normal ve kayma gerilmeleri c) kırılmayı sağlayan gerilme durumu için Mohr dairesi [48]

Şekil 2.19a'da bir zemin elemanında gerilmeler, Şekil 2.19b'de kırılma aşamasında normal ve kayma gerilmeleri görülmektedir. Bu gerilmelere ilişkin Mohr dairesinde kırılma düzlemi eğrisi ile sürtünme açısı arasında (Şekil 2.19c)

$$2\theta_{cr} = 90^\circ + \phi \quad (2.15)$$

Ya da

$$\theta_{cr} = 45^\circ + \left(\frac{\phi}{2}\right) \quad (2.15)$$

Bağıntısı kurulabilir.

2.2.4.2. Mohr – Coulomb kırılma hipotezi

Kırılma sırasında deformasyon ve gerilme durumu için farklı teoriler önerilmiştir. İlk kez 1776 yılında Coulomb daha sonra Mohr dayanma yapısını iterek hafif şekilde hareket ettiren zeminde kayma düzlemleri gözlemlemiş ve yenilme düzleminde kaymaya karşı maksimum direnç (s veya τ_f) için,

$$s = \tau_f = c + \sigma \tan \phi \quad (2.16)$$

bağıntısını önermiştir. Bu kırılma koşulunu veren bağıntı Şekil 9.13b de görülmektedir.

σ : yenilme düzlemine dik normal gerilme

ϕ : zeminin sürtünme açısı

c : zeminin görünür kohezyonu

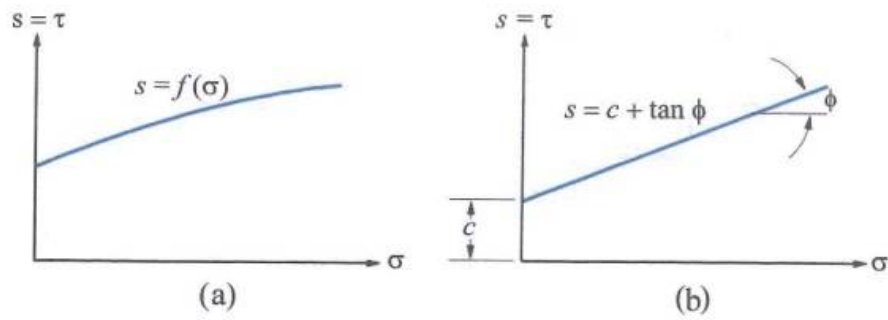
Coulomb eşitliği Amonton'nun iki düzlemin yüzeyleri arasındaki sürtünme yasasına dayandırılmıştır. Bağıntı daneli zeminlerde ($c = 0$)

$$s = \tau_f = \sigma \tan \phi \quad (2.17)$$

doygun killerde drenajsız koşulda ($\phi = 0^\circ$)

$$s = \tau_f = c \quad (2.18)$$

şeklini alır.



Şekil 2.20. Zeminlerde kayma direnci a) Mohr b) Mohr-Coulomb

Çoğu zeminlerde özellikle daneli zeminlerde sürtünme açısı çevre gerilmeleri arttıkça bir miktar azalır. Dolayısıyla kayma direnci genellikle normal gerilme ile doğrusal bir değişim göstermez ve Mohr zarfı hafif eğridir. Şekil 2.20a'da görüldüğü üzere Mohr'a

dayandırılan $\sigma - \tau$ ilişkisi doğrusal olmamasına karşın Şekil 2.20b'de görüldüğü gibi doğrusal kabul edilmesi matematiksel olarak uygun görülmektedir [48].

Eşitlik 2.17 Coulomb'un Eşitlik 2.14'ün özel bir durumudur. Bu iki bağıntı birleştirilerek Mohr - Coulomb kırılma hipotezi olarak adlandırılmıştır. Toplam gerilmeler türünden ifade edilen Eşitlik 2.16 Terzaghi'den sonra efektif gerilmeler türünden,

$$s = \tau_f = c'_f + \sigma'_f \tan \phi' \quad (2.19)$$

olarak tariflenmektedir. c' ve σ' parametreleri zemin iskeletinin parametreleri olup efektif kohezyon ve efektif sürtünme açısı olarak adlandırılır. Zeminin kayma direnci efektif gerilmeler tarafından denetlendiği için uzun süreli yamaç duraylılık analizleri efektif parametrelerden yararlanılarak yapılır [48].

BÖLÜM 3. ADAPAZARI'NIN JEOLJİK ÖZELLİKLERİ

3.1. Doğu Marmara Bölgesinin Jeolojik Evrimi

Doğu Marmara bölgesinin Neojen-Kuvaternlerdeki morfotektonik evriminde; 1) Erken - Orta Miyosen, 2) Geç Miyosen - Pliyosen, 3) En Geç Pliyosen - Günümüz olmak üzere üç ana şekillenme dönemi ayırt edilmiştir. Bu dönemlerde birbiriyle açısız uyumsuz üç çökel istifii oluşmuştur. Erken-Orta Miyosen karasal kırıntılı, Geç Miyosen-Pliyosen karasaldan denizele geçişli, en Geç Pliyosen-Günümüz ise karasal-denizel çökellerle temsil edilmektedir. Bölge Oligosen sonunda Intra-Pontid okyanusunun kapanması sonucu karasal aşınım alanı haline dönüşmüş ve Erken-Orta Miyosen boyunca paleotektonik dönem olaylarının etkisinde kalmıştır. Orta Miyosen sonlarına kadar süren bu aşınım dönemi sonunda geniş alanlara yayılan bir peneplen morfolojisi gelişmiş ve karasal kırıntılılar çökelmiştir. Günümüz jeolojisinin belirlemiş olan neotektonizma Geç Miyosen başlarında başlamış ve birbirinden farklı stildeki iki evrede gelişmiştir. Geç Miyosen-Pliyosen'i kapsayan neotektonizmanın ilk evresinde bölgede K-G yönlü sıkışma rejimi egemen olmuş, bunun sonucunda gelişen D-B yönlü kıvrımlar ile KD-GB ve KB-GD uzanımlı doğrultu atımlı faylarla bölge morfolojik olarak tümünden yükselime uğramıştır. Bu süreç içerisinde başlangıçta, altta akarsu çökelleri ile başlayan ve üste doğru görsel ve denizele geçişli olan Geç Miyosen-Erken Pliyosen istifii çökelmiş, dönem sonunda ise bu çökellerin geliştiğı havzalar parçalanarak Geç Pliyosen'de bölge yüksek aşınım alanı şeklini kazanmıştır. Neotektonik dönemin ikinci evresi ise en Geç Pliyosen'de Kuzey Anadolu Fayının ortaya çıkışı ile başlamıştır ve günümüze kadar olan süreyi kapsar [49].

Doğu Marmara'nın günümüzdeki morfolojisi ve aktif tektonik çatısı Kuzey Anadolu Fayı' nın transform hareketleri ile tanınan bu evrede gelişmiştir. Günümüz Marmara Denizi Havzası' nın da yapısal gelişimi Kuzey Anadolu Fayına bağılı olarak Genç Pliyosen' de başlamıştır. Şekil 3.1.'de jeolojik cetvelin bir bölümü gösterilmektedir.

ZAMAN	DEVİR	DEVRE	MİLYON YIL
SENOZOYİK	KUVATERNER	HOLOSEN	0.8
		PLEYİSTOSEN	1.8
	TERSİYER	PLİYOSEN	5
		MİYOSEN	25
		OLİGOSEN	40
	PALEOJEN	EOSEN	55
		PALEOSEN	65
	NEOJEN		

Şekil 3.1. Jeolojik zaman cetvelinin bir bölümü [50]

3.1.1. Sakarya ilinin jeolojisi

Şehir tamamen nehir çökelleri üzerindedir. İzmit Körfezi'nden itibaren Adapazarı'na ve buradan da Hendek'e kadar uzanan bir çöküntü havzası içinde bulunmaktadır. Adapazarı Ova' s s derelerin getirip biriktirdiği kalın alüvyondan ibarettir. Şehrin güneyinde Kretase yaşlı flişler yer almaktadır. Batıda ise bu formasyonlar üzerine Eosen yaşlı kireçtaşlarının geldiği görülmektedir. Ovanın kuzeyindeki tepeler Devoniyen yaşlı, kırmızı renkli, killi şist ve kumtaşlarından oluşmaktadır. Daha yukarılarda bu tabakalar Üst Kretase yaşlı kireçtaşları ile örtülmektedir. Yeraltı suyu alüvyon içinde çok yüksek seviyede, bazı kısımlarda ise bataklık durumundadır.

Adapazarı eski bir göl yatağı olan sedimanter bir basen kenarında kuruludur. Şehrin güney bölümü sığ ve sert zeminler üzerinde yer alırken kuzeyde yer alan daha büyük ve nispeten Sakarya Nehri ve kolları tarafından taşınarak derin göl çökelleri üzerine istiflenmiş olan kuvarterner alüvyon zeminler üzerine oturmaktadır. Ana kaya formasyonu sedimenter zeminler altında kuzey istikametinde alçalarak kent sınırları

içerisinde 200 metre civarındaki derinliklere ulaşmaktadır. Kentin derin alüvyonlar üzerinde yer alan kesiminde yüzeyden itibaren yaklaşık 15 metre derinlik içerisinde yer alan zeminler, genel olarak yer yer kil ve çakıl bantları içeren ince kum, silt ve kilin farklı oranlarından oluşmaktadır. Kentin alüvyon zeminler üzerindeki kesiminde YASS yüksek olup 0,2 - 3 m arasındaki derinliklerde seyretmektedir. Daha aşağıda ise göl çökellerinin oluşturduğu kalın kil tabakaları yer almaktadır.

Adapazarı Ovası elips biçimli olup doğuya ve güney doğuya doğru bir körfez gibi sokulur. Batıya doğru Sapanca Gölü' nü içine alan ve İzmit körfezinin doğusundaki ova ile birleşen oluk biçiminde bir çukurda uzanır. Güney doğu yönünde ise Samanlı dağlarının dik yamaçlarına dayanır. Sakarya Irmağı Geyve Boğazı aracılığıyla bu dağlar arasından ovaya çıkar.

3.1.2. Adapazarı ovası (Akova)

Adapazarı Ovası akarsu karakterli alüvyon topraklarla doludur. Bu ova Aşağı Sakarya Vadisinde, Sapanca Gölü ile Adapazarı merkez ve doğusunda yer alır. Marmara Bölgesi' nin en büyük ovalarından olan ve diğer bir adı da Akova olan bu verimli topraklar Keremali Dağlarının eteklerine kadar uzanır. Yüzölçümü 620 km²' dir. Yükseltisi yaklaşık 30 metre olan ovaya çevredeki dağlardan sırtlar sokulmakta ve bazı alanlarda tepecikler oluşturmaktadır. Ovayı esas olarak güneyden kuzeye doğru akan Sakarya Nehri ve güneydoğudan kuzeybatıya doğru akan Mudurnu çayı sulamaktadır. Sakarya nehrine setler ve barajlar (Sarıyer ve Gökçekaya) yapılmadan önce yoğun yağışlar olduğu zaman ve karlar eridiği zaman nehir sık sık taşmakta ve ovayı basmaktaydı. YASS seviyesi yüksek olduğundan taşkın suları çekildikten sonra yer altı suyunun yer yer yüzeye çıktığı alanlar vardır.

3.1.3. Akovanın oluşumu hakkında görüşler

Gezgin tarih yazarı C. Texier 1862'de, Beşköprü'den bahsederken; "Köprüyü geçtikten sonra kuzey doğuya gidilirse Adapazarı adında küçük bir köye gelinir. Bunun böyle adlandırılmasına neden Sakarya'nın iki kolu arasında oluşan bir adacıktan dolayıdır."demektedir. Günümüzde Sakarya böyle bir adacık yapmıyorsa da şehrin Tavuklar Köprüsü'ne giden şose üzerinde Adapazarı'nın bittiği yerde Sakarya yatağının izleri görülmektedir [51].

Tchihatcheff 1867-1869 yıllarında Düzce ile Adapazarı arasındaki Hendek oluşunu ele almış bu kısmı eski bir vadi tabanı olarak açıklamış ve buradan çakıllı depoların Kuvaterner taş olduğunu ileri sürmüştür. Sapanca'dan çıkıp Beşköprü vadisini takip eden Çark Suyu'nun vadi ile ilgili problemlerine de değinmiş ve eski tarihçilerin bilgilerini nakletmiştir [52].

X. Dybowski 10 Temmuz 1884 İstanbul Depremi Raporu'nda deprem hakkında tuttuğu notlarda bu depremden fazlasıyla etkilenen Adapazarı kenti için şunlardan bahsetmektedir, "Kentin genel görünümü hazin; topraklı, kışın çamurlu, yazın tozludur. Yolları yoktur. Kışın evler bataklara çevrilidir. Sıcak mevsimlerde bu durgun sular ateşli hastalıklara neden olur. Ülkenin arz ettiği tüm dezavantajlara karşın Avrupa şirketlerine şunu öneriyorum: Zirai veya endüstriyel projelerinizden vazgeçmeyiniz. Toprak gerçekten şaşırtıcı verimlilikte, nemli iklim, bitki örtüsü son derece uygun" 1890 yılında N.Andrussow tarafından ileri sürülen Karadeniz'in Pleyistosen devrini farklı dönemlerinde "İzmit Kanalı" olarak adlandırılan su yolu ile Aşağı Sakarya Vadisi - Sapanca Gölü - İzmit Körfezi boyunca Marmara Denizine bağlı olduğu görüşü, 1990 - 1995 yılları arasında yapımı planlanan İzmit köprüsü nedeniyle deniz ve karada yapılan sondajdan derlenen verilerin incelenmesiyle destek kazanmıştır [53].

Rish 1909'da yaptığı çalışmada, ise Sapanca Gölü'nün vaktiyle burada E - W uzanımlı bir graben içinde İzmit Körfezi'nin devamı olarak Adapazarı havzasına kadar sokulan bir körfez halinde Marmara'nın devamı olduğunu ve Sakarya'nın önceleri bu körfeze

doğrudan döküldüğünü daha sonra körfezden ayrılan ve tatlılaşan Sapanca Gölü'ne ve o yol ile İzmit körfezine aktığını daha sonra ise eski bir vadiyi kullanarak Karadeniz'e bağlandığını söylemiştir [54].

W.Peck 1918'de yaptığı çalışmada, Sapanca İzmit oluğuna temas etmekte ve burada yerli kayanın yükselmesiyle meydana gelmiş bir eşğin Sapanca Gölünü İzmit Körfezi'nden ayırdığını söylemektedir. Peck'de bu eşğin Kuvaterner de oluştuğunu ileri sürmektedir [55].

Pfannenstiel 1944'te yaptığı çalışmada, İzmit körfezi ile Karadeniz arasında uzanan Sapanca Oluğu- Adapazarı havzası-Aşağı Sakarya vadisini takip ederek alçak bir bağlantı sahasının Kobelt tarafından tespit edildiğini ileri sürmüştür. Buna göre Sapanca Oluğu ve Adapazarı depresyonu hatta eşik sahasındaki ovalar muhtemelen çeşitli faylardan oluşan kenarlarla sınırlanmış çöküntü sahası durumundaydı. Daha sonra üst Diliviyum (pleistosen) da bu sahalar boyunca bağlantı kesilmiş ve Sapanca Gölü kalıntı bir deniz parçası halinde oluşmuştur. Yöredeki Kuvaterner, Holosen ve Pleyistosen' i içermekte ancak bunlar karşılıklı olarak Aluviyum ve Diluviyum olarak adlandırılmıştır [56].

Lahn, Rish'in önerisini benimsemektedir. Ona göre Sapanca Gölü, Neojen sonlarına doğru veya Kuvaterner başlarında oluşmakta olan çökmelerle ilgili olarak doğuya doğru uzanan deniz kolunun, kuzey ve güneydeki yüksek sahalardan gelen akarsuların alüvyonları ile bölünmesi sonucu oluşmuş bir baraj gölüdür. Gölün bulunduğu alan bir graben sahasıdır [57].

Bu araştırmacıya göre bölgeye giren deniz kolu muhtemelen Adapazarı Ovası'nı da kapsamaktaydı. Böylece Sakarya Nehri İzmit körfezine akıyordu. Sapanca Gölü'nün körfezden ayrılmasından sonra da Sakarya'nın buraya aktığını daha sonrada Sapanca doğusunun alüvyonla dolması ve Karadeniz'in Adapazarı havzasını kapması sonucu Sakarya'nın Karadeniz'e kadar uzandığı sonucuna varmıştır. Sapanca Gölü'nden çıkan Çark Suyu Sakarya'nın alüvyonları sebebiyle ancak 3 km. sonra kuzeyde bu nehirle birleşmektedir.

Erinç 1949'da yaptığı çalışmada, Sapanca Gölü'nün derinlik haritasını ilk defa yapmış ve morfometrik özelliklerini ortaya çıkarmıştır. Buna göre yüzölçümü 46,9 km² olan Sapanca Gölü'nün en fazla derinliği 61 metredir. Göl tabanı, kuzeydoğu ve özellikle batıda eş derinlik izobatlarının gidişinde girinti çıkıntı bulunmasıyla burada sular altında kalmış bir vadi görünümündedir [58].

İnandık'a göre Adapazarı Ovası ve Sapanca Gölü'ne karşılık gelen sahalar bölgenin en alçak kısımlarını teşkil ediyordu. Bu çukur alanlarda çevredeki yüksek alanlardan gelen materyallerin biriktiği sığ tatlı su gölleri bulunuyordu. Daha önceleri batıya akmakta olan Sakarya Nehri'nin yatağı sonradan alüvyonlarla dolmuştur. Sakarya Nehri de bu alüvyonların akışı önlemesi nedeniyle kuzeydeki bir vadiden istifade ederek Karadeniz'e yönelmiştir [59].

Bilgin' e göre Adapazarı ovasından geçen Sakarya nehrinin Geyve boğazından çıktıktan sonra esas uzanışı kuzey doğu olan 1.5 km ye yaklaşan bir menderes kuşağına sahip olduğunu belirtmiş aynı zamanda Sakarya'nın özellikle menderesler oluşturduğu kısımlarda yakın zamanlarda meydana gelen yatak değişiklikleri göstermiştir. Sakarya'nın bugünkü ova kısmını oluştururken değişken kısımlarda aktığını belirlemiştir. Sakarya ovada bazen menderesler yaparak bazen de çapı 500 m ye varan bükülmeler çizerek kuzeye akmaktadır. Nehrin yüksek boşalımlı olmasından dolayı ve sellenmeyi önleyecek az miktarda bitki örtüsü bulunması sebebiyle ova aşırı hacimde çökelle doludur. Araştırmacı ayrıca Sakarya nehrinin Geyve Boğazı'ndan ani olarak çıkışından sonra düz olan Adapazarı ovasına ulaşarak hızını kaybettiğini ve bu esnada çakıl, kum, kil ve silt malzemelerini ovaya bıraktığını daha sonra yatağın gittikçe dolması sonucu azalan akım hızının ise kil ve silt istiflerini birikmesine yol açtığını belirtmiştir [60].

Gökçen, Bilgin'in görüşünü destekler. Eski çağlarda ovanın insansız olduğu birçok araştırmacı tarafından yinelenmektedir. Bunun sebebi olarak Sakarya Nehri'nin ilkbaharda karların erimesi ve yağmur sularının fazlalaşması üzerine kabarıp 1965' e kadar ovayı basması gösterilmektedir. Mart ve Nisan aylarında ovadaki taban suyunun da yüksek olması nedeniyle taşkın sularının çekilmesinden sonra bölgede uzun süre su

birikintileri ve bataklıklar bulunmaktaydı. Kente günümüzde bile kış ve ilkbahar aylarında yeraltı su seviyesi yer yer yüzeye çıkabilmektedir. Balcıoğlu ayrıca suların bol olduğu mevsimde Karasu ile Adapazarı arasında nehir yoluyla taşımacılık yapıldığı ve bunun 1960'lara kadar sürdüğünü bildirmiştir. Gökçekaya ve Sarıyer barajlarının kurulması ve ovada Sakarya nehrinin her iki tarafına setler yapılması nehri kontrol altına almış ve ovada alüvyon birikimi durmuştur [61].

14/8/1991 tarihinde başlayan ve 18/10/1991 tarihinde tamamlanan Adapazarı kenti kanalizasyon projesi inşaatının ana kolektör güzergahının ve temel özellikleri irdelenmek üzere yapılan çalışmalar sonucunda Adapazarı zemin özellikleri ortaya çıkarılmıştır. Çalışma süresi içinde İller Bankası Genel Müdürlüğü tarafından 24 adet 9 metre derinliğinde sondajlar açılmış, sondajlarda SPT yapılmış ve UD numuneleri alınmıştır. Deney sonuçlarına göre proje sahası zemin özellikleri çıkarılmıştır. Ayrıca İTÜ "İller Bankası 1.Bölge Müd. Adapazarı Kanalizasyonu İnşaatı Hakkında Geoteknik Rapor, İTÜ İnşaat Fakültesi, Şubat 1991" ve ODTÜ "Adapazarı Kanalizasyon İnşaatı Geoteknik Raporu, Ocak 1991" çalışmalarının sonuçları da yorumlanmıştır.

"İnceleme alanının %90'ı alüvyonlarla kaplıdır. Kaya zeminlerin alüvyon örtüsü altından çıkarak yüzeylendiği bölüm inceleme alanının güney doğu kesiminde Beşköprü batısı, Maltepe ve Hızırtepe semtlerinin yüksek kesimleridir. Kanal güzergahları zemini kil, silt ve kum seviyeleri veya bunların karışımından oluşan seviyelerdir. Yer altı su seviyeleri 0,60-3,95 m arasında değişmektedir. Yeraltı suyu Sakarya Nehri'ne ve Çark Deresi'ne doğru akım göstermektedir. Dolayısıyla Çark Deresi ve Sakarya Nehri seviyeleri yeraltı su seviyesini değiştirmektedir."

Bol, doktora tezinde Aydın ve Sofuoğlu ile yaptığı kişisel söyleşiler sonucunda Adapazarı'nın yeraltı ve yerüstü özellikleri hakkında bilgiler elde edilmiştir. Bu bilgilere göre Yahyalar ve Yağcılar mahalleleri bataklık ve sazlıktır, bu bölgelere kör Sakarya denir. Eski garajlar mevkiinde yaz kış kurumayan yaklaşık 3 dönüm bataklık ve sazlık arazi vardır. Bu söyleşilerde yakın geçmişte tatlı su gölü olan bölgelerde ayırtlanmıştır. Adapazarı ovasında tarla ve bahçelerin boyutları küçük olsa bile

etrafları en az 1 m derinliğinde ve genişlikleri 50-60 cm olan kanalarla çevriliydi. Kanallar birbirlerine sistem içinde bağlı idiler. Belediye bazı bölgelerde bunları ıslah ederek kanalizasyon haline getirmiştir. Sofuoğlu yaptığı inşaatların temel kazılarında çakıl, temiz kumların muhtelif yerlerde açığa çıktığını, çakıllar vasıtasıyla büyük debilerde yeraltı sularının iletildiğini ve bunların muhtemelen eski bir nehir yatağının kalıntıları olduğunu vurgulamıştır. 1999 Marmara Depremi sonrasında yapılan ayrıntılı çalışmalar sonucunda Erken, yapılan sondaj sonuçlarından genel bir zemin haritası çıkarmıştır [62].

Erken ve diğ. 2003'te yaptıkları çalışmada, 17 Ağustos 1999 Kocaeli Depremi'nde Adapazarı'nda oluşan ağır hasar ile bölgenin yerel zemin koşulları arasında olan ilişki incelemişlerdir. Adapazarı'nda hasarın en yoğun olarak gözlemlendiği bölgede temel zeminini düşük plastisiteli veya plastik olmayan siltli zemin tabakalarıdır. Düşük plastisiteli silt tabakasının kalınlığı genel olarak 3,0 m ile 15,0 m arasında değişmekle birlikte yer yer 15,0 m'yi aşmaktadır. Bu tabakanın bazı yerlerinde kum içeriği %50'ye kadar ulaşmaktadır. Laboratuvar deney sonuçlarının ve sıvılaşma analizlerinin birlikte değerlendirilmesi sonucunda plastik olmayan veya düşük plastisiteli siltlerin ve ince dane oranları düşük kumların sıvılaşma eğiliminde oldukları ve ayrıca yer yer killerde ve plastik siltlerde taşıma gücü kaybının olduğu anlamışlardır. Tsukamoto ve diğ. 2001'de yaptıkları çalışmada, deprem sırasında bazı binalarda eğilme oturma sebeplerini incelemek için deneyler yapmışlardır. Adapazarı zeminlerinin genel olarak silt ve kumlardan oluştuğunu belirtmişlerdir [63].

Kiku ve diğ. 2001'de yaptıkları çalışmada, yaptıkları araştırmalar sonucunda Adapazarı kent merkezinin etrafının önceleri bataklıkla çevrili bir ada olduğunu ve çevresine oranla daha yaşlı çökellerden oluştuğu kanısına varmışlardır [64].

Sakarya nehri, Geyve boğazından çıktıktan sonra, Adapazarı ovasına girdiği alanda vadi tabanını ve güncel taraçaları sınırlayan 100-150 metre seviyelerindeki (Türbe tepe 109 m. - Mezarlık tepe 124 m. gibi) çakıl, kum karışımı depo karakterli seviyeler ile çevrilmiştir. Bu depolar bir fandelta karakterindedir. Orta Pleistosen'de İzmit körfezi ile bağlantılı olan Adapazarı ovası, daha sonra İzmit körfezinin batıya çekilmesi ile

Sakarya ve diğer akarsular tarafından doldurulmuş ve ovanın drenajı Karadeniz'e bağlanmıştır. Bu fikrin en önemli kanıtı ise Adapazarı ovasında yapılan C14 mutlak yaş tayinleri ve Sakarya nehrinin Geyve boğazından çıkıp ovaya girdiği sahada oluşturmuş olduğu fandeltadır. Orta Pleistosen'de Sakarya nehri ile bağlantılı olan İzmit Körfezi'nin Genç Holosen' de batıya çekildiği saptanmıştır. İzmit Körfezi ile bağlantısı kopan Sakarya bu defa kuzeye doğru hareket ederek Karadeniz'e akmaya başlamıştır. İzmit Körfezinin batıya çekilmesi ve Sakarya nehrinin Karadeniz'e yönelmesinden günümüze kadar Sakarya nehri, Mudurnu çayı ve diğer küçük dereler Adapazarı ovasının drenaj sistemini oluşturmaya çalışmışlardır. Adapazarı Ovasına güneyden giren Sakarya nehri ve Mudurnu çayı, ovaya girişte oluşturdukları çakıl depoları ve bu çakıl depolarından Sakarya nehri yatağında olan üzerinde yapılan çakıl analizlerinde ortamın denizel karakterli olduğu ortaya konmuştur.

Sonuç olarak, Sakarya nehri Karadeniz'e ulaşmadan önce, Adapazarı havzasına boşalmakta olup, Geyve boğazı ağız kısmında Fandelta karakterinde bir kıyı deltası oluşturabilecek kadar uzun bir süre bu havzaya akmıştır. Adapazarı Ovasında meydana gelen çökmeler bağlı olarak Sakarya nehri oluşturduğu bu fandeltayı dönemler halinde yarararak yatağını derinleştirmiştir. Geyve Boğazı kuzey çıkışında oluşan fandeltanın tamamıyla bir delta karakteri göstermemesi ve depolar üzerinde yapılan çakıl analizlerinden malzemenin çok uzaklardan getirilmemiş olması sonucu, bize bu fandeltayı oluşturan akarsuyun şimdiki Sakarya'dan daha kısa boylu bir akarsu tarafından oluşturulmuş olabileceği düşüncesini doğurmaktadır.

Ülkemizin, ekonomik ve sosyal açıdan önemli bir bölümünü oluşturan Adapazarı ovası ve çevresi, Kuaterner jeomorfolojisi ve doğal çevre değişimleri açısından oldukça ilginç bir alan olması nedeniyle ileride daha da ayrıntılı çalışılması gereken problemli sahalardan birisi olduğunu söylemektedir.

3.1.4. Adapazarı jeolojisi ve jeomorfolojisi

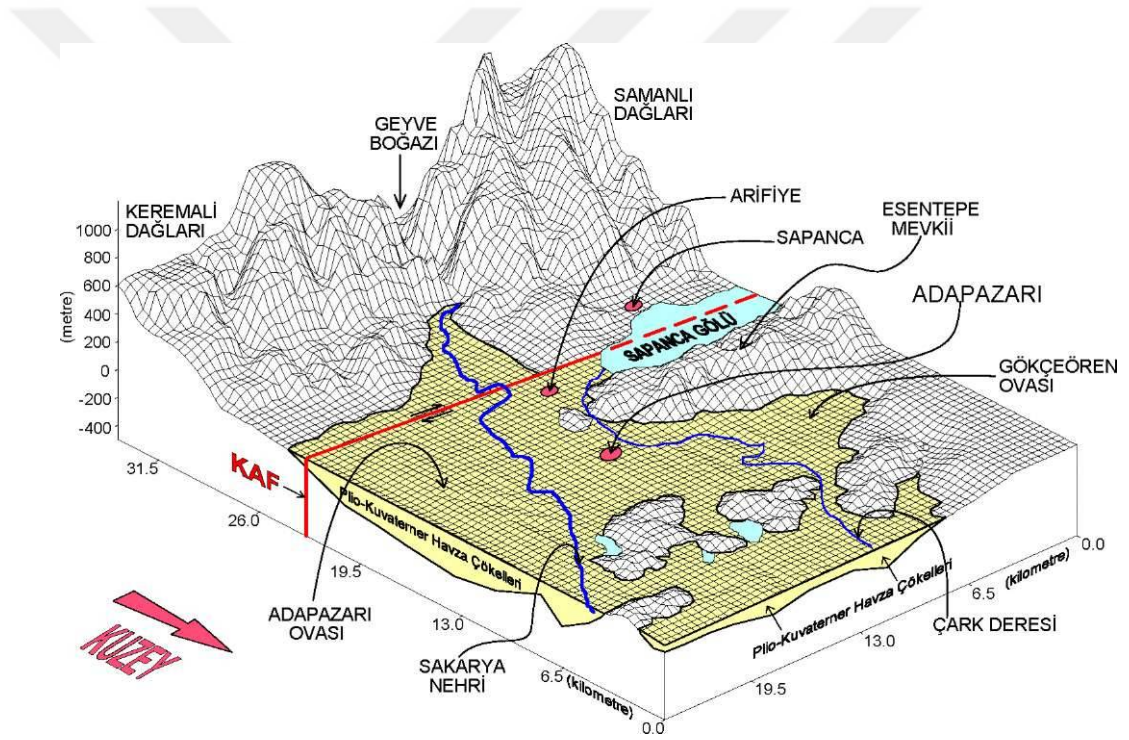
Adapazarı kenti Kuvaterner, geniş alana yayılmış olan alüvyon ile temsil edilir. Adapazarı Hendek ve Akyazı ovaları tutturulmamış kum, kil, silt ve çakıldan oluşur. Alüvyonu oluşturan gereçler Sakarya Nehri, Çark Suyu ve Mudurnu Çayı tarafından Kuzey Anadolu Fay Zonu ve güneyindeki kayalardan taşınmıştır.

MTA, yaptığı çalışmalarda ova kenarlarında düşük olan alüvyon kalınlığının ova ortalarında 150 metre kalınlığa ulaştığını bildirmiştir. DSI'nin katkılarıyla Adapazarı Yenigün Mahallesi'nde yaptırılan 200 metrelik sondaj sonucunda alüvyon içinde kalınmıştır. Bu kadar büyük bir alüviyal dolgunun hangi bölgelerden taşındığının bilinmesi için Sakarya havzasından bahsetmek gerekir. Sakarya havzası 58.000 km² lik su toplama alanıyla ve 4 milyar m. üzerinde yıllık ortalama su hacmi ile Türkiye'nin büyük havzalarından biridir. Bolu, Ankara, Konya, Afyonkarahisar, Kütahya ve Bursa arasında 2.075.000 hektar ovalık alan vardır [65].

Sakarya Nehri ilin içinde uzunluğu 159,5 km'dir. Pamukova'nın güneyinde il topraklarına girer. Geyve Boğaz'ına girmeden önce Karaçay'ın suyunu alır. Doğudan Mudurnu Çayını da (65 km.) aldıktan sonra kuzeye yönelir. Sapanca Gölünün fazla suyunu boşaltan Çark Suyu (45 km.) kuzeyde Sakarya ile birleşir. Vadinin batısında 1000 metreye ulaşan dağlar yükselir. Sapanca'dan sonra düze yakın alanda akmaya başlar, kuzeydeki plato alanından yer alan boğazı geçer ve kıyı ovasına ulaşır. Karasu ilçesinde Karadeniz'e dökülür. Nehrin ovanın değişken kısımlarında aktığına menderesler oluşturduğuna dair bulgular vardır. Nehrin yüksek boşalımlı olmasından dolayı ve sellenmeyi önleyecek az miktarda bitki örtüsü bulunması sebebiyle ova aşırı hacimde çökelle doludur. Ayrıca Geyve boğazı'ndan ani çıkışı ardından düz Adapazarı ovasında hızını kaybettiğinden çakıl, kum, kil ve silt malzemeleri ovaya bırakmış ve yatağın gittikçe dolması sonucu azalan akım hızı ile kil ve silt istiflenmesine yol açmıştır [60].

Şekil 3.2.'de görüldüğü gibi Adapazarı havzasını güneyden sınırlayan yüksek kısımlar daha ziyade E-W uzanımlı olup bu uzanımın batı kısmını Samanlı Dağları, doğu

kısmını ise Karadağ-Keremali Dağları oluşturur. Bu yüksekliğin nispeten alçaldığı kesiminde Geyve Boğazı olarak bilinen derin vadi Sakarya nehri tarafından katedilir. Adapazarı' nın güney batısında bulunan Sapanca Gölü' nün kuzey ve güney kısımları yüksek tepeliklerle kısıtlanır. Sapanca Gölü' nün doğu kısmı düz bir saha teşkil eder. Kentin kuzey kısımları (Karakamış, Dağdibi kuzey kenarları) 150-200 m civarında tepelik bir saha ile sınırlanır. Adapazarı şehrinin kurulmuş olduğu saha genelde düz bir görünüm ihtiva etmekte olup şehir merkezinin deniz seviyesine göre yüksekliği genelde 31m. civarındadır. Bu yükseklik NE istikametinde % 0,5 NW istikametinde %2'lik bir eğimle azalma gösterir. Kentleşme sınırlarındaki bu düzlüğü batıda Serdivan ve güneybatıda Erenler mevkileri kısmen bozmaktadır.



Şekil 3.2. Adapazarı'nın KD'dan GB'ya doğru morfolojik görünümü [65]

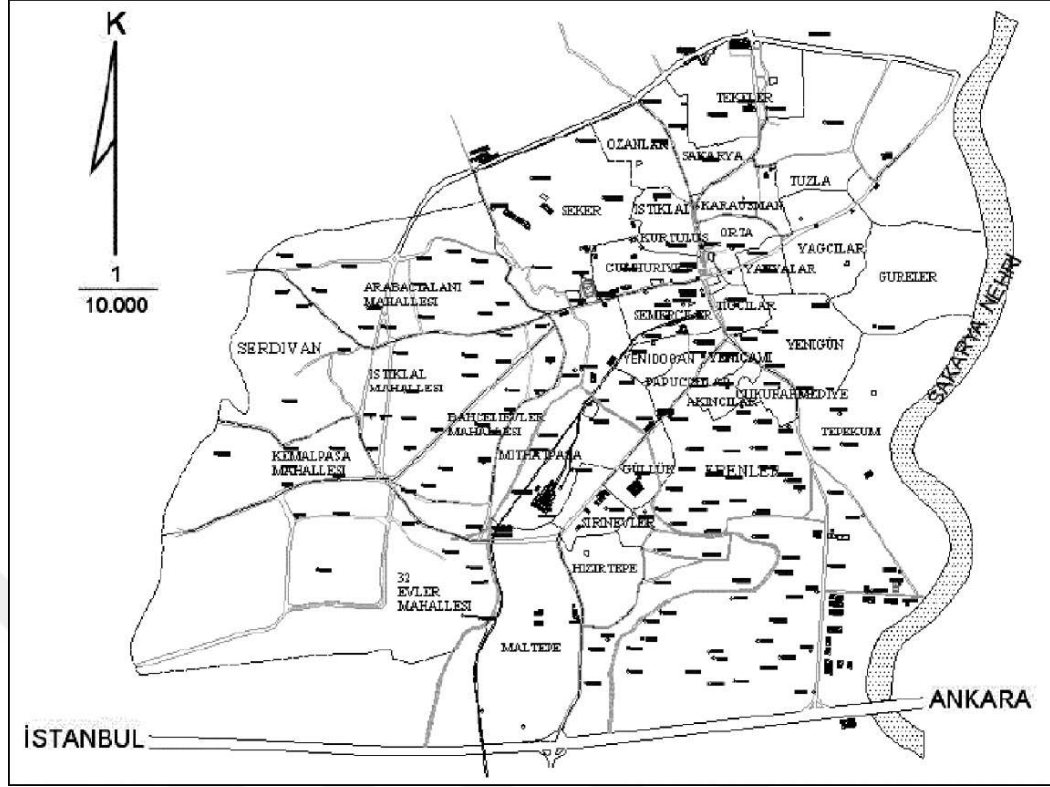
3.2. Adapazarı Zeminlerine Genel Bir Bakış

Adapazarı' nın genç çökeller üzerine kurulu olduğu ve bu çökellerin yeterli sıklığa ulaşmamış olduğu geçen bölümlerde bahsedilmişti. Genel yapı itibarıyla Adapazarı zeminleri 17 Ağustos 1999 depreminde sivilaşmış ve taşıma gücü kayıplarına uğramıştır. Sivilaşma ile yapılarda dönmeler, batmalar ve ötelenmeler meydana

gelmiştir. Zayıf zeminler üzerine kurulu olan Adapazarı'nda en büyük hasar ilçe merkezinde meydana gelmiştir. Sıvılaşma potansiyeli yüksek olan, konsolidasyon süreçlerini tamamlamamış ve ince tane oranı yüksek olan Adapazarı zeminleri magnitüd olarak 7,4 büyüklüğünde gerçekleşen 17 Ağustos 1999 depremini şiddet olarak büyük değerlerde hissetmiştir. Bu da büyük yıkımlara neden olmuştur.

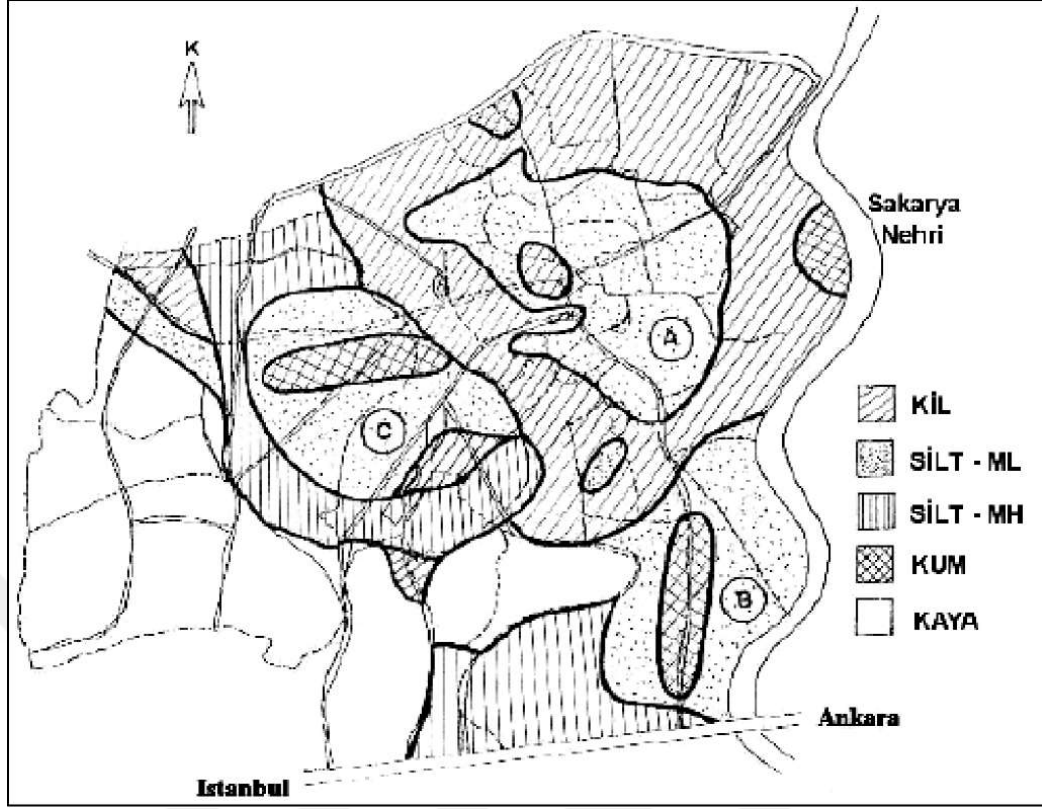
Adapazarı'na komşu ilçeler Sapanca ve Arifiye KAF'a yakın olmasına rağmen depremden daha az etkilenmiştir. Bunun nedeni bu bölgelerin havza tabanı topoğrafyasının yüksek tepeliklerden olması ve gevşek çökellerin çok ince olmasıdır. Zemin özelliklerinden dolayı binalarda 2 m'ye kadar varan oturmalar gözlenmiştir. Cadde ve sokaklar boyunca gömülü olan kanalizasyon boruları zemin yüzeyine doğru harekete zorlanmıştır. Aynı zamanda da binalar kanalizasyon boşluklarına hareket etmişlerdir [62].

Adapazarı ilçesi Sakarya havzası içerisinde bulunmaktadır. Havzadaki alüvyonlar jeolojik süreç içerisinde Sakarya Nehri ve Çark Suyu tarafından taşınmıştır. Siltli ve killi tabakaların kalınlığı 3 m' den başlayıp ilçenin çeşitli yerlerinde 15 m' yi aşmaktadır. Depremden sonra zorunlu hale getirilen parsel bazında zemin etütlerinin yapılmasıyla ilçenin bir çok bölgesinde sondajlar yapılmıştır (Şekil 3.3).



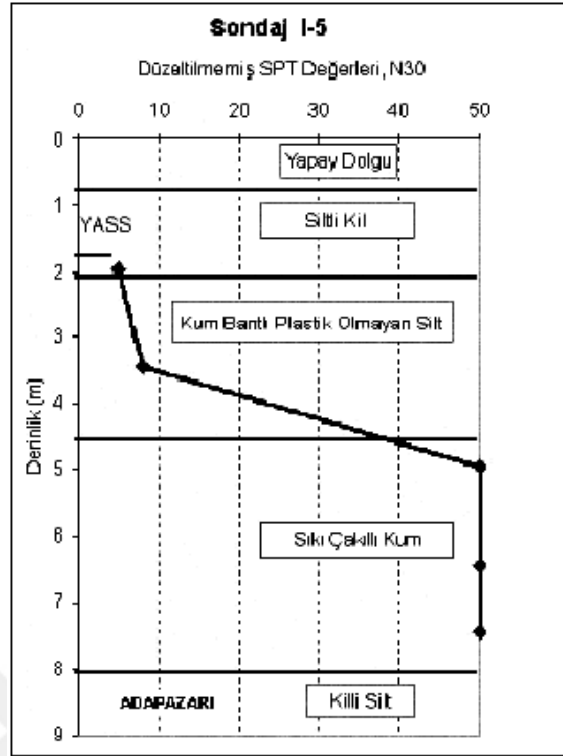
Şekil 3.3. Adapazarı İlçesi'nde açılan bazı sondaj yerleri [62]

Şekil 3.4.'de Erken'e göre zemin verilerine dayanılarak oluşturulan Adapazarı şehrinin yüzeyden yaklaşık 15 m derinliğe kadar olan yüzey tabakalarının ayırımı görülmektedir. Plastik olmayan veya düşük plastik özelliği olan silt tabakaları şehrin merkezinde yer almaktadır. Bu tabakalaşma A bölgesi olarak şekil üzerinde belirtilmiştir. Bu bölgede siltli zemin içerisinde kum oranı bazı yerlerde %50 mertebesine kadar çıkmaktadır.

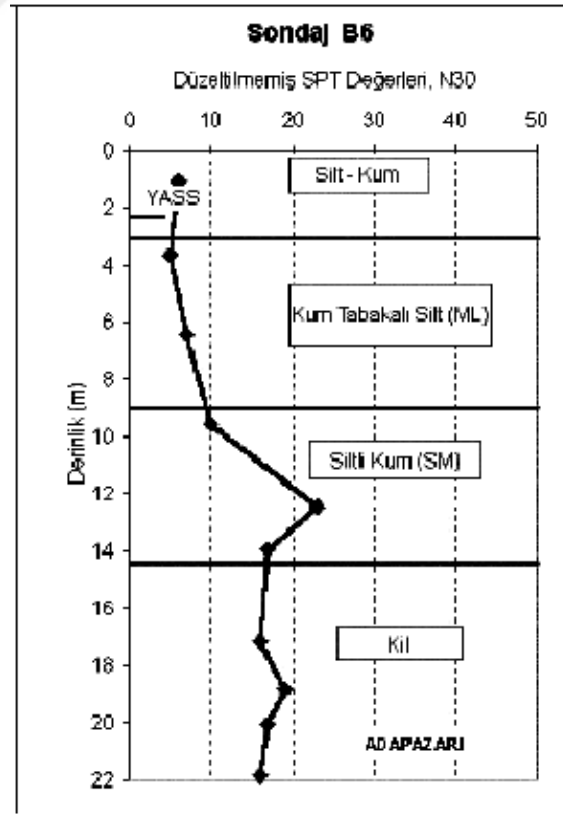


Şekil 3.4. Adapazarı'nın ilk 15 metredeki zemin tabakaları [62]

Hasarın yoğunlaştığı A bölgesi içerisinde yer alan Çark Caddesi'nde Adapazarı şehrinin kanalizasyon boru hattı projesi kapsamında açılan sondajlardan ikisi I-5 ve B6 aşağıda verilmiştir. Şekil 3.5.'de I-5 sondaj kesiti görülmektedir. Kum bantlı plastik olmayan silt tabakası, dolgu ve siltli kil tabakaları altında yer almaktadır. SPT darbe sayıları, ASTM standartlarına uyularak yapılan deney sonucunda 4 m'ye kadar 10'dan küçüktür. Çakıllı kum tabakası sıkı durumda olup killi silt tabakasının üzerinde yer almaktadır. Şekil 3.6.'da verilen B6 sondaj kesiti şehirde ağır hasar gören bölgelerin genel zemin yapısını ortaya koymaktadır. Bu kesite göre yumuşak silt, kum tabakaları 14 m. derinliğe kadar uzanmaktadır. Adapazarı'nda yer altı su seviyesi çok yüksek olup yaklaşık 1 m. ile 3 m. arasında değerler almaktadır. Yer altı suyu seviyesinin oluşumunu şehirden geçen iki akarsu, Sapanca Gölü ve doğal olarak mevsimsel yağış durumu etkilemektedir [66].

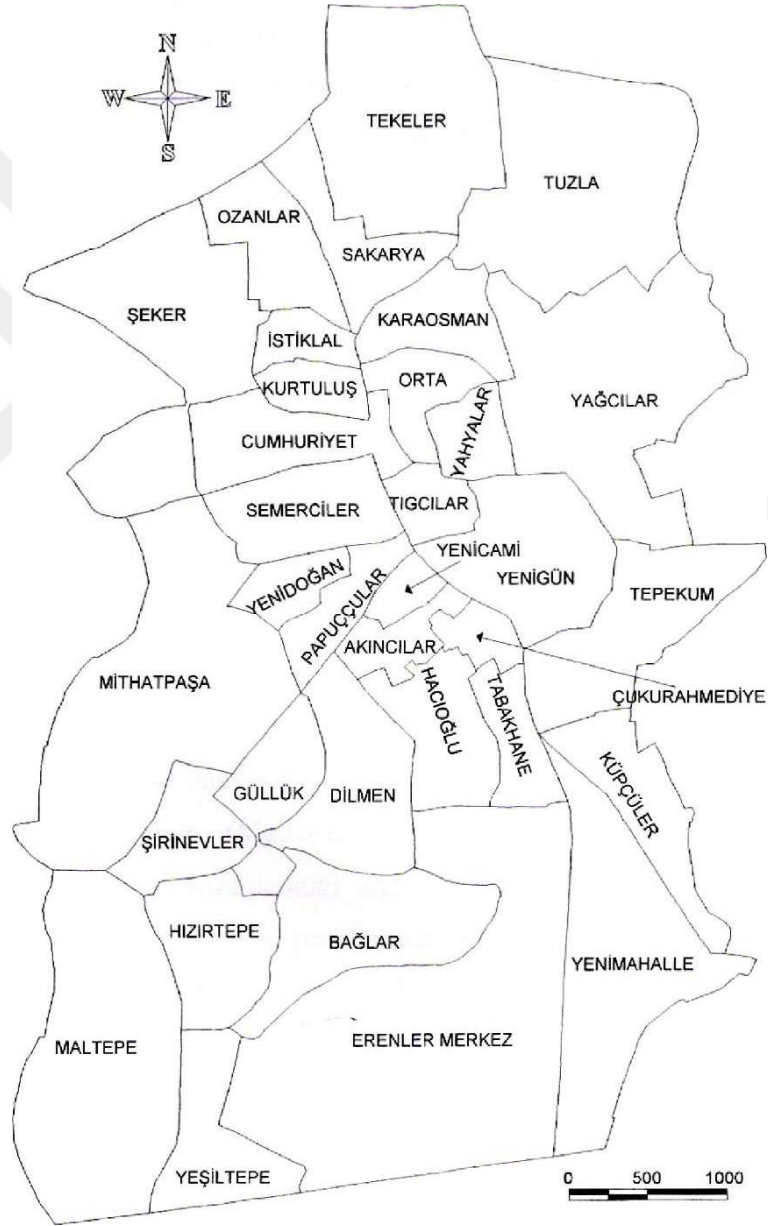


Şekil 3.5. Adapazarı şehrinin tipik kesidi [66]



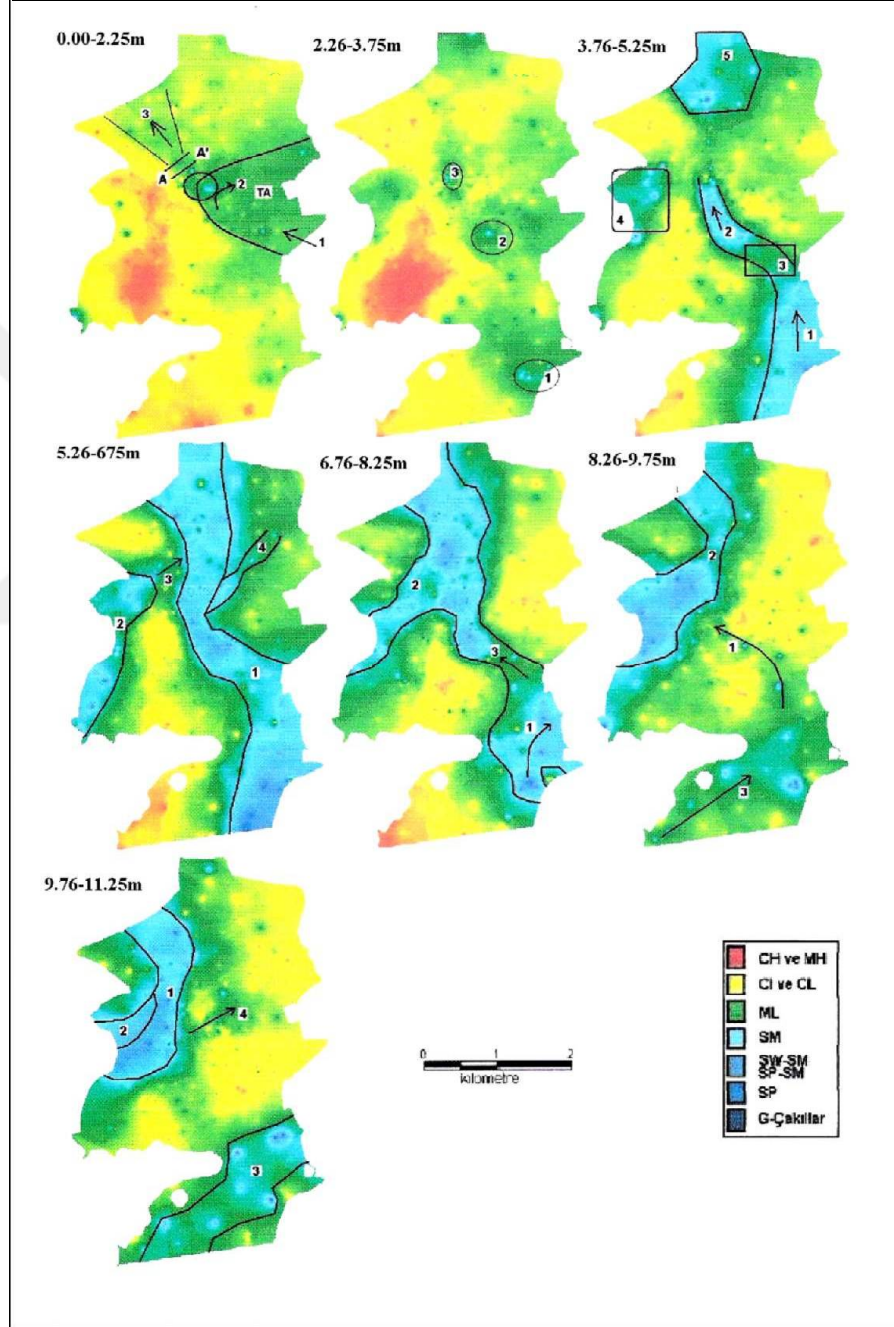
Şekil 3.6. Adapazarı'nda ağır hasar alan bölgeden zemin kesidi (B6) [66]

Bol 2003'te yaptığı çalışmada, Adapazarı zeminleriyle ilgili kapsamlı bir araştırma yaparak belli derinliklerde Adapazarı ve Erenler Belediyesini kapsayan 34 mahallede zeminleri TS 1500/2000 hükümlerine göre 15,75 metreye kadar sınıflandırmıştır [67]. Zemin yapısı yorumlanmadan önce, bu 34 mahallenin sınırlarını gösteren bir sayısal haritaya ihtiyaç vardır. Bu haritalarda kullanılan mahallerin 26 tanesi Adapazarı Merkez Belediyyeye, 8 tanesi Erenler belediyesine aittir (Şekil 3.7).



Şekil 3.7. Adapazarı sayısal haritası [67]

Sayısal haritada görülen, Kent merkezinin Güney Doğusunda bulunan Maltepe, Yeşiltepe'nin kuzeyi, Hızırtepe, Bağlar ve Güllük Mahallesinin güney ucu ana kaya üzerindedir. Aşağıda Bol'un yapmış olduğu zemin özelliklerini sınıflandıran harita 11,25 metre derinliğe kadar gösterilmektedir (Şekil 3.8).



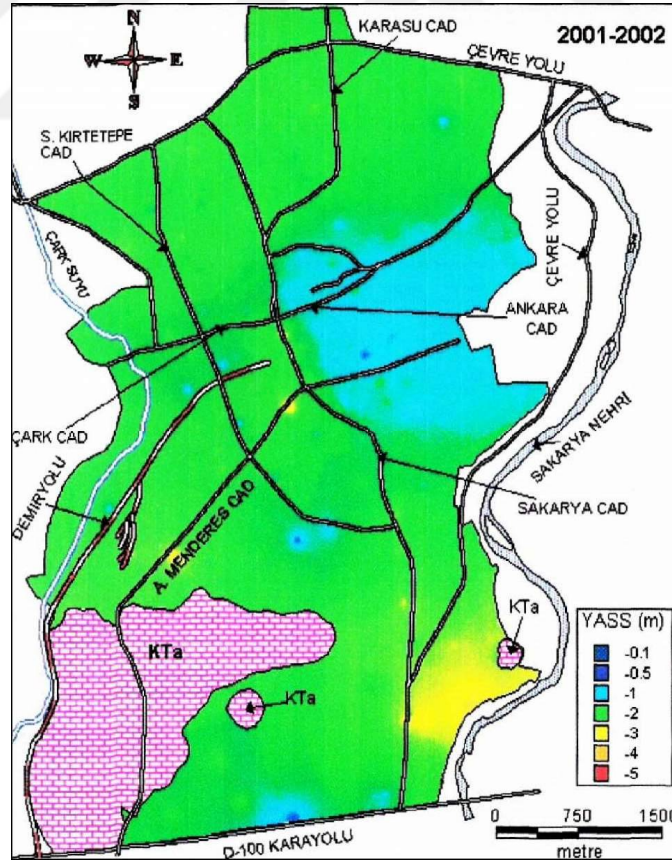
Şekil 3.8. Belli derinliklerde Adapazarı zemin haritası [67]

Şekil 3.8.'deki haritalar yorumlandığında ilginç sonuçlar ortaya çıkmaktadır. Şöyleki; Yüzeyden 3.75 metreye kadar olan zemin özellikleri birbirine benzer yapıdadır. Bu tabakalarda kırmızı ile gösterilen CH sınıfı zeminler Adapazarı merkezinde bulunan tepelik sahanın kuzeyinde ve güneyinde ilçe merkezinde büyük bir alana yayılmıştır. Bu CH sınıfı killi yüzey sularının Adapazarı güneyinin tepelik kısımlarını teşkil eden Akveren formasyonunun (KTa) içerdiği killi kireçtaşı, marn, kil taşı, silt taşı gibi kayaçların ayrışma ürünü olan ince malzemeyi tepelerin eteklerine biriktirmesi şeklinde oluşmuşlardır [67]. Şehrin kuzey ve doğu bölgesinde ML sınıfı killi hakimdir ve kuzey ucunda yer yer CL sınıfında killi göze çarpmaktadır. Tabaka-1 ve Tabaka-2' de kumlar çok kısıtlı bir alanı kaplamaktadır. Kumların kapladığı alan Sakarya Nehri' nin bulunduğu bölgeye yakın olmasından dolayı belli dönemlerdeki taşkınlar sebebiyle bu bölgelerde kum birikimleri oluşmuş olmalıdır [67]. Bol (2003)' e göre taşkın suları kentin içine ok1 yönünde girmekte taşkın debisi çok yüksek olmadığı zamanlarda ok2 ile gösterilen doğrultuda bir menderes yaparak bölgeden uzaklaşmaktadır. Ya da A-A' bölgesinde topoğrafik bir engelle karşılaştığından TA bölgesinde birikmekte ve zamanla çekilmekteydi. Taşkın alanı olarak adlandırılan bu alanda yeşil renkle gösterilen ML sınıfı siltlerin egemen olduğu görülmektedir. Kimi zaman ise A-A' engeli aşılmakta ve ok3 yönünde ovanın günümüzde bile diğer yerlere nazaran daha alçak bölgelerine doğru yayılmaktadır. 2,26 – 3,75 metreleri karakterize eden harita incelendiğinde 1, 2 ve 3 bölgelerinde sellenmeden dolayı kumlanma görülmektedir [67]. 3,26 – 5,25 metre derinlikte Tabaka-1 ve Tabaka-2'deki CH zeminleri yerini CL sınıfı zeminlerine bırakmıştır fakat CH sınıfı zeminler bu bölgede yer yer kendini göstermektedir. Kuzey uçta yoğun bir şekilde kum tabakası belirmiştir. Doğu ve Kuzeydoğu bölgelerinde ML sınıfı zeminler hakimdir. Bu bölgede de CL sınıfı zeminler yer yer bulunmaktadır. Güneydoğu tarafında ve kentin tam ortasında ise kum tabakası belirmiştir. Bu derinlikte göze çarpan kenti yaklaşık olarak güneydoğu-kuzeybatı doğrultusunda ikiye bölen bir kum tabakasının belirmesidir. Bu kumlar daha alt tabakalarda belirgin bir şekilde ortaya çıkacak olan bir akarsu yatağının üst kısımlarının belirtisidir. Söz konusu bu kanal geçmişte Sakarya Nehri' nin bu güzargahtan akmış olduğunun göstergesidir. Bu tabakada gösterilen 4 ve 5 nolu bölgeler daha alttaki bir nehir kanalı dolgusunun üst kısımlarını işaret etmektedir [67].

5,26 – 6,75 metre derinlikte bir kanal şeklinde kum tabakası belirlemektedir. Bu da bu bölgede bir nehir yatağının varlığına işarettir. Bu kum tabakasının bu derinlikte kent merkezinin içinden geçerek güneydoğu - kuzeybatı istikametinde belirdiği söylenebilir. Bu derinlikte de Kuzeydoğu bölgelerinde ML sınıfı zeminler hakimdir ve yer yer CL sınıfı zeminler görülmektedir. Akarsu bu derinlikte kanal malzemesini teşkil eden kum ve iri kum boyutundaki malzemeyi bu kısma depolamıştır. Aynı zamanda 2 nolu bölge olarak gösterilen kısımda da bir nehir kanalının faaliyeti sonucu yığılmış olduğu kumlar belirlemekte, kumların yayılımından bu kısımda etkin olan nehrin güneyden kuzeye doğru akan bir nehir olduğu bununla birlikte 1 nolu kanalla devamlı bir bağlantısı olmadığı söylenebilir. Ancak 2 nolu nehir kolu yüksek debili olduğu zamanlarda ok3 ile gösterilen kısım ile 1 nolu nehir kanalına bağlandığı yorumlanabilir. Bununla birlikte 4 nolu bölgede 1 nolu nehrin küçük bir uzantısının olduğu gözlemlenmiştir [67]. 6,76 – 8,25 metre derinlikte, kuzeydoğu bölgelerinde CL tipi zeminler belirginleşmekte ve yer yer CH tipi zeminler görülmektedir. Bu tabakada kum, kil, silt cinsi zeminler belli bölgelerde yoğun olarak bulunmaktadır. Bu derinliklerde batıda görülen kanalın sürekliliği göze çarpmaktadır. 1 nolu kanal güneyden gelmekte ve bir menderes büklümü yaparak doğuya doğru yönelmektedir. Taşkın anlarında ise ok3 yönüyle gösterilen kanal yardımıyla fazla sularını 1 nolu kanala aktarmaktadır. Bu şekilde bir diğer özellik olarak 1 ve 2 nolu kanallar arasında kalan bölgenin, 2 nolu bölgenin batıyı çevrelediği düşünülürse CH ve CI killerin egemen olduğu bir ada şeklinde kalmış olması açıklanabilir [67]. 8,26 - 9,75 metre derinliklerde, kuzeydoğu bölgelerinde CL sınıfı zeminler hakimdir. Yer yer CH sınıfı zeminler görülmektedir. Batı bölgelerinde kum tabakası iyice belirginleşmiştir ve bu kum tabakasının doğusunda ML sınıfı zeminler görülmektedir. Bu derinliklerde yukarıdaki tabakalarda doğuda beliren kanalın ortadan kalktığı ve bu hattın ancak üstteki kanalın alt tabanını temsil eden bölgesel kumlardan ibaret olduğu ortaya çıkmaktadır (ok1). Bununla birlikte bu seviyede kumların ok3 ile gösterilen doğrultuda sıralanmış olması yeni bir kanalı temsil edecek oluşumun ortaya çıktığını işaret etmektedir [67]. 9,76 - 1,25 metre derinlikte ise batıdaki kanal devamlılığını korumaktadır. Doğudaki hakim CL sınıfı zeminlere ML türü zeminler sokulmakta ve CH türü zeminler varlığını kaybetmektedir. Bu seviyede güneydeki kanal kendini iyice belli etmiş ve kuzeydoğu istikametine yönelmiştir [67].

3.2.1. Adapazarı yeraltı suyu

Adapazarı YASS seviyesi yüzeye yakındır. Kimi bölgelerde 1 ile 2 m arasında değişen seviyelerde bulunmaktadır. Aşırı yağış ve mart aylarında eriyen karlar sayesinde YASS seviyesi yüzeye kadar çıkmaktadır. 1999 yılı öncesi için 60 sondajdan ölçülen ortalama YASS seviyesi 1,56 metre iken Temmuz aylarında ise 2,77 metreye kadar düşmektedir. 2000 yılında ise 488 sondaj verisinden elde edilen YASS seviyesi ortalaması 1,05' e kadar yükselmiştir. 2000 yılı içinde ortalama su seviyesinin en yüksek olduğu ay 0,48 metre ile Mart ayı, en düşük su seviyesi 1,37 metre ile Eylül ve Aralık ayıdır. 2001 yılında ortalama 1,79 metre ve Ağustos ayında minimum 2,20 metredir. 2002 yılında ise ortalama 1,88 metre ve bu yıla ait minimum seviye 2,62 metre olarak yine Ağustos ayıdır [67]. Şekil 3.9.'da 2001 - 2002 yıllarına ait yer altı su seviyeleri verilmiştir. Bu haritalarda yeşil kısımlar yaklaşık 2.00 metre derinliği göstermektedir.



Şekil 3.9. Adapazarı YASS seviyeleri [67]

BÖLÜM 4. UYGULANAN YÖNTEMLER

4.1. Regresyon Analizi

Regresyon analizi, aralarında sebep-sonuç ilişkisi bulunan iki veya daha fazla değişken arasındaki ilişkiyi belirlemek ve bu ilişkiyi kullanarak o konu ile ilgili tahminler ya da kestirimler yapabilmek amacıyla yapılır. Doğada birçok olayda sebep-sonuç ilişkisine rastlamak mümkündür.

Tablo 4.1. Regresyon analizinde sebep - sonuç durumu.

SebeP	Sonuç
Gelir	Harcama
Yaş	Boy
Gübre	Verim
Yem Miktarı	Süt Miktarı
Çalışma Süresi	Alınan Not

Regresyonda değişkenlerin bağımlı değişken (dependent variable: modellenen, tahmin edilen) ve bağımsız değişken(ler) (independent variable: kontrol edilmiş, belirleyici, açıklayıcı) olarak iki gruba ayrılması bir zorunluluktur. Bağımlı değişken, bağımsız değişken(ler) tarafından açıklanmaya çalışılan değişkendir. Regresyonda genellikle bağımlı değişken Y ve bağımsız değişken(ler) de X ile gösterilir. Regresyon analizi tıp, biyoloji, mühendislik, ziraat, ekonomi, işletme, finans, davranış bilimleri vb. gibi çok farklı bilim dallarında sıkça kullanılmaktadır.

4.1.1. Basit doğrusal regresyon analizi

Basit doğrusal regresyon analizi, bağımlı değişken ile bağımsız değişkenler arasındaki ilişkinin ve bağımsız değişkenlerin bağımlı değişken üzerindeki etkilerinin belirlenmesinde kullanılır. Basit doğrusal regresyon analizi değişkenler arasındaki ilişkinin yapısı ve derecesi ile ilgilenmektedir. Basit doğrusal regresyon analizinde bir bağımsız değişken bulunur ve model (4.1)'deki gibi kurulur.

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X + \varepsilon \quad (4.1)$$

(4.1) modeline basit doğrusal regresyon modeli adı verilir. Modelde yer alan simgelerin anlamları aşağıdaki gibi tanımlanabilir:

Y : Bağımlı (sonuç) değişken olup belli bir hataya sahip olduğu varsayılır.

X : Bağımsız (sebebi) değişkeni olup hatasız ölçüldüğü varsayılır.

β_0 : Sabit olup $X=0$ olduğunda Y'nin aldığı değerdir. Doğrunun y-eksenini kestiği noktadır.

β_1 : Doğrunun eğimi veya regresyon katsayısıdır. X'in kendi birimi cinsinden 1 birim değişmesine karşılık Y'de kendi birimi cinsinden meydana gelecek değişme miktarını ifade eder.

ε : Şansa bağlı hata değeridir. ε tesadüfi hata terimi olup ortalaması sıfır varyansı bilinmeyen σ^2 'ye sahip olan normal dağılım gösterdiği varsayılır.

Bu durum bir hata değerinin diğer bir hata değerinden etkilenmediği anlamına gelmektedir. Bu varsayım parametre tahminleri için değil katsayıların önem kontrolleri için gereklidir. ε 'nin hata terimi olarak ifade edilmesinin nedeni, X ve Y arasında bulunduğu varsayılan tam doğrusal ilişkiyi bozduğu düşüncesidir. Hata terimi pozitif ya da negatif değerler alabilen ve değerleri kesin olarak bilinmeyen rassal bir değişkendir [68, 69]. Hata terimi, Y bağımlı değişkenini etkileyen başka değişkenlerin modele alınmaması, insanların rassal davranışları, modelin yanlış seçilmesi, homojen olmayan bireylerden bilgi edinmek ve ölçme yanlışlarından dolayı ortaya çıkmaktadır [69, 70, 71].

(2.1) modelindeki β_0 , β_1 ve ε bilinmeyenlerdir. Burada ε her bir Y değeri için değişmektedir. Ancak β_0 ve β_1 sabit kalır. Bu bilinmeyenleri gözlemlerin tamamını bilmeksizin ortaya çıkarmak mümkün olmasa da, gözlemleri kullanarak β_0' ve β_1' tahmin edilebilir.

$$Y' = \beta_0' + \beta_1'X \quad (4.2)$$

(4.2)'de Y' verilen X değerine karşılık Y bağımlı değişkeninin alabileceği ortalama değeri tahmin eder. Y bağımlı değişkeni bir rastgele değişkendir, X bağımsız değişkeni ise bir rastgele değişken değildir. Deney tekrar edildiğinde X bağımsız değişkenine ait değerler sabit tutulabilir. Bağımsız değişkenlere ait gözlemlerin araştırmacı tarafından kontrol edilebildiği veya ihmal edilebilir en küçük bir hata ile ölçüldüğü varsayılır. Dolayısıyla X açıklayıcı değişkeninin her bir değeri için Y 'nin bir olasılık dağılımı mevcuttur. Bu dağılımın ortalaması sıfır ve varyansı σ^2 dir. Y 'nin varyansı X 'e bağlı olmamasına karşılık ortalaması X 'in bir doğrusal fonksiyonudur. Hata terimi ε 'nun birbirinden bağımsız olduğu varsayımı yapıldığı için bağımlı değişken Y için de bu özellik geçerli olacaktır. Yani Y 'ye ait gözlemler arasında da ilişki yoktur.

β_0 ve β_1 parametrelerine regresyon katsayıları denilir. B_1 eğim parametresi X değişkeninde bir birimlik değişime karşılık Y değişkenine ait dağılımın ortalamasında meydana getireceği değişimdir. β_0 kesişim parametresidir. β_0 ve β_1 parametreleri en küçük kareler metodu ile aşağıdaki gibi tahmin edilebilirler.

$$\beta_0' = \bar{Y} - \beta_1'\bar{X}, \quad \beta_1' = \frac{\sum(Y_i - \bar{Y})(X_i - \bar{X})}{\sum(X_i - \bar{X})^2} \quad (4.3)$$

Y bağımlı değişkenin aldığı değerler hata terimine bağlı olduğundan Y 'nin dağılım biçimi ε_i 'nin dağılım biçimiyle aynıdır ve bu dağılım normaldir. X bağımsız değişkeninin değerleri bir değişmezler kümesi olduklarından Y değişkeninin dağılım biçimini etkilemezler. Basit doğrusal regresyon modelinin ve hata terimlerinin varsayımları aşağıdaki gibidir [69, 72, 71, 73].

Basit doğrusal regresyon modelinin varsayımları

- Bağımsız değişkenin değerleri sabit kabul edilir. Bağımlı değişkenin değerleri ise rastgeledir.
- Değişkenler hatasız ölçülmüştür.
- Her X_i değeri için; $.Y_i$ değerleri birbirinden bağımsızdır, $.Y_i$ gözlemlerinin dağılımı normaldir.
- Bağımlı ve bağımsız değişkenler arasındaki ilişki doğrusaldır.
- Gözlem sayısı değişken sayısından çok olmalıdır.

Hata terimi (ε_i) varsayımları

- Hataların beklenen değeri sıfırdır.
- ε 'ların olasılık dağılımının varyansı sabittir.
- Hata değerleri birbirinden bağımsızdır.
- Hataların dağılımı normaldir.
- Hatalar ile bağımlı değişken arasında ilişki yoktur.
- Hatalar ile bağımsız değişkenler birbirinden bağımsızdır.

Bağımsız değişken X 'in regresyon modeli ile bağımlı değişken Y 'yi ne kadar açıklayabildiğini görmek için R^2 (belirtme katsayısı, determinasyon katsayısı) kullanılır. R^2 örneğin açıklanabilen değişkenliğin toplam değişkenlik içindeki oranı olarak tanımlanır. R^2 değeri verilerdeki değişkenliğin açıklanmasında regresyon denkleminin başarısının bir ölçüsü olarak kullanılır. Regresyon modelinin performansını ifade eden R^2 , karar katsayısı ile ölçülür.

$$R^2 = \frac{\Sigma(Y'_1 - \bar{Y})^2}{\Sigma(Y_i - \bar{Y})^2} = \frac{RKT}{GKT} \quad (4.4)$$

RKT; Regresyon kareler toplamı

GKT; Genel kareler toplamı

R^2 , $[0,1]$ arasında değerler alır. R^2 , 1'e ne kadar yakınsa, regresyon o kadar anlamlıdır, belirleyicidir. Bu konuda bilimsel bir karar verebilmek için hipotez testi yapılır.

Belirlilik katsayısı bağımsız değişkenin bağımlı değişkenin davranışını açıklamadaki başarı ölçüsünü veren tanımlayıcı istatistiktir.

4.1.2. Çoklu doğrusal regresyon analizi

Basit doğrusal regresyon analizinde Y bağımlı değişkenini etkileyen tek değişken vardır. Ancak bazı problemlerde, Y bağımlı değişkenini etkileyen birden fazla bağımsız değişkenle karşılaşılabilir. Bu tür problemlerde, bağımlı değişken ile bağımsız değişkenler arasındaki ilişkiyi belirlemek için çoklu doğrusal regresyon analizi kullanılır. Bağımlı değişken üzerinde birden fazla bağımsız değişkenin etkisi olabilir. Örneğin bir ürünün verim miktarı gübre, sıcaklık, su, toprak türü gibi değişkenlere bağlı olabilir. Çoklu doğrusal regresyon analizi ile bağımsız değişkenlerin hangisi yada hangilerinin bağımlı değişken üzerinde önemli etkiye sahip olduğu incelenir. İstatistikte çoklu doğrusal regresyon modeli matematiksel olarak (4.5)'deki gibi ifade edilir.

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 + \beta_2 + \dots + \beta_p X_p + \varepsilon \quad (4.5)$$

Burada Y bağımlı (açıklanan) değişken ve X'ler bağımsız (açıklayıcı) değişkenlerdir. Değişken sayısı p ve parametre değerleri β_j 'dir ($j=1,2,\dots,p$). Çoklu doğrusal regresyon modeli matris gösterimi ile ifade edilebilir.

$$Y = \begin{bmatrix} Y_1 \\ Y_2 \\ \vdots \\ Y_n \end{bmatrix}_{n \times 1}, X = \begin{bmatrix} 1 & X_{11} & X_{21} & \dots & X_{p1} \\ 1 & X_{12} & X_{22} & \dots & X_{p2} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ 1 & X_{1n} & X_{2n} & \dots & X_{pn} \end{bmatrix}_{n \times (p+1)}, \beta = \begin{bmatrix} \beta_0 \\ \beta_1 \\ \vdots \\ \beta_n \end{bmatrix}_{(p+1) \times 1}, \varepsilon = \begin{bmatrix} \varepsilon_0 \\ \varepsilon_1 \\ \vdots \\ \varepsilon_n \end{bmatrix}_{n \times 1}$$

$$Y = X\beta + \varepsilon \quad (4.6)$$

(4.6) eşitliğinde ε ; ($n \times 1$) boyutlu bir hata vektörüdür. (4.6) modelinde modelin parametreleri olan β 'nin tahminini bulmak için en küçük kareler (EKK) metodu

kullanılır. Burada amaç artık kareler toplamını (AKT) minimum yapan β vektörünü bulmaktır [74].

Çoklu doğrusal regresyon modelinin varsayımları aşağıdaki gibidir [69, 72, 71, 73].

- a. Bağımlı değişken bir rastgele bir değişkendir ve normal dağılım göstermektedir.
- b. Tahmin hataları rastgeledir, birbiri ile ilişki göstermezler.
- c. Bağımsız değişkenler rastgele değişkenler değildir. Yani bağımsız değişkenlerin aldıkları değerler sabit veya önceden belirlenmiş yada isteğe bağlı olarak seçilmiş değerler olduğu varsayılır.
- d. Hatalar birbirinden bağımsızdır(otokorelasyon yoktur).
- e. Her bağımsız değişkenin değerlerine ait olan bağımlı değişken değerlerinin alt setleri varyansları birbirine eşittir(eşit varyanslılık=homoscedasticity).
- f. Bağımsız değişkenler arasında basit doğrusal ilişkilerin olmaması gerekir. Bağımsız değişkenler arasındaki basit doğrusal korelasyon katsayılarının 0 veya 0'a çok yakın olması şartı şeklinde de açıklanabilen bu varsayıma, istatistikte "Çoklu Doğrusal Bağlantı" (Multicollinearity) olmama durumu adı verilmektedir.
- g. Bağımsız değişkenler ile hata terimi arasında ilişki yoktur.
- h. Hipotez testlerini yapabilmek ve güven aralıklarını oluşturabilmek için hataların normal dağılıma sahip olduğu varsayılır.

Çoklu doğrusal regresyon analizinde bağımlı değişkendeki değişimin ne kadarının açıklayıcı değişkenler tarafından açıklandığı belirtme katsayısı R^2 ile belirlenir. Bütün gözlemler regresyon doğrusu üzerinde yer alırsa $R^2 = 1$, eğer bağımlı ve bağımsız değişken arasında hiç doğrusal ilişki yoksa $R^2 = 0$ olur. R^2 modelin uyum iyiliği ölçütü olup, $R^2 = 0$ olması değişkenler arasında ilişki olmaması anlamına gelmez. Yani değişkenler arasında doğrusal ilişki olmadığını gösterir.

$$R^2 = \frac{RKT}{AKT} = \frac{\beta' X' Y - n \bar{Y}^2}{Y' Y - \beta' Y' Y} \quad (4.7)$$

RKT; Regresyon kareler toplamı. AKT; Artık kareler toplamı

4.2. Yapay Zeka

4.2.1. Yapay zekanın tanımı

Yapay zeka, insan zekasına özgü olan öğrenme, algılama, karar verme, fikir yürütme, düşünme, çıkarsama yapma, genelleme, sorun çözme gibi bilişsel fonksiyonları veya davranışları göstermesi beklenen yapay bir işletim sistemidir. Yapay zekada, insanın düşünme yöntemleri, beynin çalışma modeli veya doğanın biyolojik seçim metodu analiz edilerek, bunların benzeri yapay yönergeleri geliştirilmeye çalışılmaktadır. Yapay zeka yöntemlerinin başlıcaları; Yapay Sinir Ağları, Uzman Sistemler (Expert Systems), Bulanık Mantık (Fuzzy Logic), Genetik Algoritmalar (Genetic Algorithms), ANFIS (Adaptive Neuro-Fuzzy Inference Systems) ve Veri Madenciliğidir (Data Mining).

Yapay Zeka'nın Başlıca Uygulama Alanları;

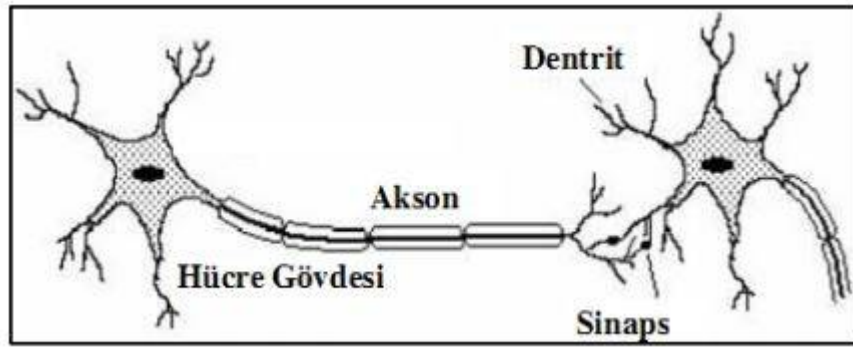
- a. Robotik
- b. Kestirim
- c. Bilgisayar görmesi ve görüntü işleme (Image Processing & Computer Vision)
- d. Ses Tanıma (Speech Recognition)
- e. Doğal dil anlama (Natural Language Understanding)
- f. Oyunlar (Game Playing)
- g. Yapay yaşam (Artificial Life)
- h. Kontrol sistemleri
- ı. Sınıflandırma
- j. Optimizasyon
- k. Planlama

Bu çalışmada, yapay zekanın en fazla kullanılan, bilgi birikiminin oldukça fazla olduğu ve kestirim problemlerinde de sıkça uygulanan YSA yöntemi kullanılmıştır.

YSA, insan beyninin bilgi işleme yeteneğinden yola çıkılarak geliştirilen bir bilgi işleme yöntemidir. Bu yöntem, insan beyninin öğrenme yolu ile yeni bilgiler

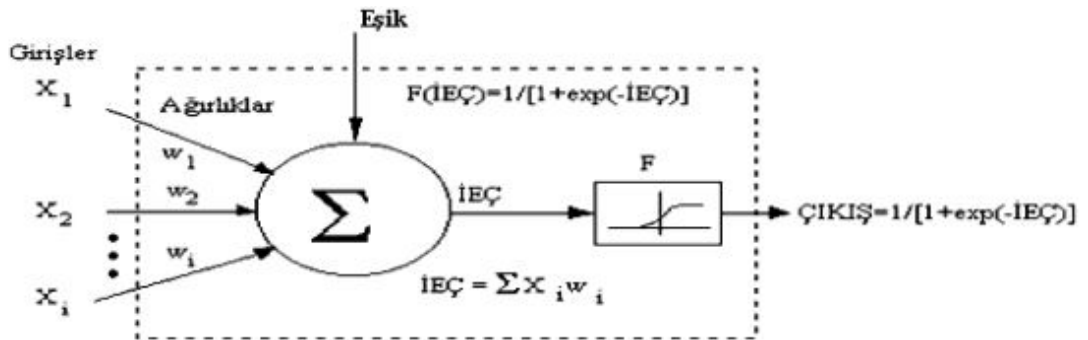
üretebilme ve keşfedebilme gibi özelliklerini taklit etmektedir. YSA'ya problemlerin çözümünde öğrenme, hatırlama, genelleme yapma gibi yeteneklerin kazandırılması amaçlanmaktadır [75; 76].

İnsan beyni, sinir hücreleri (nöron) ve bunlar arasındaki bağlantılardan oluşan karmaşık bir sistemdir. Bu yapısı itibarıyla insan beyni bir ağa benzetilmektedir. Biyolojik nöron genel olarak hücre gövdesi, akson, dentrit ve sinapstan oluşmaktadır (Şekil 4.1).



Şekil 4.1. Biyolojik nöronun yapısı

Nöronlar, ağdaki bağlantılar sayesinde birbirleriyle iletişim kurmaktadır. YSA yöntemi, insan beyninin sinir sistemi mimarisinden esinlenerek geliştirilmiştir. Günümüzde geliştirilen YSA modellerinde, biyolojik sinir sisteminin çalışma prensiplerinden ve mühendislik bilimlerinden faydalanılmıştır. Nöronlar, çıktının hesaplanmasında kullanılan YSA mimarisinin temel bileşenidir. Şekil 4.2'de en temel nöron yapısı görülmektedir.



Şekil 4.2. Bir nöronun YSA modeli (İEÇ; İşlem Elemanının Çıkışı)

Burada $x_1, x_2, \dots, x_i$ nöron girişleridir. Her bir nöron girişi toplama işlemine girmeden önce $w_1, w_2, \dots, w_i$ ağırlıkları ile çarpılmaktadır (denklem 4.8).

$$\dot{IE\check{C}} = x_1w_1 + x_2w_2 + \dots + x_iw_i = \sum_{j=1}^i x_jw_j \quad (4.8)$$

Girişler ilgili ağırlıklar ile çarpılır ve elde edilen değerlerin toplanmasıyla İşlemci Eleman Çıkışı (İEÇ) hesaplanır. Hesaplanan İEÇ değeri, aktivasyon fonksiyonundan geçirilerek çıkış değeri elde edilmektedir. Aktivasyon fonksiyonları, YSA'da nöronun çıkış genliğini, istenilen değerler arasında sınırlamaktadır.

4.2.2. Yapay sinir ağlarının kısa tarihçesi

İlk yapay nöron modeli, nörobiyolog McCulloch ve istatistikçi Pitts tarafından 1943 yılında geliştirilmiştir. Geliştirilen model ile mantıksal ifadeleri formülize etmenin mümkün olduğu gösterilmiştir. YSA'da ilk ve en basit öğrenme kuralı Hebb tarafından 1949 yılında geliştirilmiştir. Hebbian öğrenme kuralı olarak adlandırılan bu kural birçok öğrenme kuralının temelini oluşturmaktadır. Rosenblatt, (1958) YSA tarihinde oldukça önemi olan perceptron modelini geliştirmiştir. Perceptron modeli, ÇKA'nın temelini oluşturmaktadır [77].

Widorw ve Hoff (1960) YSA'da en küçük ortalama karesel öğrenme algoritmasını geliştirerek, ADALINE (ADaptive LInear NEuron) modelini ortaya atmışlardır. 1970'li yıllarda geliştirilen MADALINE modelleri bu çalışmalardan esinlenerek yapılmıştır. Minsky ve Papert 1969 yılında perceptron modelinin lineer olmayan problemlerde çalışmadığını iddia ederek, perceptronun XOR problemine çözüm üretmediğini göstermişlerdir. YSA konusundaki çalışmalar XOR probleminin çözümüne kadar oldukça yavaş ilerlemiştir. Kohonen (1982) danışmansız, kendi kendine öğrenen özellik haritalarını (Self Organizing Map - SOM) geliştirmiştir. Rumelhart, Hilton ve Williams tarafından 1986 yılında ÇKA'nın geliştirilmesi, YSA'nın tarihsel gelişimine oldukça önemli bir katkı sağlamıştır. YSA, XOR probleminin çözümünün ÇKA tarafından yapılmasıyla kendini ispatlamıştır.

Rumelhart ileri beslemeli modellerde geriye yayılım (Back propagation) algoritması geliştirmiştir [78, 79, 80]

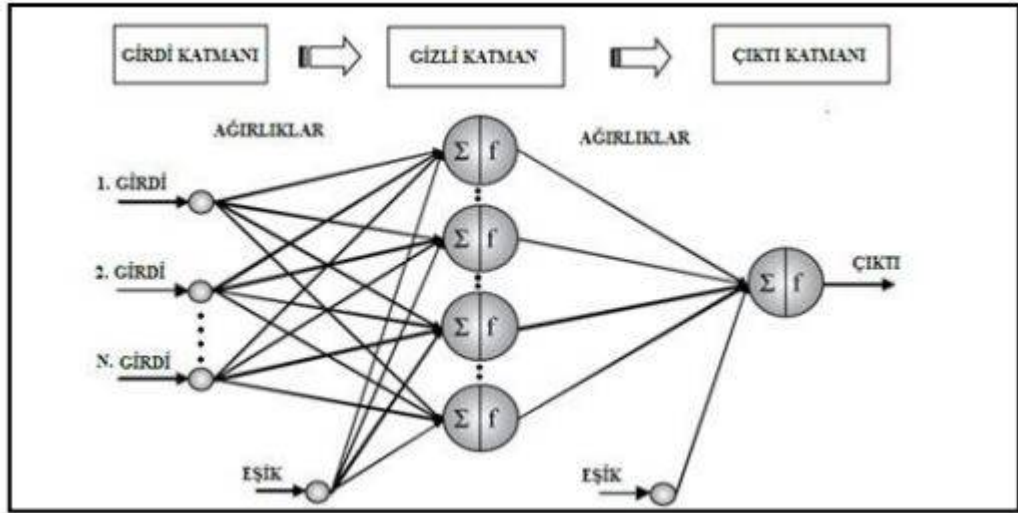
4.2.3. Yapay sinir ağlarının bileşenleri

Nöronların bir grup halinde çalışarak işlem gördükleri yapı, ağ (network) olarak adlandırılır. Nöronların bağlantılar ile bir araya gelmeleri YSA'yı oluşturur. YSA katmanlı bir yapıya sahip olup tek ya da çok katmanlı olabilir. Bu katmanlar nöronların aynı doğrultu üzerinde bir araya gelmeleriyle oluşmaktadır.

Girdi Katmanı (Input layer); Dış dünyadan gelen bilgileri gizli katmana taşırlar. YSA'larda girdi katmanı bir tane olup, girdi sayısı kullanıcı tarafından probleme göre belirlenir.

Gizli Katman (Hidden layer); Girdi katmanından gelen bilgileri işlem elemanlarında (nöron) işleyerek, çıktı katmanına ileten katmandır. Gizli katman sayısına ve katmandaki nöron sayısına deneme yanılma yoluyla karar verilir. Bu çalışmada tek gizli katmanlı yapı kullanılmıştır. Bu katmandaki nöron sayısı ise 3, 6, 9, 12, 15, 20 alınarak denemeler yapılmıştır.

Çıktı Katmanı (Output layer); Bu katmanda, gizli katmanlardan gelen çıktı değerleri işlenmektedir. Bu katmanın çıkışları ile gerçek çıktı değerleri arasındaki fark (hata) belirlenir. Bu hata miktarı iteratif olarak eğitim algoritması ile belirlenen değere kadar azaltılmaya çalışılır. Sonuç olarak, üretilen çıktı dış dünyaya gönderilmektedir. Şekil 4.3'de girdi, gizli ve çıktı katmanları ve nöronlar şematik olarak görülmektedir. Ayrıca şekilde YSA'nın bileşenleri de görülmektedir. Bunlar; girişler, ağırlıklar, eşik, toplam fonksiyonu (Σ), aktivasyon fonksiyonu (f) ve çıktıdır.



Şekil 4.3. Çok katmanlı ağ yapısı

Eşik (Bias); Öğrenmeyi güçlendirmek için kullanılmaktadır. Bias'ın amacı, daha iyi öğrenmeyi sağlamak amacıyla fonksiyonun orijini dengeye getirmektir.

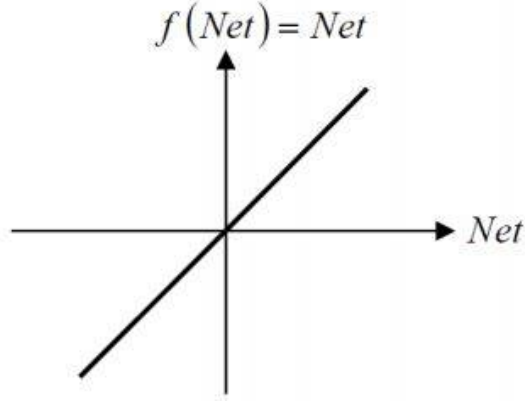
Birleştirme (Toplama) fonksiyonu; Hücreye gelen girdileri ağırlık değerleri ile çarparak ve bütün çarpımları toplayarak, o hücrenin net girdisinin hesaplanmasında kullanılır.

Ağırlıklar; Hücreler arasındaki bağlantıların sayısal değerlerini göstermektedir. Hücreye gelen bilginin değerini ve etkisini ifade eder. YSA'da her iterasyonda ağırlıklar değiştirilmekte ve optimum sonucu veren ağırlıklar tespit edilmeye çalışılmaktadır.

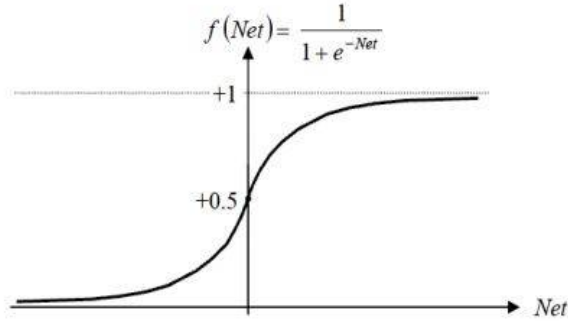
Çıktı; Çıkış katmanındaki aktivasyon fonksiyonları tarafından belirlenen değerler olup dış dünyaya gönderilirler. Problemin çözümünü veren son süreç elemanıdır.

Aktivasyon Fonksiyonu; Aktivasyon veya transfer fonksiyonları öğrenme eğrisi olarak isimlendirilmekte olup hücreye gelen net girdiye karşılık hücrenin üreteceği çıktıyı hesaplamaktadır. Aktivasyon fonksiyonları ile nöronun çıkış genliği istenilen değerler arasında sınırlanır (genellikle $[0,1]$ veya $[-1, 1]$). Aktivasyon fonksiyonlarının türevlerinin alınabilir olması ve süreklilik göstermesi gerekmektedir. Problemin

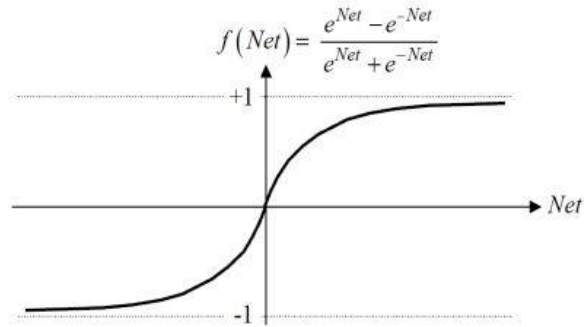
çözümünde, en uygun aktivasyon fonksiyonu deneme yanılma yoluyla bulunmaktadır. Çalışmalarda en çok kullanılan aktivasyon fonksiyonları; lineer aktivasyon fonksiyonu (Şekil 4.4), sigmoid aktivasyon fonksiyonu (Şekil 4.5) ve Tan-sigmoid aktivasyon fonksiyonudur (Şekil 4.6). Bu çalışmada sigmoid aktivasyon fonksiyonu kullanılmıştır.



Şekil 4.4. Lineer aktivasyon fonksiyonu



Şekil 4.5. Sigmoid aktivasyon fonksiyonu



Şekil 4.6. Tan-sigmoid aktivasyon fonksiyonu

4.2.4. Yapay sinir ağlarının sınıflandırılması

YSA genel olarak yapılarına ve öğrenme algoritmalarına göre sınıflandırılmaktadır.

YSA'nın yapılarına göre sınıflandırılması

- a. İleri beslemeli ağlar
- b. Geri beslemeli ağlar

YSA'nın öğrenme algoritmalarına göre sınıflandırılması

- a. Danışmanlı öğrenme
- b. Danışmansız öğrenme
- c. Takviyeli öğrenme

Yapılarına göre sınıflandırma;

Yapılarına göre yapılan sınıflandırmada bilgilerin akış yönüne bakılmaktadır. Genel olarak, ileri beslemeli ve geri beslemeli olmak üzere ikiye ayrılmaktadır.

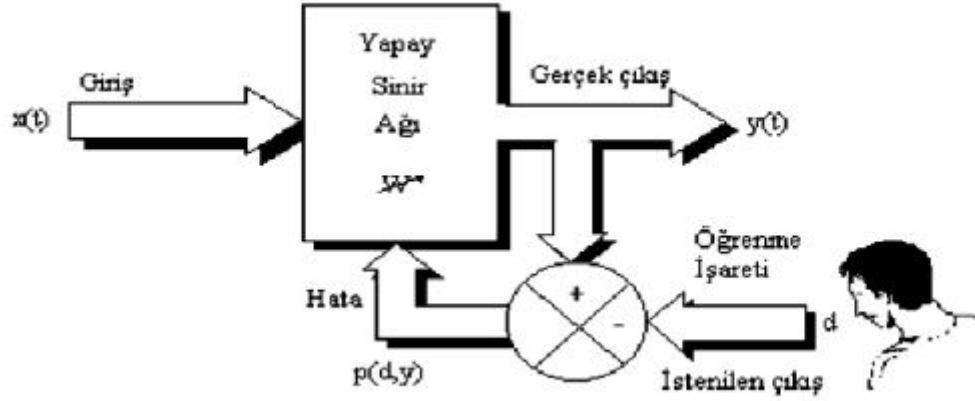
İleri Beslemeli Ağlar; Bilgi akışı giriş katmanından başlar ve çıkış katmanına doğru gerçekleşir. Bilgi işleme tek yönlüdür. Çıkış değerleri, istenen çıkış değerleri ile karşılaştırılır ve hata miktarına göre ağ ağırlıkları güncellenir. Bu tip ağlara örnek olarak LVQ (Learning Vector Quantization) ve çok katmanlı perceptron (Multi Layer Perceptron, MLP) gösterilebilir [81].

Geri Beslemeli Ağlar; Bu yapıda, hem girişten çıkışa hem de çıkıştan önceki katmanlara doğru bilgi akışı olmaktadır. Bu tip ağlara örnek olarak Elman, Jordan ve Hopfield ağları gösterilebilir.

Öğrenme algoritmalarına göre sınıflandırma;

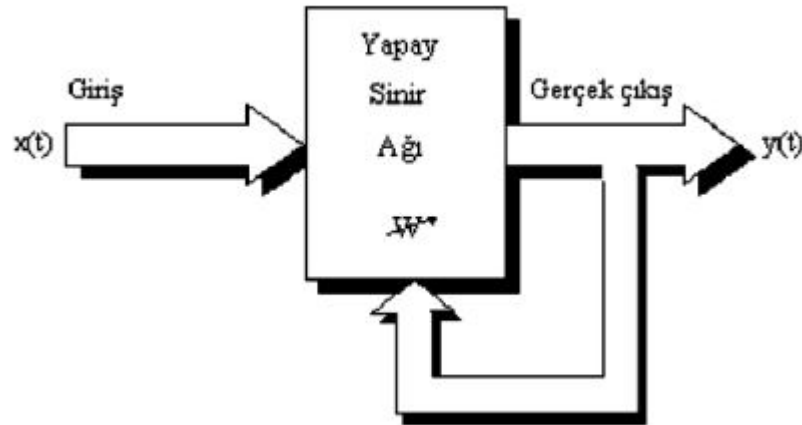
YSA yönteminde, giriş ve çıkış verileri kullanılarak, modellenecek sistem için en küçük hata miktarı ile çıkış elde edilmesi amacıyla, ağırlıkların tespit edilmesi sürecine öğrenme diyebiliriz. Öğrenme stratejilerine göre YSA yöntemini genel olarak üçe ayırabiliriz.

Danışmanlı öğrenme (Supervised Learning); Bu öğrenme algoritmasında ağı hem giriş değerleri hem de bu girişe karşılık üretmesi gereken çıkış değerleri verilmektedir. İstenen çıkış ile gerçek değer arasındaki hata miktarına göre ağırlıklar en uygun çıktı değerlerini elde etmek için bir öğrenme algoritmasıyla düzenlenir. Şekil 4.7’de danışmanlı öğrenme akış şeması görülmektedir.



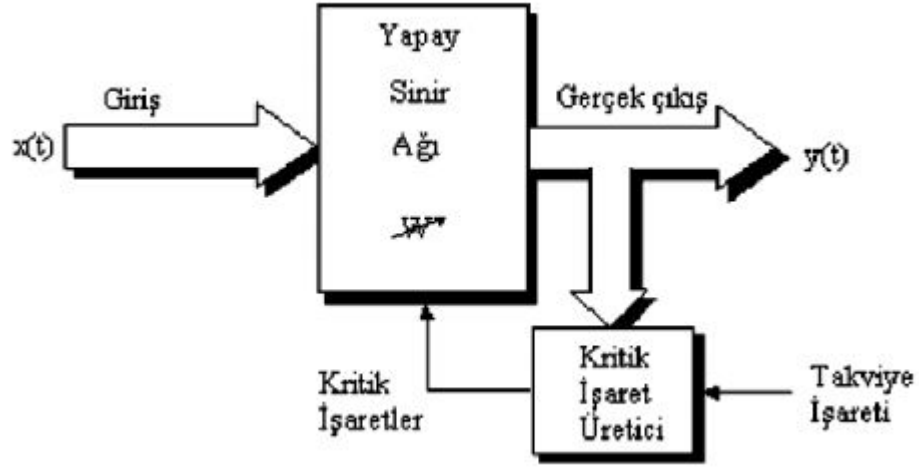
Şekil 4.7. Danışmanlı öğrenme yapısı [82].

Danışmansız öğrenme (Unsupervised Learning); Bu öğrenme algoritmasında ağı sadece giriş değerleri verilmekte ve beklenen çıkış değerleri olmadan çıktılar genellikle istatistiksel olarak hesaplanmaktadır. Danışmansız öğrenme algoritmasında istenilen çıkış değerlerinin verilmesine gerek yoktur. Şekil 4.8’de danışmansız öğrenme akış şeması görülmektedir.



Şekil 4.8. Danışmansız öğrenme yapısı [83].

Takviyeli öğrenme (Reinforcement Learning); Bu öğrenme algoritmasında, ağa verilen girişe karşılık ağın ürettiği çıkış değerleri ile gerçek çıkış arasındaki hata miktarı hesaplanarak, önceden belirlenen bir kriter ile değerlendirilmekte ve değerlendirme sonucuna göre ağırlıklar güncellenmektedir. Şekil 4.9'da takviyeli öğrenme akış şeması görülmektedir.



Şekil 4.9. Takviyeli öğrenme yapısı [83].

4.2.5. Yapay sinir ağlarında öğrenme kuralları

YSA öğrenme kurallarına göre genel olarak, Hebb, Hopfield, Delta ve Kohonen olmak üzere dört kısımda incelenebilir.

Hebb kuralı; 1949 yılında Hebb tarafından geliştirilmiştir. Diğer öğrenme kurallarının temelini oluşturan ve bilinen en eski öğrenme kuralıdır. Bu kurala göre eğer bir nöron diğer bir nörondan giriş alıyorsa ve her iki nöron da aktif ise (matematiksel olarak aynı işarete sahipse), nöronlar arasındaki ağırlıklar kuvvetlendirilmelidir düşüncesi vardır [76].

Hopfield kuralı; Kuvvetlendirme ve zayıflatma dışında Hebb kuralına benzemektedir. Kuralda, ağ bağlantılarının kuvvetlendirme veya zayıflatma derecesinin ne kadar olacağı belirlenmektedir.

Kohonen kuralı; 1990 yılında Kohonen tarafından geliştirilen bu kuralda, nöronlar öğrenmek için yarışır. Kazanan nöronun ağırlıkları güncellenir. En büyük çıkış değerine sahip nöron kazanmaktadır ve çevresindeki nöronlara karşı daha kuvvetli hale gelmektedir. Bu öğrenme kuralında hedef çıkışa ihtiyaç yoktur ve danışmansız bir öğrenme metodudur.

Delta Kuralı; En çok kullanılan öğrenme algoritmalarından biri olup Hebb kuralının gelişmiş halidir. Gerçek çıkış ile istenilen çıkış değerlerinin arasındaki farkı azaltmak için yapay sinir ağının elemanlarının bağlantılarına yönelik ağırlık değerlerinin sürekli güncellenmesi ilkesine dayanmaktadır. Bu kuralda ağ tarafından üretilen çıktı ile istenen çıktı arasındaki hatanın karelerinin ortalamasını minimize etmek amaçlanmaktadır. Hata miktarı bir katmandan önceki katmana geri yayılarak azaltılmaktadır. Bu işlem çıkış katmanından giriş katmanına kadar devam etmektedir. Bu kural geri yayılım olarak adlandırılır.

4.2.6. Çok katmanlı algılayıcı

Çok katmanlı algılayıcılar, mühendislik uygulamalarında en fazla kullanılan sinir ağı modellerinden birisidir. ÇKA giriş, çıkış ve en az bir gizli katmandan oluşmaktadır. Gerçek hayatta birçok problem doğrusal olmayan bir yapıya sahiptir. Doğrusal olmayan bu problemlerin çözümünde ÇKA modeli en sık kullanılan YSA modelidir.

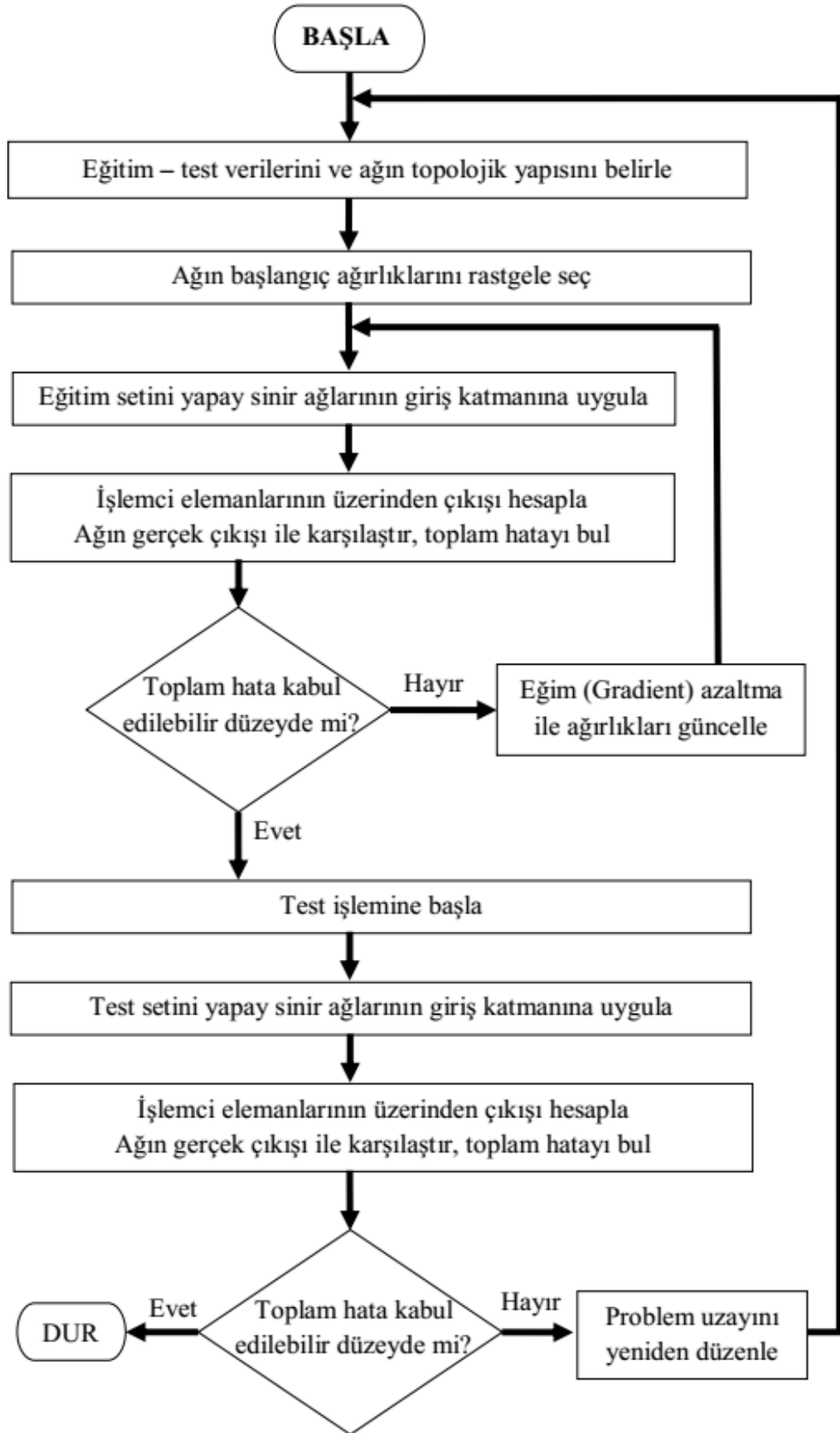
ÇKA'da girdi katmanında herhangi bir bilgi işleme olmamaktadır. Girdi katmanında bulunan her bir işlem elemanı bir sonraki gizli katmanda yer alan işlem elemanlarıyla bağlantılı durumdadır. Gizli katmanda, girdi katmanından gelen bilgiler işlenmekte ve işlenen bilgiler çıkış katmanına gönderilmektedir. Birden fazla gizli katman kullanılabilir. ÇKA'ya eğitim sırasında girdi değerleri ve girdi değerlerine karşılık üretilmesi gereken çıktı değerleri gösterilmektedir. Bu yapısı sebebiyle ÇKA, danışmanlı öğrenme prensibine göre çalışmaktadır. ÇKA'da öğrenme kuralı, en küçük kareler yöntemine dayalı delta öğrenme kuralının genelleştirilmiş şeklidir. Genelleştirilmiş delta kuralı da denilen bu öğrenme kuralında işlemler iki aşamadan oluşmaktadır. Birinci aşama, ağın çıktısının hesaplandığı ileriye doğru hesaplama

adımı, ikinci aşama ise ağırlıkların değiştirildiği geriye doğru hesaplama adımıdır. Çok katmanlı ileri beslemeli sinir ağları için geri yayılım akışı şematik olarak Şekil 4.10'de görülmektedir.

ÇKA ağlarının çalışma adımları aşağıdaki gibidir;

- a. Örneklerin toplanması
- b. Ağın topolojik yapısının belirlenmesi
- c. Öğrenme parametrelerinin belirlenmesi
- d. Ağırlıkların başlangıç değerlerinin atanması
- e. Öğrenme setinden örneklerin seçilmesi ve ağa gösterilmesi
- f. Öğrenme sırasında ileri hesaplamaların yapılması
- g. Gerçekleşen çıktının beklenen çıktı ile karşılaştırılması
- h. Ağırlıkların değiştirilmesi

Yukarıdaki adımlarla gerçekleşen çıktılar ile istenen çıktılar arasındaki hatalar kabul edilir düzeye gelinceye kadar yani ağın öğrenmesi tamamlanıncaya kadar devam edilmektedir. Ağın öğrenme işleminin tamamlanması için bir durdurma kriterinin olması gerekir. Durdurma kriteri genellikle hatanın belirlenen bir düzeyin altına düşmesi olarak tanımlanmaktadır [76].



Şekil 4.10. Geri yayımlı çok katmanlı algılayıcılarda çalışma prosedürü

4.2.7. Levenberg - marquardt algoritması

Levenberg-Marquardt algoritması temel olarak maksimum komşuluk fikrine dayalı olup, bir en küçük kareler hesaplama algoritmasıdır. Gauss-Newton ve SteepestDescent (Geri Yayılım) algoritmalarının en iyi özelliklerinden oluşmakta ve kısıtlamalarını ortadan kaldırmaktadır. Bu algoritmada, bağlantı ağırlıklarının hesaplanmasında Hessian matrisi kullanılmaktadır (denklem 4.4)

$$H(W) = J^T(W)J(W) + \mu I \quad (4.9)$$

Burada $H(W)$ Hessian matrisi, $J(W)$ Jacobian matrisi, I birim matrisi ve μ ise küçük bir sabit sayıyı göstermektedir. Gauss-Newton metodunda Hessian matrisinin tersinin hesaplanmasında karşılaşılan problem Levenberg-Marquardt algoritmasında Hessian matrisine μ sabitinin eklenmesiyle çözülmüştür. Ağırlıkların güncellenmesi Gauss-Newton metodundaki ufak bir değişikliklikle denklem 4.5 ile hesaplanabilmektedir.

$$\Delta W = -\varepsilon^T(W)j(W)(j^T(W)j(W) + \mu I)^{-1} \quad (4.10)$$

Bu algoritmanın çalışması aşağıdaki gibi özetlenebilir ;

- a. Performans fonksiyonu hesaplanır
- b. Küçük bir değeriyle başlanır ($\mu = 0,001$)
- c. ΔW hesaplanarak, performans fonksiyonunun bir sonraki değeri hesaplanır
- d. Performans fonksiyonunun bir sonraki değeri, şimdiki değerinden büyükse μ artırılır
- e. Performans fonksiyonunun bir sonraki değeri, şimdiki değerinden küçükse μ azaltılır
- f. Ağırlıklar güncellenir ve c adımına gidilir.

İlk olarak ağırlıklara başlangıç değerleri atanmaktadır. İstenen çıktı ile gerçek çıktı arasındaki farkın kareleri toplanmaktadır. Ağırlık vektörü için (a)'dan (e)'ye kadar Levenberg-Marquardt metodu adımları uygulanır [83].

4.2.8. Yapay sinir ağlarının avantaj ve dezavantajları

YSA yönteminin avantaj ve dezavantajları Elmas ve Öztemel'e dayanarak aşağıdaki gibi özetlenebilir [84, 85]

YSA'nın Avantajları;

- a. Bir veritabanı kullanılmaz ve bilgileri hem geleneksel programlardan hem de yapay zeka teknolojilerinden farklı ve hızlı bir şekilde işleyerek ağın üzerinde saklar.
- b. Doğrusal olmayan problemlerin çözümünde kullanılabilirler.
- c. Matematiksel modellenmesi yapılamayan karmaşık problemleri çözebilirler.
- d. Bilgiyi paralel olarak işleyebilmekte ve yeni durumlara, ortamlara uyum sağlayabilmektedirler.
- e. Daha önce görülmemiş örnekler hakkında bilgi üretebilirler.
- f. Kendi kendine öğrenebilme ve organize etme yetenekleri vardır.
- g. Algılamaya yönelik olaylarda kullanılabilirler.
- h. Örüntü sınıflandırma ve ilişkilendirme yapabilirler.
- ı. Bir problem için farklı türde ağ yapıları uygulanabilir.
- j. Belirsiz ve tam olmayan bilgileri işleyebilir.

YSA'nın Dezavantajları;

- a. Donanım bağımlıdır.
- b. Uygun ağ yapısının ve parametrelerinin belirlenmesinde belli bir kural yoktur genellikle deneme yanılma yoluyla yapılır.
- c. Ağın davranışları açıklanamamaktadır. Ağın ağırlıklarında saklanan bilgi kara kutu olarak düşünülebilir, direkt ağırlıklara bakıp inceleme yapılarak anlamsal sonuç çıkarma imkanını bizlere sunmaz, fakat sonucu eğitim setindeki verilere uygun olacak şekilde hesaplar.
- d. Öğrenilecek problemin ağı sayısal gösterimi önemli bir problemidir.
- e. Ağ, eğitim setine iyi sonuç vermesine rağmen, test setine de iyi bir sonuç vereceğini garanti etmez.

f. YSA'da eğitim işleminin gerçekleştirilmesi uzun zamanlar alabilmektedir.

4.2.9. Yapay sinir ağlarının uygulama alanları

YSA yöntemi birçok alanda uygulanmış ve başarılı sonuçlar elde edilmiştir. YSA yöntemiyle ilgili çalışmaların teknolojiye adapte edilebilmesi, yöntemi günlük hayatımızın vazgeçilmez bir parçası haline getirmiştir. Evimizdeki aletlerde, sağlık alanlarında, fabrikalarda YSA uygulamalarını görmek mümkündür. YSA'nın, finans sektöründe, sağlık alanlarında, imalat sürecinde, askeri alanlarda, uzay teknolojilerinde ve çeşitli mühendislik alanlarında birçok uygulaması mevcuttur. Bu uygulamalardan dikkat çeken bazı örnekler, aşağıdaki gibi sıralanabilir;

- a. Otomatik pilot uygulamalarında
- b. Parmak izi, imza ve plaka tanımada
- c. Kanseri erken teşhisinde
- d. EEG ve ECG analizinde
- e. Finans sektöründe (Döviz kuru tahminleri, makro ekonomik tahminlerde)
- f. Askeri uçaklarda uçuş yönlerinin belirlenmesinde
- g. Silahların doğru yönlendirilmesinde
- h. Mayın arama aletlerinde
- ı. Hava tahminlerinde
- j. Yüz ve görüntü eşleştirmede
- k. Ses tanımada
- l. Radar izlemede
- m. Hedef tanıma ve takip sistemlerinde
- n. Bomba dedektörü ve uyuşturucu koklayıcılarında
- o. Deprem ve patlatma olaylarının ayırt edilmesinde

BÖLÜM 5. UYGULAMALAR

Bu çalışmada, Adapazarı'na ait zeminlerin mekanik, fiziksel ve dinamik özelliklerinin birbirleri ile olan ilişkileri çoklu regresyon analizi ve farklı Yapay Sinir Ağları (YSA) modelleri ile incelenmiştir. Adapazarı zeminlerine ait mekanik, fiziksel ve dinamik veriler Sakarya Büyükşehir Belediyesi arşivinde bulunan farklı zamanlarda ve farklı firmalarca yapılan zemin etüdü raporlarından 636 adedi seçilerek elde edilmiştir. Verilerin istatistik özellikleri Tablo 5.1' de verilmiştir. Eldeki veriler, birbirleri ile olan ilişkilerin araştırılması amacıyla 26 farklı guruba ayrılmıştır. Daha sonra bu veri gurupları çoklu regresyon ve yapay sinir ağları (YSA) yöntemleri ile analiz edilmişlerdir.

Çoklu regresyon analizlerinde "SPSS" paket programı kullanılmıştır. 26 farklı veri gurubu için yapılan regresyon analiz sonuçları Tablo 5.2.' de verilmiştir.

Tablo 5.1. Veri seti istatistik özellikleri.

	Aritmetik Ortalama	En Büyük Değer	En Küçük Değer	Değişim Aralığı	Mod	Medyan	Standart Sapma	Değişkenlik Katsayısı	Çarpıklık
w _n	37,17	69	10	59	37	37	6,68	17,97	0,04
SPT	10,70	25	3	22	9	10	3,40	31,76	1,09
w _L	52,30	95	28,05	66,95	56	52	11,25	21,51	0,39
w _p	25,64	57	12	45	25	25	5,26	20,52	1,42
I _p	26,65	72	6	66	27	26	9,69	36,38	0,81
c	43,92	77,16	10,90	66,26	43	44	14,22	32,38	0,06
Φ	1,01	6	0	6	0	0	1,66	164,06	1,66
V _s	186	276	93	183	181	182	40,51	21,81	0,05
#4	0,05	12,02	0	12,02	0	0	0,60	1188,55	16,19
#200	91,59	100	5,92	94,08	99	96	12,69	13,86	-3,52

Tablo 5.2. Adapazarı zeminlerine ait mekanik, fiziksel ve dinamik özellikler arasındaki ilişkiler için çoklu regresyon analizi sonuçları.

Araştırma Modeli	Ampirik Bağıntı	R ²
$I_L \rightarrow c$	$C = 48.869 - (10.785) I_L$	0,229
$I_P \rightarrow c$	$C = 41,6 + (0,085) I_P$	0,003
$SPT \rightarrow c$	$C = 41,56 + (0,2) SPT$	0,002
$SPT \rightarrow \Phi$	$\Phi = 0,944 + (0,02) SPT$	0,001
$V_s \rightarrow c$	$C = 40,43 + (0,02433) V_s$	0,004
$V_s \rightarrow \Phi$	$\Phi = 2,2335 - (0,006) V_s$	0,025
$C - \Phi \rightarrow SPT$	$SPT = 9,8646 + (0,01754) c + (0,19) \Phi$	0,009
$C - \Phi \rightarrow V_s$	$V_s = 174,6251 + (0,34103) c - (3,74521) \Phi$	0,035
$w_L - I_P \rightarrow c$	$C = 44.056 - (0.095) w_L + (0.182) I_P$	0,067
$w_L - w_p \rightarrow c$	$C = 44,06 + (0,087) w_L - (0,18) w_p$	0,004
$w_p - I_P \rightarrow c$	$C = 44,06 - (0,1) w_p + (0,087) I_P$	0,004
$SPT - V_s \rightarrow c$	$C = 36,86 + (0,38) SPT + (0,0243) V_s$	0,015
$SPT - V_s \rightarrow \Phi$	$\Phi = 1,98 + (0,003) SPT - (0,0054) V_s$	0,025
$w_n - w_L \rightarrow c$	$C = 55.305 - (0.580) w_n + (0.195) w_L$	0,246
$w_n - I_P \rightarrow c$	$C = 58.283 - (0.533) w_n + (0.204) I_P$	0,243
$w_n - w_p \rightarrow c$	$C = 58.364 - (0.465) w_n + (0.111) w_p$	0,208
$w_n - SPT \rightarrow c$	$C = 56,92 - (0,415) w_n + (0,21) SPT$	0,039
$\#4 - \#200 - I_L \rightarrow c$	$C = 39,42 - \#4(1,816) + \#200(0,105) - I_L (10,846)$	0,066
$\#4 - \#200 - I_L \rightarrow \Phi$	$\Phi = 4,49 + \#4(0,37) - \#200(0,036) - I_L (0,55)$	0,074
$w_L - w_p - I_P \rightarrow c$	$C = 44,15 + w_L (638,20) - w_p (638,3) - I_P (638,12)$	0,006
$w_n - w_L - I_P \rightarrow c$	$C = 56,43 - w_n (0,6) + w_L (0,15) + I_P (0,066)$	0,065
$w_n - w_L - w_p \rightarrow c$	$C = 56,43 - w_n (0,6) + w_L (0,2145) - w_p (0,066)$	0,060
$w_n - w_p - I_P \rightarrow c$	$C = 56,43 - w_n (0,6) + w_p (0,15) + I_P (0,2145)$	0,065
$w_n - w_L - w_p - I_P \rightarrow c$	$C = 56.105 - (0.571)w_n + (562.31) w_L - (562.17) w_p - (562.10) I_P$	0,247
$w_n - \#4 - \#200 - w_L - w_p \rightarrow c$	$C = 44,32 - w_n (0,7) - \#4(2,23) + \#200(0,2) + w_L (0,22) - w_p (0,12)$	0,102
$w_n - \#4 - \#200 - w_L - w_p \rightarrow \Phi$	$\Phi = 5,535 - w_n (0,02131) + \#4(0,8) - \#200(0,053) + w_L (0,02435) - w_p (0,0031)$	0,120

Yapay sinir ağı (YSA) analizlerinde, farklı ölçüm birimlerine sahip veri değerlerinin birbirleri ile ilişkilerini sağlıklı bir şekilde inceliyebilmek amacıyla, veri gurupları +1 ve -1 değerleri arasında normalize edilmişlerdir. Normalizasyon işlemi için aşağıdaki formül kullanılmıştır.

$$X_i = (2(X_{\min} - X_{\max}) / (X_{\max} - X_{\min}) - 1) \quad (5.1)$$

burada; X_i = normalleştirilmiş değer,

$X_{\min}$ = veri gurubu içindeki en küçük değer,

$X_{\max}$ = veri gurubu içindeki en büyük değer.

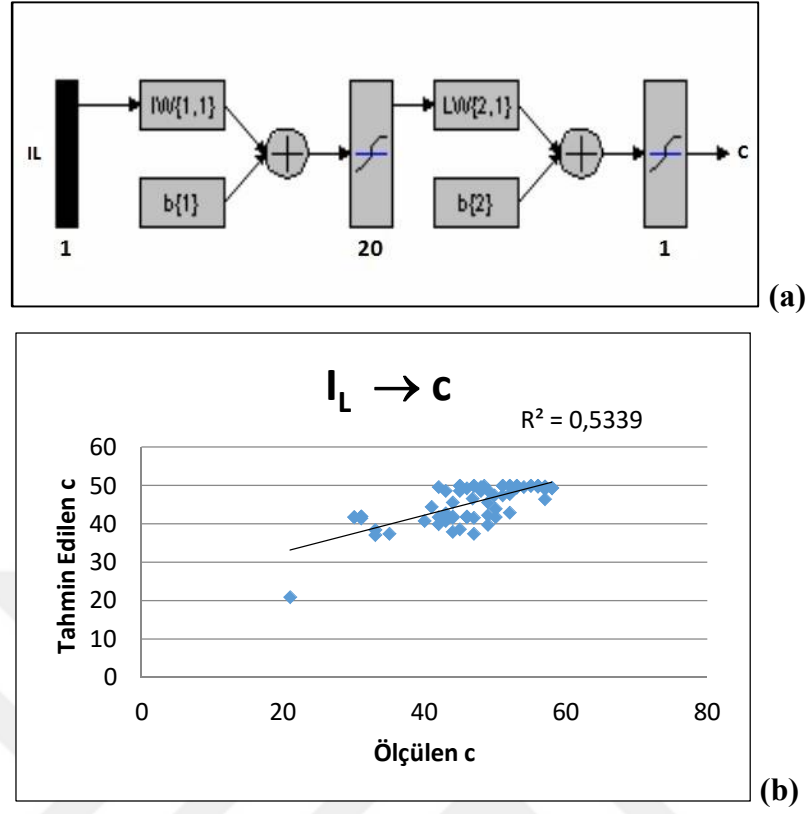
Normalize işleminden sonra, her bir veri gurubu kendi içinde, %70'e %30 olmak üzere iki alt kümeye ayrılmışlardır. Bu alt kümelerden %70 hacime sahip olanlar YSA modellerinin eğitimi ve %30 hacime sahip olanlar ise YSA modellerinin test edilmesi için kullanılmıştır.

YSA analizlerinde MATLAB yazılımı içinde hazır olarak bulunan Yapay Sinir Ağı araç kutusu kullanılmıştır. MATLAB yazılımı, YSA algoritmasının eğitiminin farklı yakınsama kriterleri, tolerans düzeyleri, aktivasyon fonksiyonları ve iterasyon sayıları ile yapılmasına olanak sağlamaktadır. Bu çalışmada transfer fonksiyonu olarak "hiperbolik tanjant fonksiyonu" kullanılmıştır. Analizler 3, 5, 7, 9, 11, 13, 15 ve 20 nöronlu YSA modelleri ile yapılmış ve en iyi sonucu veren model seçilmiştir.

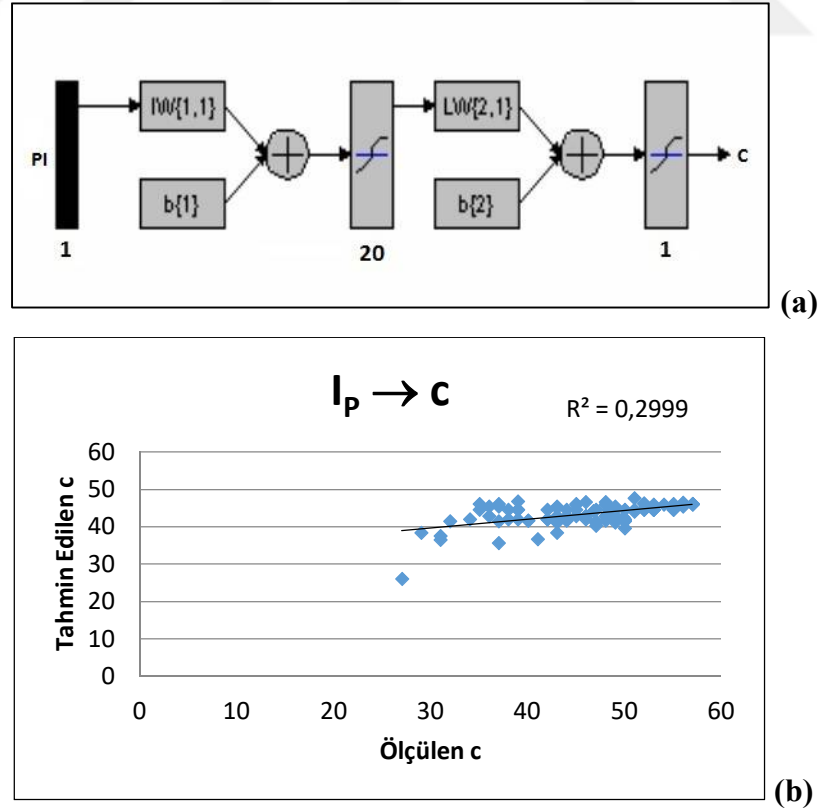
Bir ağ yapısını, giriş parametreleri girdi katmanı seçimi, gizli katman düğüm sayısı ve katmanlar arası transfer fonksiyonu tanımlar. Farklı sayıdaki giriş parametreleri ve nöron sayıları için hesaplanan korelasyon katsayıları (R^2) Tablo 5.3'te ve takip eden şekillerde gösterilmiştir. Regresyon analizi ve YSA analizi sonuçları Tablo 5.4'te birlikte verilmiştir.

Tablo 5.3. YSA modelleri (R^2) katsayıları ve nöron sayıları

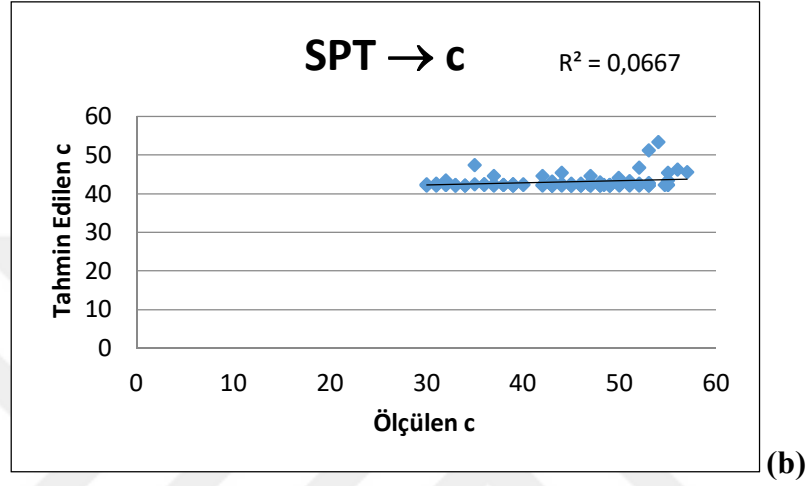
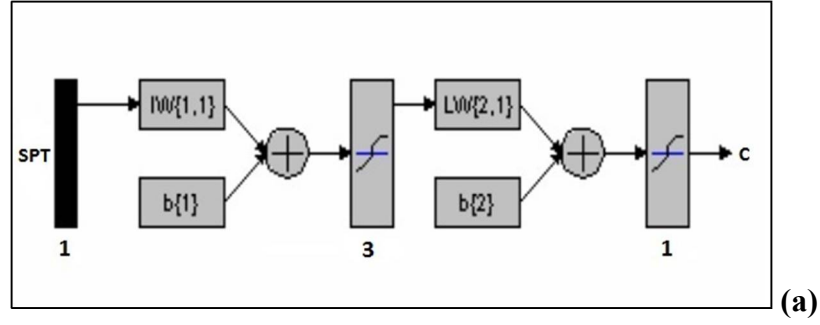
Araştırma Modeli	R^2	Nöron Sayısı
$I_L \rightarrow c$	0,534	20
$I_P \rightarrow c$	0,299	20
$SPT \rightarrow c$	0,067	3
$SPT \rightarrow \Phi$	0,051	13
$V_s \rightarrow c$	0,185	20
$V_s \rightarrow \Phi$	0,059	9
$c - \Phi \rightarrow SPT$	0,168	9
$c - \Phi \rightarrow V_s$	0,184	5
$w_L - w_P \rightarrow c$	0,235	7
$w_L - I_P \rightarrow c$	0,571	13
$w_P - I_P \rightarrow c$	0,295	11
$SPT - V_s \rightarrow c$	0,045	20
$SPT - V_s \rightarrow \Phi$	0,048	3
$w_n - w_L \rightarrow c$	0,600	3
$w_n - I_P \rightarrow c$	0,712	11
$w_n - w_P \rightarrow c$	0,406	11
$w_n - SPT \rightarrow c$	0,046	7
$\#4 - \#200 - I_L \rightarrow c$	0,459	7
$\#4 - \#200 - I_L \rightarrow \Phi$	0,747	9
$w_L - w_P - I_P \rightarrow c$	0,501	20
$w_n - w_L - I_P \rightarrow c$	0,358	15
$w_n - w_L - w_P \rightarrow c$	0,547	15
$w_n - w_P - I_P \rightarrow c$	0,487	15
$w_n - w_L - w_P - I_P \rightarrow c$	0,649	13
$w_n - \#4 - \#200 - w_L - w_P \rightarrow c$	0,641	20
$w_n - \#4 - \#200 - w_L - w_P \rightarrow \Phi$	0,897	9



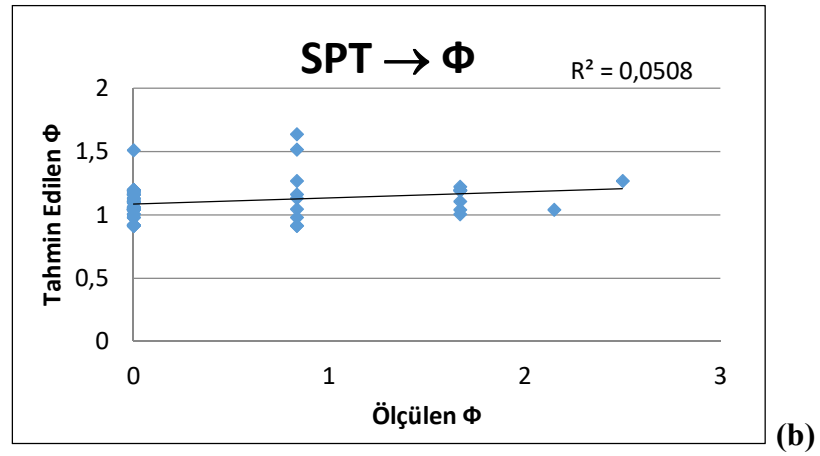
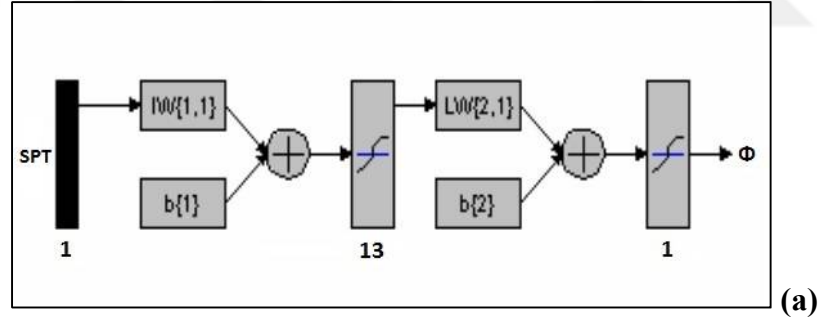
Şekil 5.1. (a) Likidite indisi değerine göre c değerini tahminleyen YSA modelinin şematik gösterimi. (b) YSA modelinin verdiği sonuç.



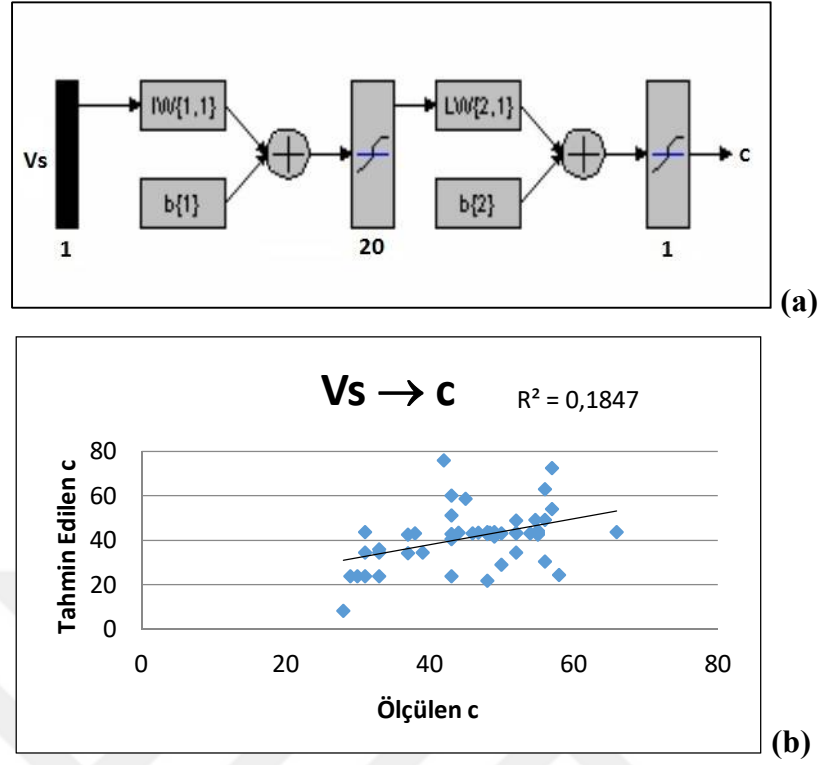
Şekil 5.2. (a) Plastisite indisi değerine göre c değerini tahminleyen YSA modelinin şematik gösterimi. (b) YSA modelinin verdiği sonuç.



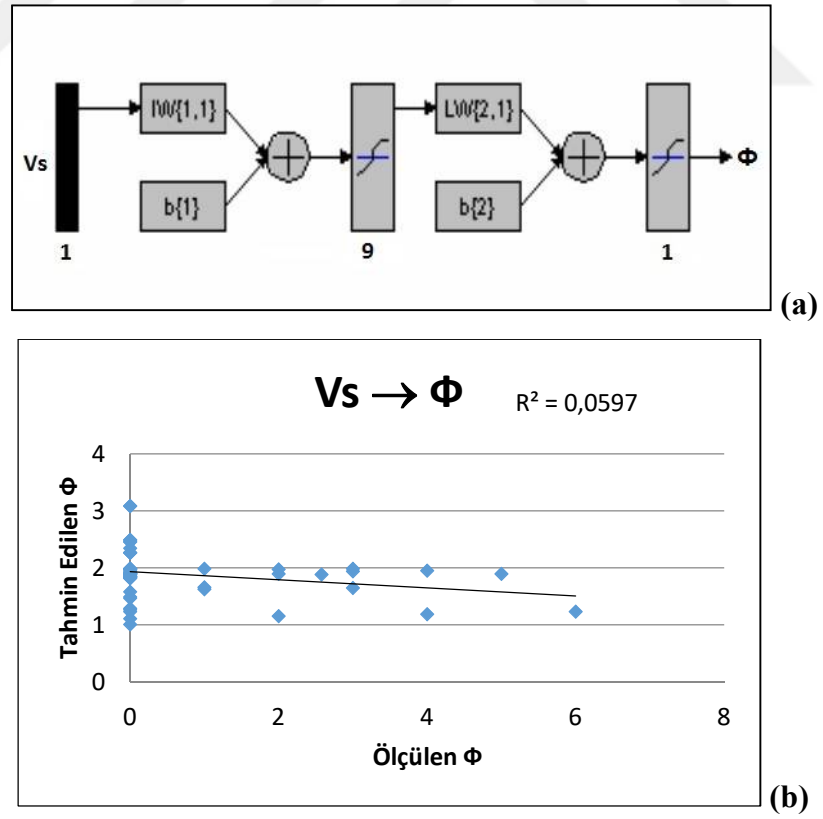
Şekil 5.3. (a) SPT değerine göre c değerini tahminleyen YSA modelinin şematik gösterimi. (b) YSA modelinin verdiği sonuç.



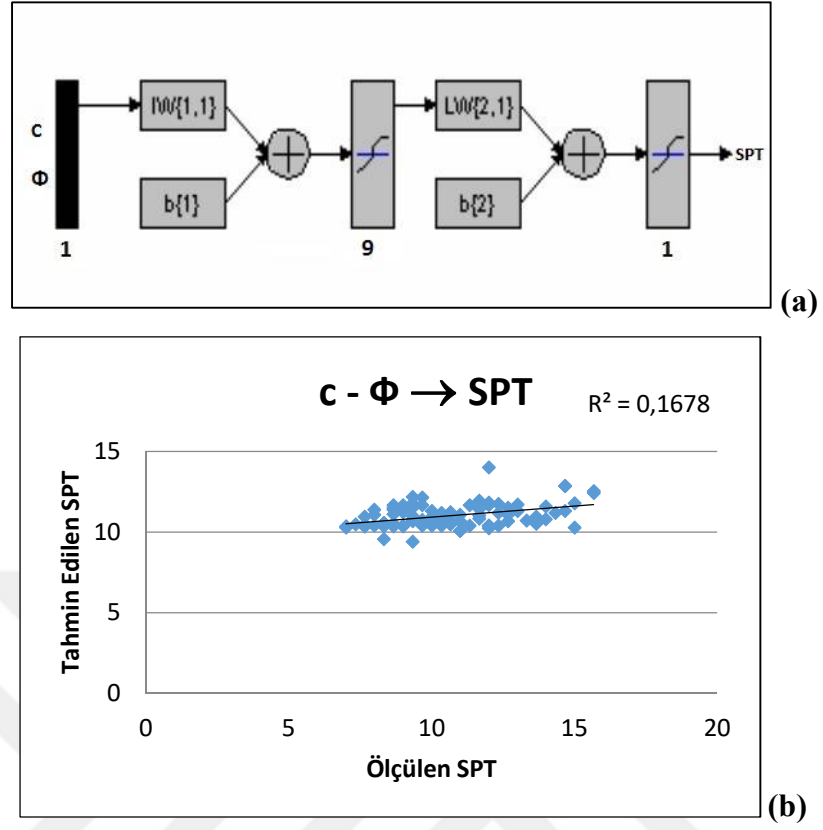
Şekil 5.4. (a) SPT değerine göre Φ değerini tahminleyen YSA modelinin şematik gösterimi. (b) YSA modelinin verdiği sonuç.



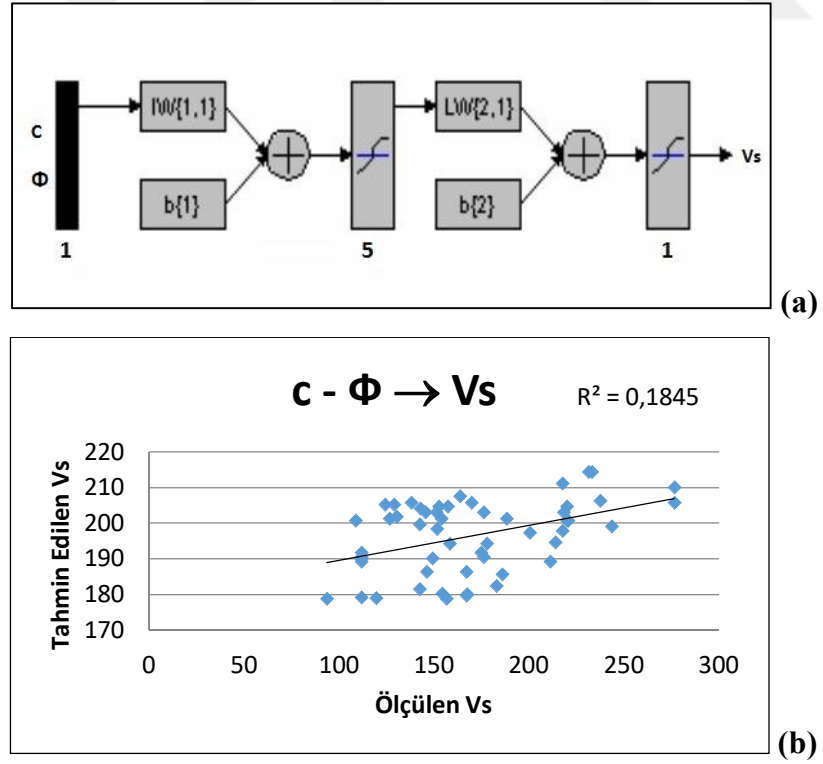
Şekil 5.5. (a) V_s değerine göre c değerini tahminleyen YSA modelinin şematik gösterimi.
(b) YSA modelinin verdiği sonuç.



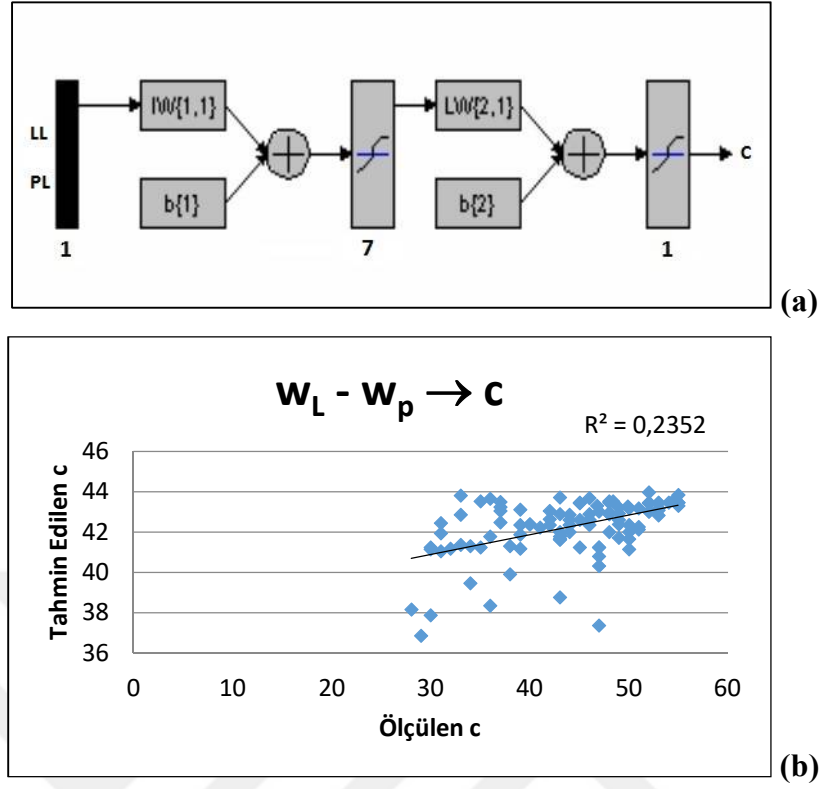
Şekil 5.6. (a) V_s değerine göre kayma açısı değerini tahminleyen YSA modelinin şematik gösterimi.
(b) YSA modelinin verdiği sonuç.



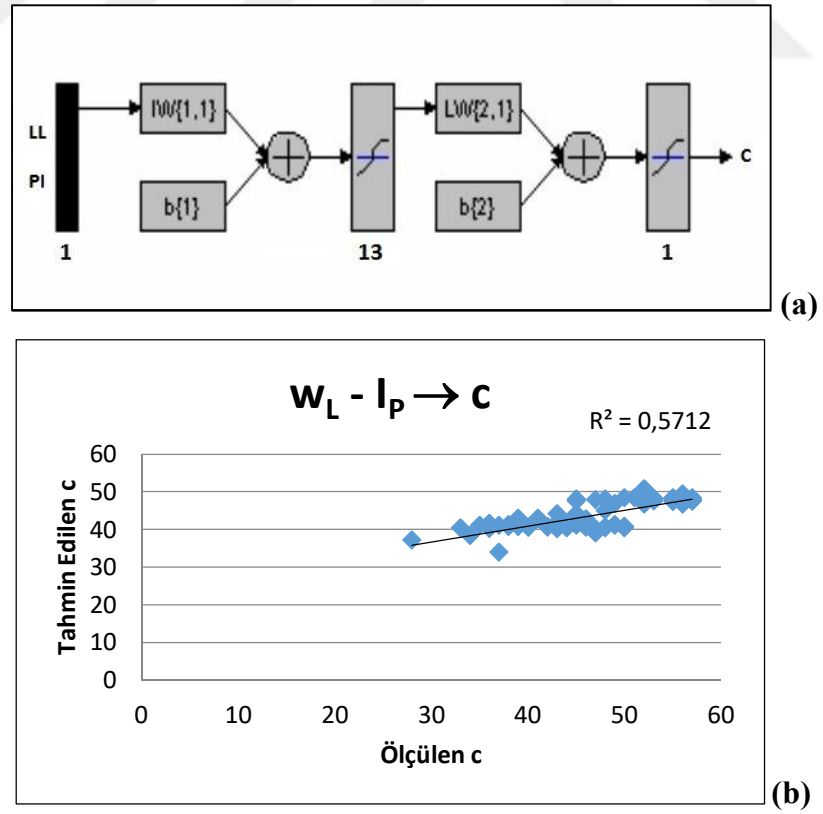
Şekil 5.7. (a) c ve Φ değerine göre SPT değerini tahminleyen YSA modelinin şematik gösterimi. (b) YSA modelinin verdiği sonuç.



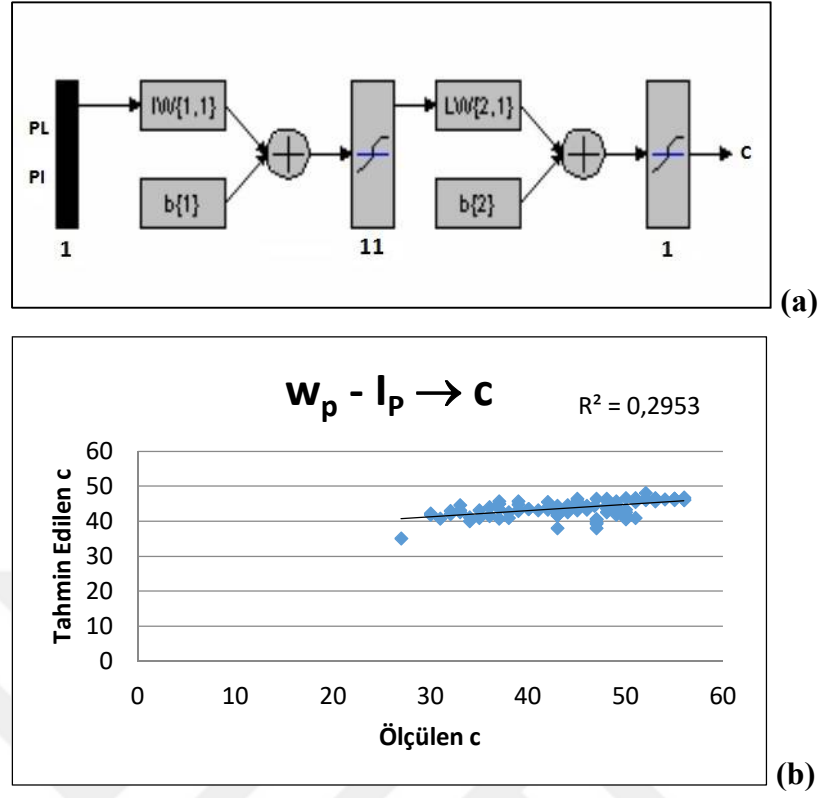
Şekil 5.8. (a) c ve Φ değerine göre Vs değerini tahminleyen YSA modelinin şematik gösterimi. (b) YSA modelinin verdiği sonuç.



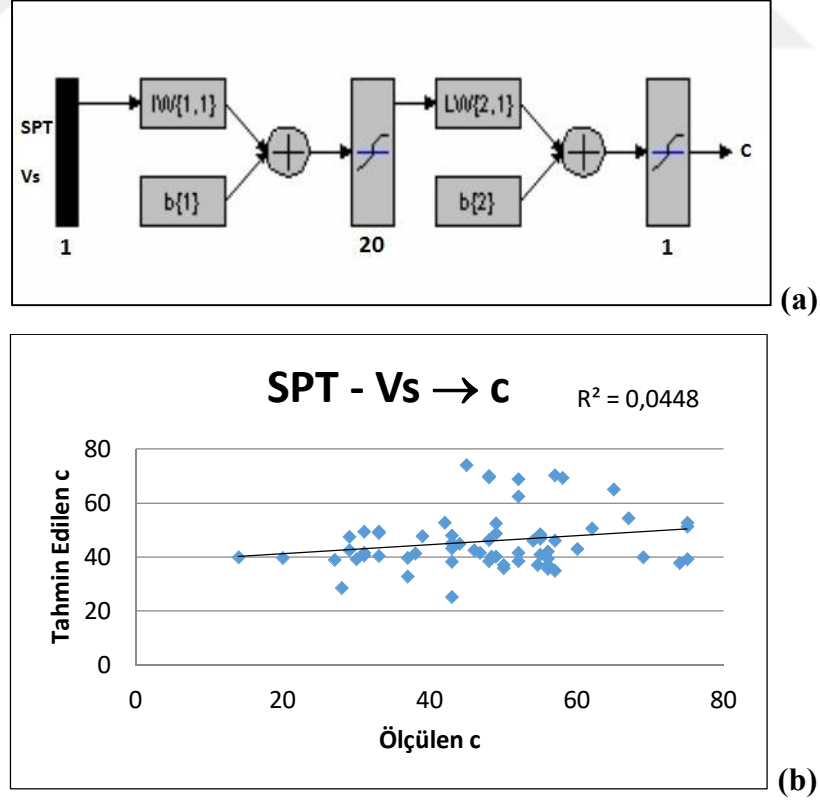
Şekil 5.9. (a) w_L ve w_P değerine göre c değerini tahminleyen YSA modelinin şematik gösterimi. (b) YSA modelinin verdiği sonuç.



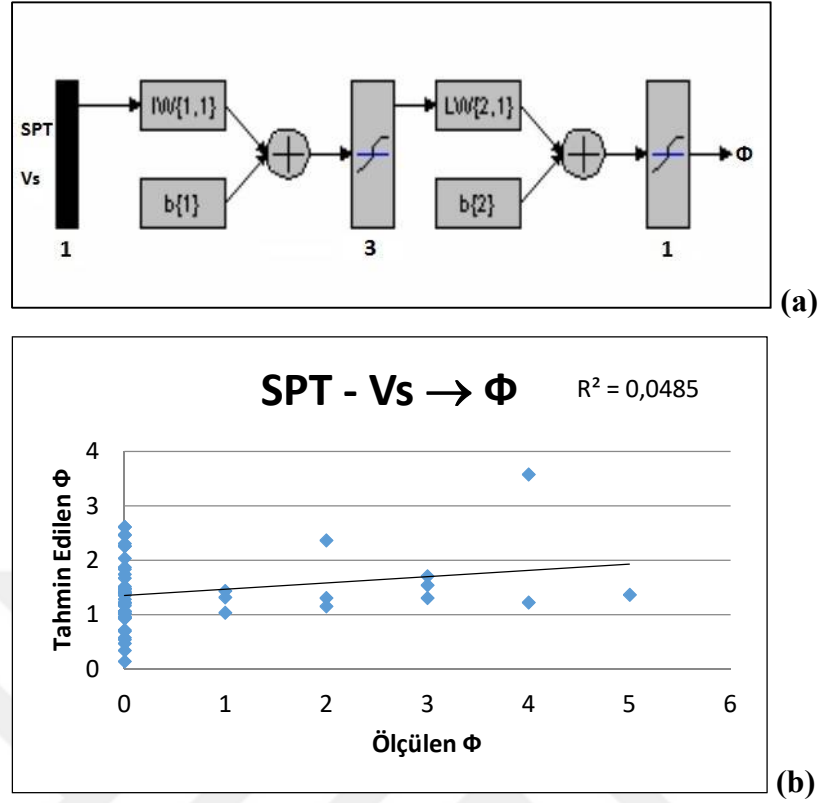
Şekil 5.10. (a) w_L ve I_P değerine göre c değerini tahminleyen YSA modelinin şematik gösterimi. (b) YSA modelinin verdiği sonuç.



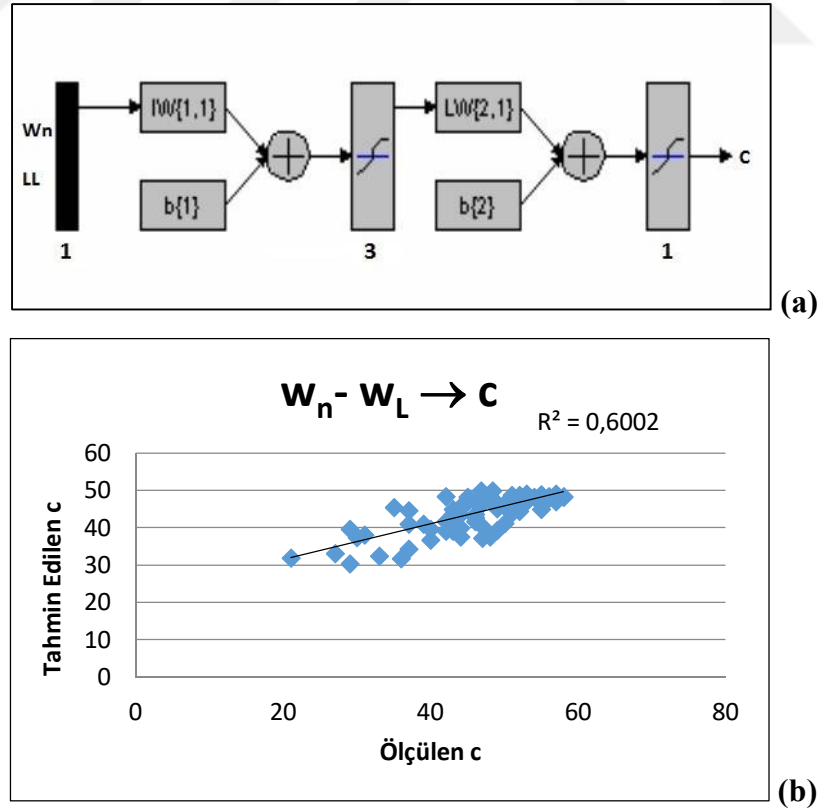
Şekil 5.11. (a) w_p ve I_p değerine göre c değerini tahminleyen YSA modelinin şematik gösterimi. (b) YSA modelinin verdiği sonuç.



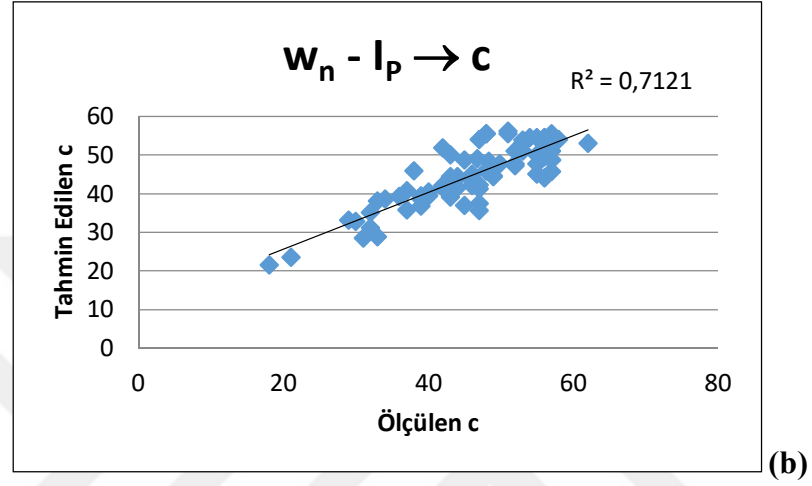
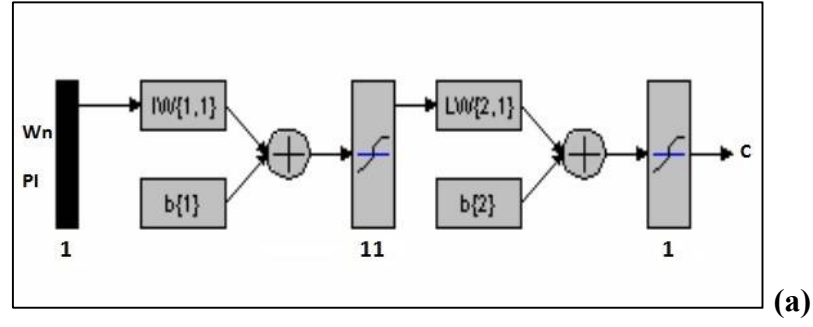
Şekil 5.12. (a) SPT ve V_s değerine göre c değerini tahminleyen YSA modelinin şematik gösterimi. (b) YSA modelinin verdiği sonuç.



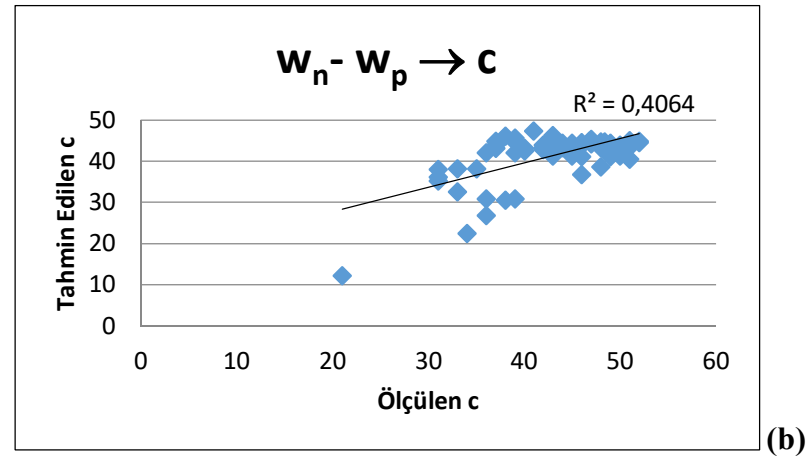
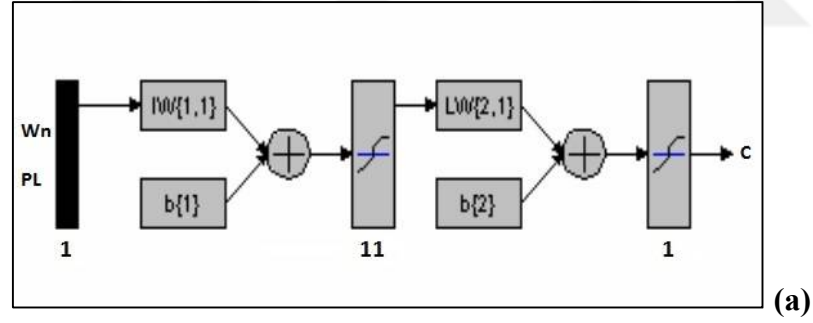
Şekil 5.13. (a) SPT ve V_s değerine göre Φ değerini tahminleyen YSA modelinin şematik gösterimi. (b) YSA modelinin verdiği sonuç.



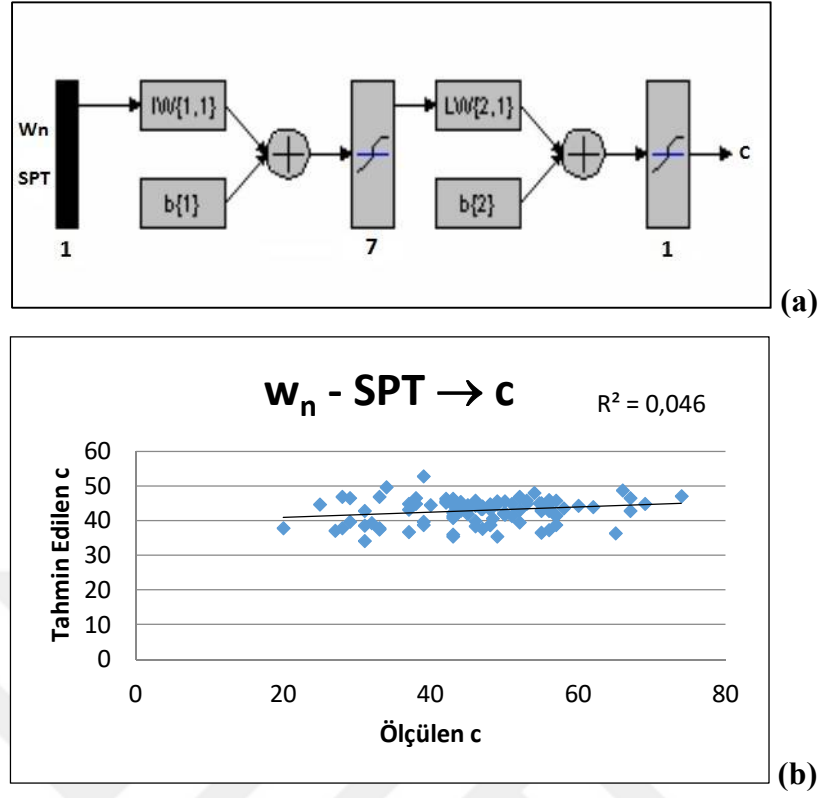
Şekil 5.14. (a) w_n ve w_L değerine göre c değerini tahminleyen YSA modelinin şematik gösterimi. (b) YSA modelinin verdiği sonuç.



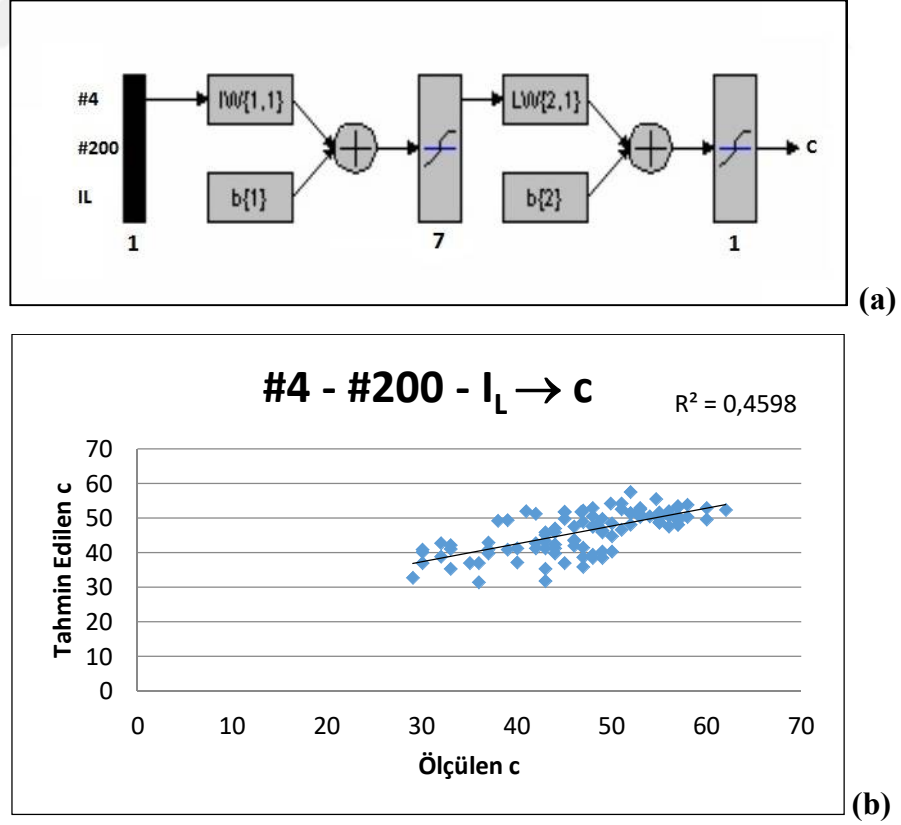
Şekil 5.15. (a) w_n ve I_p değerine göre c değerini tahminleyen YSA modelinin şematik gösterimi. (b) YSA modelinin verdiği sonuç.



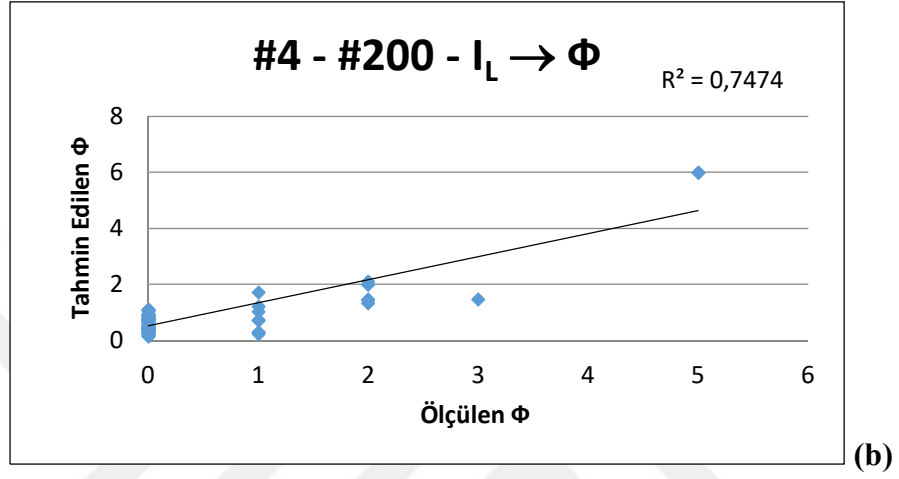
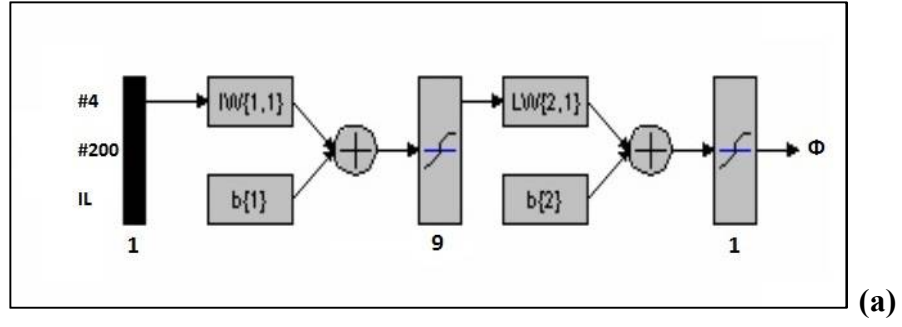
Şekil 5.16. (a) w_n ve w_p değerine göre c değerini tahminleyen YSA modelinin şematik gösterimi. (b) YSA modelinin verdiği sonuç.



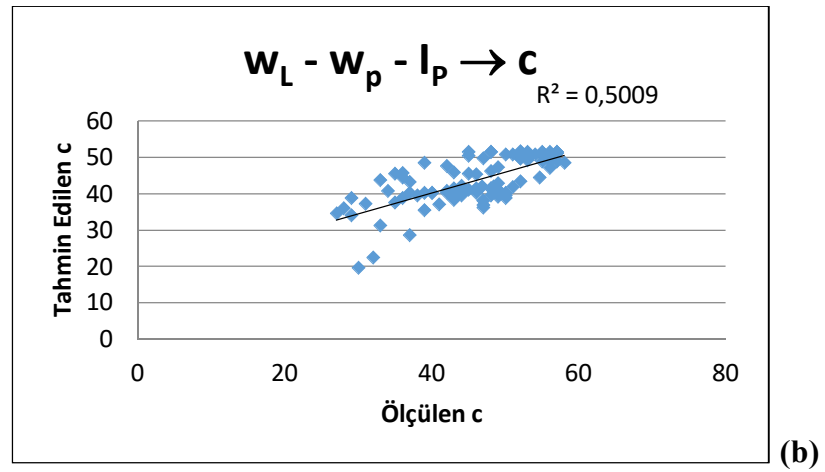
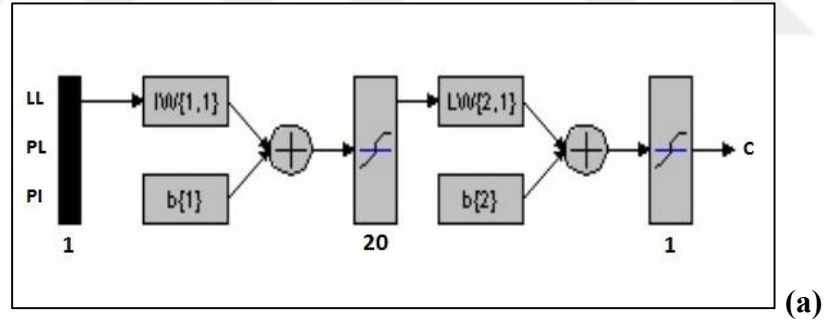
Şekil 5.17. (a) w_n ve SPT değerine göre c değerini tahminleyen YSA modelinin şematik gösterimi. (b) YSA modelinin verdiği sonuç.



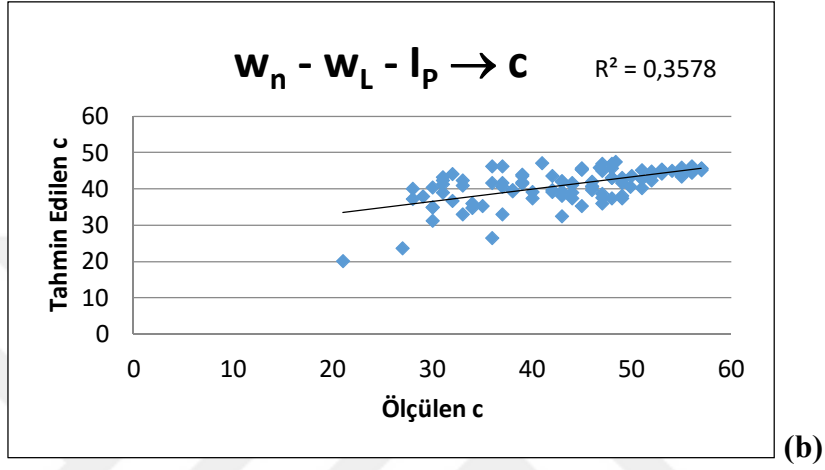
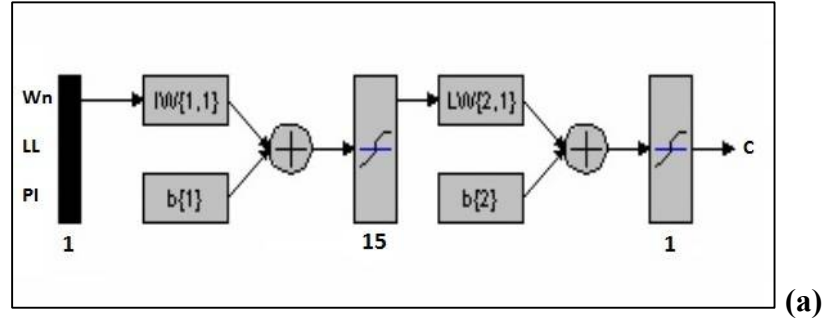
Şekil 5.18. (a) #4, #200 ve I_L değerine göre c değerini tahminleyen YSA modelinin şematik gösterimi. (b) YSA modelinin verdiği sonuç.



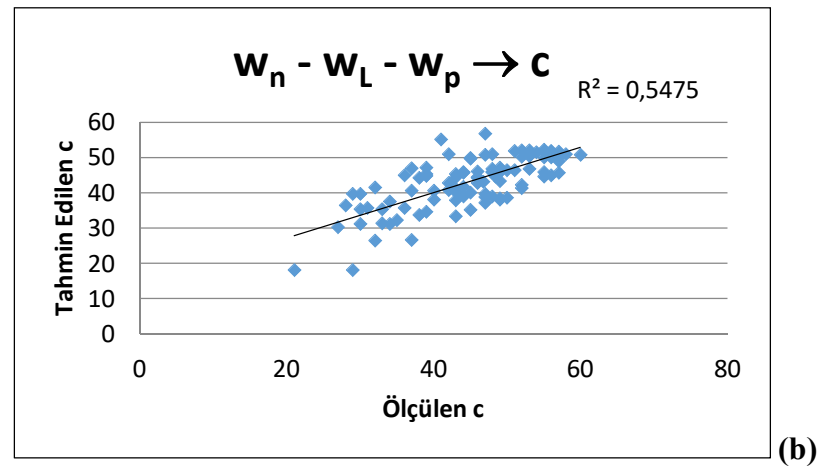
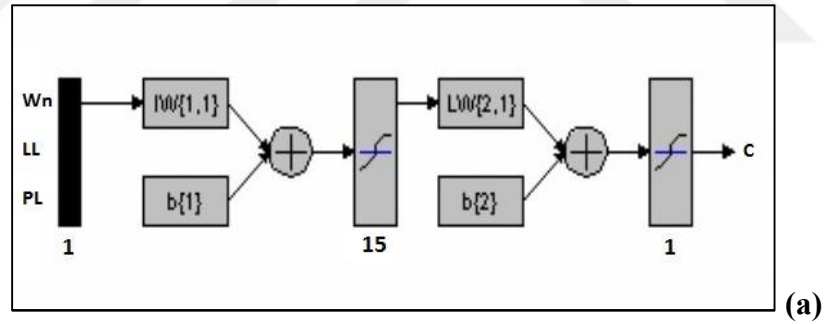
Şekil 5.19. (a) #4, #200 ve I_L değerine göre Φ değerini tahminleyen YSA modelinin şematik gösterimi. (b) YSA modelinin verdiği sonuç.



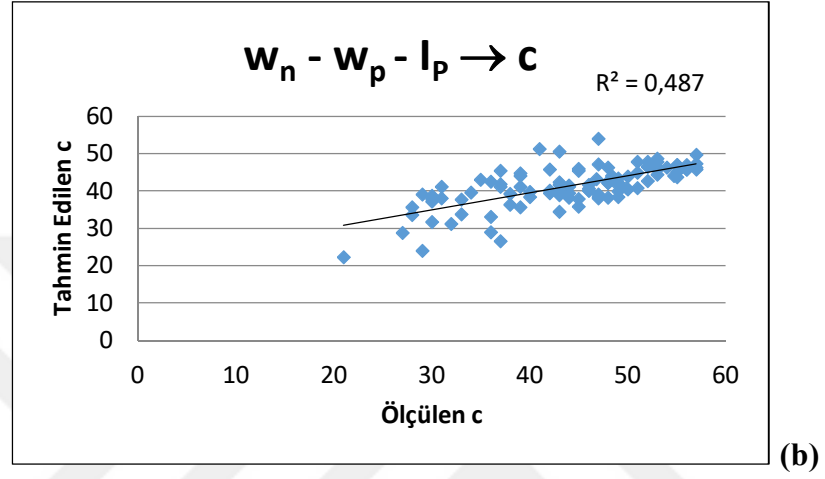
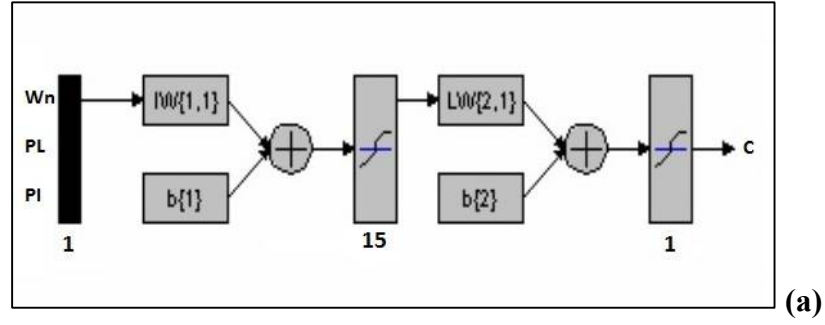
Şekil 5.20. (a) w_L , w_p ve I_p değerine göre c değerini tahminleyen YSA modelinin şematik gösterimi. (b) YSA modelinin verdiği sonuç.



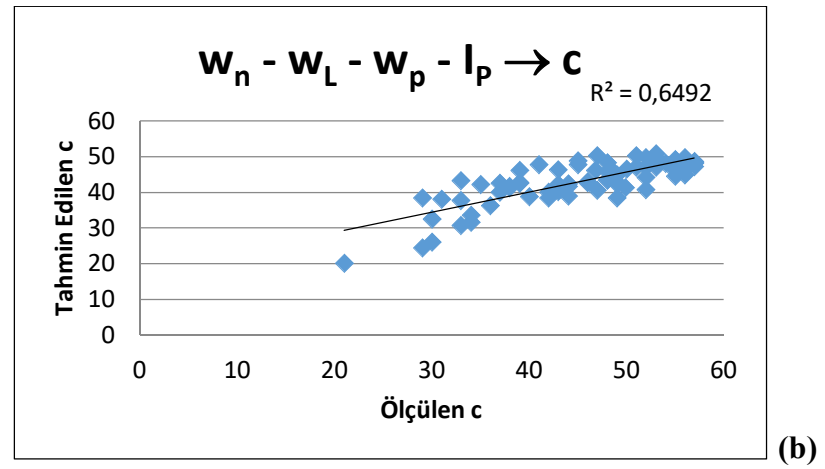
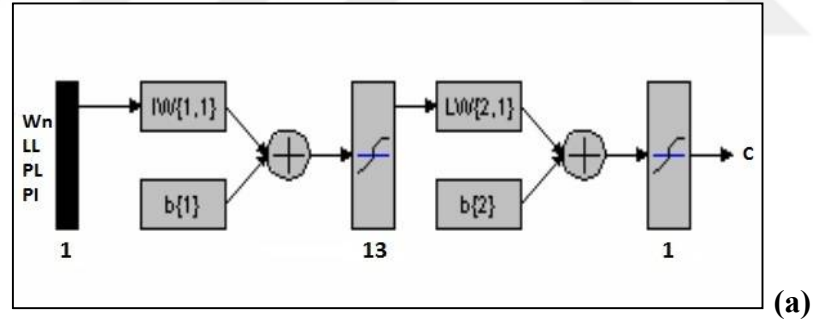
Şekil 5.21. (a) w_n , w_L ve I_p değerine göre c değerini tahminleyen YSA modelinin şematik gösterimi. (b) YSA modelinin verdiği sonuç.



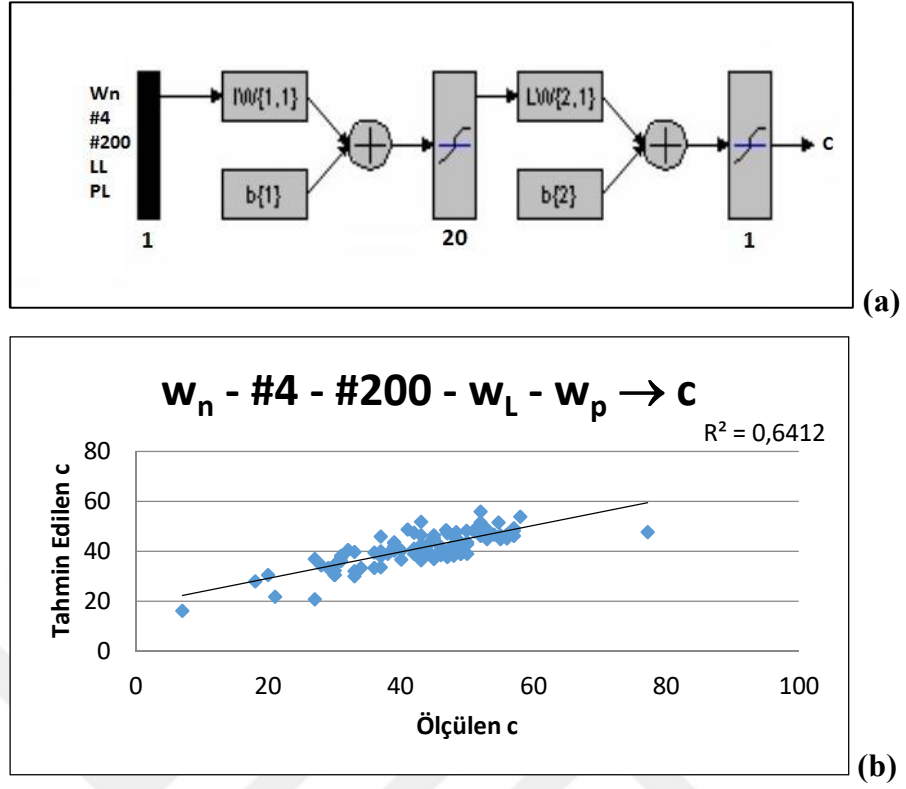
Şekil 5.22. (a) w_n , w_L ve w_p değerine göre c değerini tahminleyen YSA modelinin şematik gösterimi. (b) YSA modelinin verdiği sonuç.



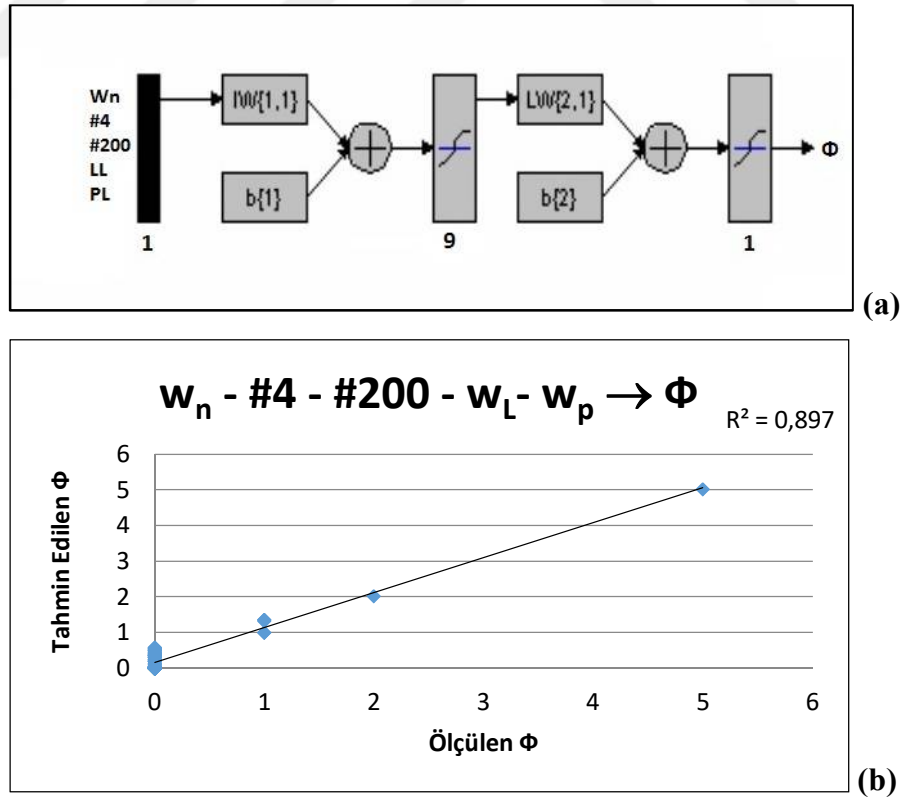
Şekil 5.23. (a) w_n , w_p ve I_p değerine göre c değerini tahminleyen YSA modelinin şematik gösterimi. (b) YSA modelinin verdiği sonuç.



Şekil 5.24. (a) w_n , w_L , w_p ve I_p değerine göre c değerini tahminleyen YSA modelinin şematik gösterimi. (b) YSA modelinin verdiği sonuç.



Şekil 5.25. (a) w_n , #4, #200, w_L ve w_p değerine göre c değerini tahminleyen YSA modelinin şematik gösterimi. (b) YSA modelinin verdiği sonuç.



Şekil 5.26. (a) w_n , #4, #200, w_L ve w_p değerine göre Φ değerini tahminleyen YSA modelinin şematik gösterimi. (b) YSA modelinin verdiği sonuç.

Tablo 5.4. Çoklu regresyon ve YSA sonuçlarının karşılaştırılması.

Araştırma Modeli	Çoklu Regresyon Sonuçları	YSA Sonuçları
$I_L \rightarrow c$	0,229	0,534
$I_P \rightarrow c$	0,003	0,299
$SPT \rightarrow c$	0,002	0,067
$SPT \rightarrow \Phi$	0,001	0,051
$V_S \rightarrow c$	0,004	0,185
$V_S \rightarrow \Phi$	0,025	0,059
$c - \Phi \rightarrow SPT$	0,009	0,168
$c - \Phi \rightarrow V_S$	0,035	0,184
$w_L - w_P \rightarrow c$	0,004	0,235
$w_L - I_P \rightarrow c$	0,067	0,571
$w_P - I_P \rightarrow c$	0,004	0,295
$SPT - V_S \rightarrow c$	0,015	0,045
$SPT - V_S \rightarrow \Phi$	0,025	0,048
$w_n - w_L \rightarrow c$	0,246	0,600
$w_n - I_P \rightarrow c$	0,243	0,712
$w_n - w_P \rightarrow c$	0,208	0,406
$w_n - SPT \rightarrow c$	0,039	0,046
$\#4 - \#200 - I_L \rightarrow c$	0,066	0,459
$\#4 - \#200 - I_L \rightarrow \Phi$	0,074	0,747
$w_L - w_P - I_P \rightarrow c$	0,006	0,501
$w_n - w_L - I_P \rightarrow c$	0,065	0,358
$w_n - w_L - w_P \rightarrow c$	0,065	0,547
$w_n - w_P - I_P \rightarrow c$	0,065	0,487
$w_n - w_L - w_P - I_P \rightarrow c$	0,247	0,649
$w_n - \#4 - \#200 - w_L - w_P \rightarrow c$	0,102	0,641
$w_n - \#4 - \#200 - w_L - w_P \rightarrow \Phi$	0,120	0,897

BÖLÜM 6. TARTIŞMA ve SONUÇLAR

Bu çalışmada, Adapazarı ait ince taneli zeminlerin fiziksel, mekanik ve dinamik özellikleri arasındaki ilişkiler Adapazarı'nda yapılan pek çok zemin etüdü çalışmalarından alınan veriler ile incelenmiştir. Veri kümesi ince taneli zeminlerin mekanik, fiziksel ve dinamik değerleri kullanılarak oluşturulmuştur. Çoklu regresyon dalgası hızı, kayma mukavemeti ve kohezyon değerleri arasındaki ilişkiler değerlendirilmiştir.

Likidite indisi (I_L) değeri ile kohezyon (c) arasındaki ilişkinin araştırıldığı birinci model incelendiğinde; I_L ve c arasındaki ilişkinin basit doğrusal regresyon analizinde $R^2=0.229$ değerini aldığı ve I_L ile c arasında zayıf bir ilişkinin olduğu görülmektedir. Diğer taraftan I_L değerleri bilindiğinde c değerlerinin tahmin edilebilirliğinin araştırıldığı YSA modelinin verdiği sonuç $R^2= 0.534$ değeriyle, I_L bilindiğinde c değerinin orta derecede doğrulukla tahminlenebileceğini göstermektedir.

Plastisite indisi (I_p) değeri ile kohezyon (c) arasındaki ilişkinin araştırıldığı ikinci model incelendiğinde; I_p ve c arasındaki ilişkinin basit doğrusal regresyon analizinde $R^2=0.003$ değerini aldığı ve I_p ile c arasında çok zayıf veya ihmal edilebilir bir ilişkinin olduğu görülmektedir. Diğer taraftan I_p değerleri bilindiğinde c değerinin tahmin edilebilirliğinin araştırıldığı YSA modelinin verdiği sonuç $R^2=0.299$ değeriyle, I_p değeri bilindiğinde c değerinin zayıf derecede doğrulukla tahminlenebileceğini göstermektedir.

Standart penetrasyon testi (SPT) değeri ile kohezyon (c) arasındaki ilişkinin araştırıldığı üçüncü model incelendiğinde; SPT ve c arasındaki ilişkinin basit doğrusal regresyon analizinde $R^2=0.002$ değerini aldığı ve SPT ile c arasında çok zayıf veya ihmal edilebilir bir ilişkinin olduğu görülmektedir. Diğer taraftan SPT değerleri

bilindiğinde c değerinin tahmin edilebilirliğinin araştırıldığı YSA modelinin verdiği sonuç $R^2=0.067$ değeriyle, SPT değeri bilindiğinde c değerinin çok zayıf derecede doğrulukla tahminlenebileceğini göstermektedir.

Standart penetrasyon testi (SPT) değeri ile kayma açısı değeri (Φ) arasındaki ilişkinin araştırıldığı dördüncü model incelendiğinde; SPT ve Φ arasındaki ilişkinin basit doğrusal regresyon analizinde $R^2=0.001$ değerini aldığı ve SPT ile Φ arasında çok zayıf veya ihmal edilebilir bir ilişkinin olduğu görülmektedir. Diğer taraftan SPT değerleri bilindiğinde Φ değerinin tahmin edilebilirliğinin araştırıldığı YSA modelinin verdiği sonuç $R^2=0.051$ değeriyle, SPT değeri bilindiğinde Φ değerinin çok zayıf derecede doğrulukla tahminlenebileceğini göstermektedir.

Kayma dalgası hızı (V_s) değeri ile kohezyon değeri (c) arasındaki ilişkinin araştırıldığı beşinci model incelendiğinde; V_s ve c arasındaki ilişkinin basit doğrusal regresyon analizinde $R^2=0.004$ değerini aldığı ve V_s ile c arasında çok zayıf veya ihmal edilebilir bir ilişkinin olduğu görülmektedir. Diğer taraftan V_s değerleri bilindiğinde c değerinin tahmin edilebilirliğinin araştırıldığı YSA modelinin verdiği sonuç $R^2=0.185$ değeriyle, V_s değeri bilindiğinde c değerinin çok zayıf derecede doğrulukla tahminlenebileceğini göstermektedir.

Kayma dalgası hızı (V_s) değeri ile kayma açısı değeri (Φ) arasındaki ilişkinin araştırıldığı altıncı model incelendiğinde; V_s ve Φ arasındaki ilişkinin basit doğrusal regresyon analizinde $R^2=0.025$ değerini aldığı ve V_s ile Φ arasında çok zayıf veya ihmal edilebilir bir ilişkinin olduğu görülmektedir. Diğer taraftan V_s değerleri bilindiğinde Φ değerinin tahmin edilebilirliğinin araştırıldığı YSA modelinin verdiği sonuç $R^2=0.059$ değeriyle, V_s değeri bilindiğinde Φ değerinin çok zayıf derecede doğrulukla tahminlenebileceğini göstermektedir.

Kohezyon değeri (c), kayma açısı değeri (Φ) ve standart penetrasyon testi (SPT) değerleri arasındaki ilişkinin araştırıldığı yedinci model incelendiğinde; c , Φ ve SPT arasındaki ilişkinin çoklu doğrusal regresyon analizinde $R^2=0.009$ değerini aldığı ve c , Φ ve SPT arasında çok zayıf veya ihmal edilebilir bir ilişkinin olduğu görülmektedir.

Diğer taraftan c ve Φ değerleri bilindiğinde SPT değerinin tahmin edilebilirliğinin araştırıldığı YSA modelinin verdiği sonuç $R^2=0.168$ değeriyle, c ve Φ değerleri bilindiğinde SPT değerinin çok zayıf derecede doğrulukla tahminlenebileceğini göstermektedir.

Kohezyon değeri (c), kayma açısı değeri (Φ) ve kayma dalgası hızı (V_s) değerleri arasındaki ilişkinin araştırıldığı sekizinci model incelendiğinde; c , Φ ve V_s arasındaki ilişkinin çoklu doğrusal regresyon analizinde $R^2=0.035$ değerini aldığı ve c , Φ ve V_s arasında çok zayıf veya ihmal edilebilir bir ilişkinin olduğu görülmektedir. Diğer taraftan c ve Φ değerleri bilindiğinde V_s değerinin tahmin edilebilirliğinin araştırıldığı YSA modelinin verdiği sonuç $R^2=0.184$ değeriyle, c ve Φ değerleri bilindiğinde V_s değerinin çok zayıf derecede doğrulukla tahminlenebileceğini göstermektedir.

Likit limit (w_L), plastik limit (w_p) ve kohezyon (c) değerleri arasındaki ilişkinin araştırıldığı dokuzuncu model incelendiğinde; w_L , w_p ve c arasındaki ilişkinin çoklu doğrusal regresyon analizinde $R^2=0.004$ değerini aldığı ve w_L , w_p ve c arasında çok zayıf veya ihmal edilebilir bir ilişkinin olduğu görülmektedir. Diğer taraftan w_L ve w_p değerleri bilindiğinde c değerinin tahmin edilebilirliğinin araştırıldığı YSA modelinin verdiği sonuç $R^2=0.235$ değeriyle, w_L ve w_p değerleri bilindiğinde c değerinin zayıf derecede doğrulukla tahminlenebileceğini göstermektedir.

Likit limit (w_L), plastisite indisi (I_p) ve kohezyon (c) değerleri arasındaki ilişkinin araştırıldığı onuncu model incelendiğinde; w_L , I_p ve c arasındaki ilişkinin çoklu doğrusal regresyon analizinde $R^2=0.067$ değerini aldığı ve w_L , I_p ve c arasında çok zayıf veya ihmal edilebilir bir ilişkinin olduğu görülmektedir. Diğer taraftan w_L ve I_p değerleri bilindiğinde c değerinin tahmin edilebilirliğinin araştırıldığı YSA modelinin verdiği sonuç $R^2=0.571$ değeriyle, w_L ve I_p değerleri bilindiğinde c değerinin orta derecede doğrulukla tahminlenebileceğini göstermektedir.

Plastik limit (w_p), plastisite indisi (I_p) ve kohezyon (c) değerleri arasındaki ilişkinin araştırıldığı onbirinci model incelendiğinde; w_p , I_p ve c arasındaki ilişkinin çoklu doğrusal regresyon analizinde $R^2=0.004$ değerini aldığı ve w_p , I_p ve c arasında çok

zayıf veya ihmal edilebilir bir ilişkinin olduğu görülmektedir. Diğer taraftan w_p ve I_p değerleri bilindiğinde c değerinin tahmin edilebilirliğinin araştırıldığı YSA modelinin verdiği sonuç $R^2=0.295$ değeriyle, w_p ve I_p değerleri bilindiğinde c değerinin zayıf derecede doğrulukla tahminlenebileceğini göstermektedir.

Standart penetrasyon testi (SPT), kayma dalgası hızı (V_s) ve kohezyon (c) değerleri arasındaki ilişkinin araştırıldığı onikinci model incelendiğinde; SPT, V_s ve c arasındaki ilişkinin çoklu doğrusal regresyon analizinde $R^2=0.015$ değerini aldığı ve SPT, V_s ve c arasında çok zayıf veya ihmal edilebilir bir ilişkinin olduğu görülmektedir. Diğer taraftan SPT ve V_s değerleri bilindiğinde c değerinin tahmin edilebilirliğinin araştırıldığı YSA modelinin verdiği sonuç $R^2=0.045$ değeriyle, SPT ve V_s değerleri bilindiğinde c değerinin çok zayıf derecede doğrulukla tahminlenebileceğini göstermektedir.

Standart penetrasyon testi (SPT), kayma dalgası hızı (V_s) ve kayma açısı (Φ) değerleri arasındaki ilişkinin araştırıldığı onüçüncü model incelendiğinde; SPT, V_s ve Φ arasındaki ilişkinin çoklu doğrusal regresyon analizinde $R^2=0.025$ değerini aldığı ve SPT, V_s ve Φ arasında çok zayıf veya ihmal edilebilir bir ilişkinin olduğu görülmektedir. Diğer taraftan SPT ve V_s değerleri bilindiğinde Φ değerinin tahmin edilebilirliğinin araştırıldığı YSA modelinin verdiği sonuç $R^2=0.048$ değeriyle, SPT ve V_s değerleri bilindiğinde Φ değerinin çok zayıf derecede doğrulukla tahminlenebileceğini göstermektedir.

Su içeriği (w_n), likit limit (w_L) ve kakohezyon (c) değerleri arasındaki ilişkinin araştırıldığı ondördüncü model incelendiğinde; w_n , w_L ve c arasındaki ilişkinin çoklu doğrusal regresyon analizinde $R^2=0.246$ değerini aldığı ve w_n , w_L ve c arasında zayıf bir ilişkinin olduğu görülmektedir. Diğer taraftan w_n ve w_L değerleri bilindiğinde c değerinin tahmin edilebilirliğinin araştırıldığı YSA modelinin verdiği sonuç $R^2=0.600$ değeriyle, w_n ve w_L değerleri bilindiğinde c değerinin orta derecede doğrulukla tahminlenebileceğini göstermektedir.

Su içeriği (w_n), plastisite indisi (I_p) ve kakohezyon (c) değerleri arasındaki ilişkinin araştırıldığı onbeşinci model incelendiğinde; w_n , I_p ve c arasındaki ilişkinin çoklu doğrusal regresyon analizinde $R^2=0.243$ değerini aldığı ve w_n , I_p ve c arasında zayıf bir ilişkinin olduğu görülmektedir. Diğer taraftan w_n ve I_p değerleri bilindiğinde c değerinin tahmin edilebilirliğinin araştırıldığı YSA modelinin verdiği sonuç $R^2=0.712$ değeriyle, w_n ve I_p değerleri bilindiğinde c değerinin güçlü derecede doğrulukla tahminlenebileceğini göstermektedir.

Su içeriği (w_n), plastik limit (w_p) ve kakohezyon (c) değerleri arasındaki ilişkinin araştırıldığı onaltıncı model incelendiğinde; w_n , w_p ve c arasındaki ilişkinin çoklu doğrusal regresyon analizinde $R^2=0.208$ değerini aldığı ve w_n , w_p ve c arasında zayıf bir ilişkinin olduğu görülmektedir. Diğer taraftan w_n ve w_p değerleri bilindiğinde c değerinin tahmin edilebilirliğinin araştırıldığı YSA modelinin verdiği sonuç $R^2=0.406$ değeriyle, w_n ve w_p değerleri bilindiğinde c değerinin orta derecede doğrulukla tahminlenebileceğini göstermektedir.

Su içeriği (w_n), standart penetrasyon testi (SPT) ve kakohezyon (c) değerleri arasındaki ilişkinin araştırıldığı onyedinci model incelendiğinde; w_n , SPT ve c arasındaki ilişkinin çoklu doğrusal regresyon analizinde $R^2=0.039$ değerini aldığı ve w_n , SPT ve c arasında çok zayıf bir ilişkinin olduğu görülmektedir. Diğer taraftan w_n ve SPT değerleri bilindiğinde c değerinin tahmin edilebilirliğinin araştırıldığı YSA modelinin verdiği sonuç $R^2=0.046$ değeriyle, w_n ve SPT değerleri bilindiğinde c değerinin çok zayıf derecede doğrulukla tahminlenebileceğini göstermektedir.

Su içeriği (w_n), standart penetrasyon testi (SPT) ve kakohezyon (c) değerleri arasındaki ilişkinin araştırıldığı onyedinci model incelendiğinde; w_n , SPT ve c arasındaki ilişkinin çoklu doğrusal regresyon analizinde $R^2=0.039$ değerini aldığı ve w_n , SPT ve c arasında çok zayıf bir ilişkinin olduğu görülmektedir. Diğer taraftan w_n ve SPT değerleri bilindiğinde c değerinin tahmin edilebilirliğinin araştırıldığı YSA modelinin verdiği sonuç $R^2=0.046$ değeriyle, w_n ve SPT değerleri bilindiğinde c değerinin çok zayıf derecede doğrulukla tahminlenebileceğini göstermektedir.

4 No.lu elek üzerinde kalan malzeme (#4), 200 No.lu elekten geçen malzeme (#200), likidite indisi (I_L) ve kohezyon (c) değerleri arasındaki ilişkinin araştırıldığı onsekizinci model incelendiğinde; #4, #200, I_L ve c arasındaki ilişkinin çoklu doğrusal regresyon analizinde $R^2=0.066$ değerini aldığı ve #4, #200, I_L ve c arasında çok zayıf bir ilişkinin olduğu görülmektedir. Diğer taraftan #4, #200 ve I_L değerleri bilindiğinde c değerinin tahmin edilebilirliğinin araştırıldığı YSA modelinin verdiği sonuç $R^2=0.459$ değeriyle, #4, #200 ve I_L değerleri bilindiğinde c değerinin orta derecede doğrulukla tahminlenebileceğini göstermektedir.

4 No.lu elek üzerinde kalan malzeme (#4), 200 No.lu elekten geçen malzeme (#200), likidite indisi (I_L) ve kayma açısı (Φ) değerleri arasındaki ilişkinin araştırıldığı ondokuzuncu model incelendiğinde; #4, #200, I_L ve Φ arasındaki ilişkinin çoklu doğrusal regresyon analizinde $R^2=0.074$ değerini aldığı ve #4, #200, I_L ve c arasında çok zayıf bir ilişkinin olduğu görülmektedir. Diğer taraftan #4, #200 ve I_L değerleri bilindiğinde Φ değerinin tahmin edilebilirliğinin araştırıldığı YSA modelinin verdiği sonuç $R^2=0.747$ değeriyle, #4, #200 ve I_L değerleri bilindiğinde Φ değerinin güçlü derecede doğrulukla tahminlenebileceğini göstermektedir. Ancak Φ 'nin istatistik özellikleri incelendiğinde en büyük değerinin 6, en küçük değerinin 0, aritmetik ortalamasının 1.01, en sık ölçülen değerinin 0, standart sapmasının 1.66 olduğu görülmektedir. Φ 'nin istatistik özellikleri göz önünde bulundurulduğunda YSA modelinin vermiş olduğu sonuç sağlıklı görünmemektedir.

Likit limit (w_L), plastic limit (w_p), plastisite indisi (I_p) ve kohezyon (c) değerleri arasındaki ilişkinin araştırıldığı yirminci model incelendiğinde; w_L , w_p , I_p ve c arasındaki ilişkinin çoklu doğrusal regresyon analizinde $R^2=0.006$ değerini aldığı ve w_L , w_p , I_p ve c arasında çok zayıf bir ilişkinin olduğu görülmektedir. Diğer taraftan w_L , w_p ve I_p değerleri bilindiğinde c değerinin tahmin edilebilirliğinin araştırıldığı YSA modelinin verdiği sonuç $R^2=0.501$ değeriyle, w_L , w_p ve I_p değerleri bilindiğinde c değerinin orta derecede doğrulukla tahminlenebileceğini göstermektedir.

Su içeriği (w_n), likit limit (w_L), plastisite indisi (I_p) ve kohezyon (c) değerleri arasındaki ilişkinin araştırıldığı yirmibirinci model incelendiğinde; w_n , w_L , I_p ve c

arasındaki ilişkinin çoklu doğrusal regresyon analizinde $R^2=0.065$ değerini aldığı ve w_n , w_L , I_p ve c arasında çok zayıf bir ilişkinin olduğu görülmektedir. Diğer taraftan w_n , w_L ve I_p değerleri bilindiğinde c değerinin tahmin edilebilirliğinin araştırıldığı YSA modelinin verdiği sonuç $R^2=0.358$ değeriyle, w_n , w_L ve I_p değerleri bilindiğinde c değerinin zayıf derecede doğrulukla tahminlenebileceğini göstermektedir.

Su içeriği (w_n), likit limit (w_L), plastik limit (w_p) ve kakohezyon (c) değerleri arasındaki ilişkinin araştırıldığı yirmiikinci model incelendiğinde; w_n , w_L , w_p ve c arasındaki ilişkinin çoklu doğrusal regresyon analizinde $R^2=0.065$ değerini aldığı ve w_n , w_L , w_p ve c arasında çok zayıf bir ilişkinin olduğu görülmektedir. Diğer taraftan w_n , w_L ve w_p değerleri bilindiğinde c değerinin tahmin edilebilirliğinin araştırıldığı YSA modelinin verdiği sonuç $R^2=0.547$ değeriyle, w_n , w_L ve w_p değerleri bilindiğinde c değerinin orta derecede doğrulukla tahminlenebileceğini göstermektedir.

Su içeriği (w_n), plastik limit (w_p), plastisite indisi (I_p) ve kakohezyon (c) değerleri arasındaki ilişkinin araştırıldığı yirmiüçüncü model incelendiğinde; w_n , w_p , I_p ve c arasındaki ilişkinin çoklu doğrusal regresyon analizinde $R^2=0.065$ değerini aldığı ve w_n , w_p , I_p ve c arasında çok zayıf bir ilişkinin olduğu görülmektedir. Diğer taraftan w_n , w_p ve I_p değerleri bilindiğinde c değerinin tahmin edilebilirliğinin araştırıldığı YSA modelinin verdiği sonuç $R^2=0.487$ değeriyle, w_n , w_p ve I_p değerleri bilindiğinde c değerinin orta derecede doğrulukla tahminlenebileceğini göstermektedir.

Su içeriği (w_n), likit limit (w_L), plastik limit (w_p), plastisite indisi (I_p) ve kakohezyon (c) değerleri arasındaki ilişkinin araştırıldığı yirmidördüncü model incelendiğinde; w_n , w_L , w_p , I_p ve c arasındaki ilişkinin çoklu doğrusal regresyon analizinde $R^2=0.247$ değerini aldığı ve w_n , w_L , w_p , I_p ve c arasında zayıf bir ilişkinin olduğu görülmektedir. Diğer taraftan w_n , w_L , w_p ve I_p değerleri bilindiğinde c değerinin tahmin edilebilirliğinin araştırıldığı YSA modelinin verdiği sonuç $R^2=0.649$ değeriyle, w_n , w_L , w_p ve I_p değerleri bilindiğinde c değerinin orta derecede doğrulukla tahminlenebileceğini göstermektedir.

Su içeriği (w_n), 4 No.lu elek üzerinde kalan malzeme (#4), 200 No.lu elekten geçen malzeme (#200), likit limit (w_L), plastic limit (w_p) ve kohezyon (c) değerleri arasındaki ilişkinin araştırıldığı yürmibeşinci model incelendiğinde; w_n , #4, #200, w_L , w_p ve c arasındaki ilişkinin çoklu doğrusal regresyon analizinde $R^2=0.102$ değerini aldığı ve w_n , #4, #200, w_L , w_p ve c arasında çok zayıf bir ilişkinin olduğu görülmektedir. Diğer taraftan w_n , #4, #200, w_L ve w_p değerleri bilindiğinde c değerinin tahmin edilebilirliğinin araştırıldığı YSA modelinin verdiği sonuç $R^2=0.641$ değeriyle, w_n , #4, #200, w_L ve w_p değerleri bilindiğinde c değerinin orta derecede doğrulukla tahminlenebileceğini göstermektedir.

Su içeriği (w_n), 4 No.lu elek üzerinde kalan malzeme (#4), 200 No.lu elekten geçen malzeme (#200), likit limit (w_L), plastic limit (w_p) ve kayma açısı (Φ) değerleri arasındaki ilişkinin araştırıldığı yürmi altıncı model incelendiğinde; w_n , #4, #200, w_L , w_p ve Φ arasındaki ilişkinin çoklu doğrusal regresyon analizinde $R^2=0.120$ değerini aldığı ve w_n , #4, #200, w_L , w_p ve Φ arasında çok zayıf bir ilişkinin olduğu görülmektedir. Diğer taraftan w_n , #4, #200, w_L ve w_p değerleri bilindiğinde Φ değerinin tahmin edilebilirliğinin araştırıldığı YSA modelinin verdiği sonuç $R^2=0.897$ değeriyle, w_n , #4, #200, w_L ve w_p değerleri bilindiğinde Φ değerinin güçlü derecede doğrulukla tahminlenebileceğini göstermektedir. Ancak Φ 'nin istatistik özellikleri incelendiğinde en büyük değerinin 6, en küçük değerinin 0, aritmetik ortalamasının 1.01, en sık ölçülen değerinin 0, standart sapmasının 1.66 olduğu görülmektedir. Φ 'nin istatistik özellikleri göz önünde bulundurulduğunda YSA modelinin vermiş olduğu sonuç sağlıklı görünmemektedir.

Birçok araştırmacının yaptığı çalışmalarda endeks özellikleri ve ince daneli zeminlerin kayma mukavemeti arasında yakın bir ilişki olduğu ileri sürülmüştür. Ancak, bu çalışmadaki doğrusal regresyon sonuçları Adapazarı zeminleri için endeks özelliklerinden kayma mukavemeti ve kohezyon tahmininin yapılamadığını göstermiştir. Çalışma alanının oldukça karmaşık akarsu jeolojisi ve toprak yapısı nedeniyle bu kabul edilebilir bir sonuçtur. Bu araştırma mahalle bazında yapıldığında daha başarılı sonuçlar alınabilir.

Bu çalışmanın diğer bölümünde, ince daneli zeminlerin kayma mukavemeti ve kohezyon değerlerini, geliştirilen farklı YSA modelleri ile tahmin edilmeye çalışılmıştır. Son zamanlarda, YSA modelleri geoteknik mühendisliğinin benzer problemleri için sıklıkla kullanılmaktadır. Bu çalışmada girdi parametresi; doğal su içeriği (w_n), likidite indisi (I_L), likit limit (w_L), plastik limit (w_p), plastisite indeksi (I_p) ve kayma dalgası hızı (V_s) olarak seçilen farklı YSA modelleri kullanılmıştır. Tüm modellerde elde edilen YSA sonuçları, deneysel değerleri ile karşılaştırılmıştır ve tahmin edilen değerler ile deneysel sonuçlarla orta derecede yakın bulunmuştur. Bu çalışmada Adapazarı ince daneli zeminlerine ait indeks özellikleri ile kayma mukavemeti ve kohezyon değerleri arasındaki ilişkinin çoklu regresyon analizine göre olan sonuçları ile karşılaştırıldığında YSA modellerinin oldukça iyi sonuçlar verdiği söylenebilir. Benzer YSA modelleri aynı giriş parametreleri kullanarak farklı çalışma alanları için geliştirilebilir. Adapazarı zeminlerinin karmaşık toprak yapısı ve derleme veri seti dikkate alındığında YSA modelleri tatmin edici derecede iyi sonuçlar vermiştir. Ancak, zemin indeks ve dinamik özelliklerinden Adapazarı ince daneli zeminleri için mekanik değerlerin tahmininin oldukça zor olduğu görülmektedir. Bu durum Adapazarı zeminleri gibi genç ve karmaşık alüvyonlar için kabul edilebilir bir sonuçtur.

KAYNAKLAR

- [1] Goh A. T. C., (1995). Modeling soil correlations using neural networks, ASCE, 9, 4, 275-278.
- [2] Ellis, G.W., Yao, C., Zhao, R. and Penumadu, D., (1995). Stress-Strain Modeling of sands using artificial neural networks, Journal of Geotech. Eng., ASCE, 121, 5, 42-435.
- [3] Cal, Y., (1995). Soil classification by neuralnetwork, Advances in Engineering Software, 22, 2, 95-97.
- [4] Basheer, I.A., Reddi, L. N., and Najjar, Y.M., (1996). Site characterization by neuronets: An application to the landfill sitting problem, Ground Water, 34, 610-617.
- [5] Rizzo, D.M., Lillys, T.P. and Dougherty, D.E., (1996). Comparisons of site characterization methods using mixed data, ASCE Geotechnical Special Publication, 58, 1, 157-179
- [6] Penumadu, D. and Zhao, R., (1994). Modeling drained triaxial compression behaviour of sand using ANN, Conf. Proccedings, ASCE.
- [7] Romero, S., and Pamukcu, S. (1996). Characterization of granular meterial by low strain dynamic excitation and ANN. Geotechnical Special Publication, ASTM-ASCE, 58, 2, 1134-1148.
- [8] Gribb, M. M., and Gribb, G. W. (1994). Use of neural networks for hydraulic conductivity determination in unsaturated soil, Proccedings., 2nd Int. Conf. Ground Water Ecology. J. A. Stanford ve H. M. Valett, eds., Bethesda, MD: Amer, Water Resources Assoc., 155-163.
- [9] Najjar, Y.M., Basheer, I.A., and Naouss, (1996). On the identification of compaction characteristics by neuronets, Computer and Geotechnics, 18, 3, 167-187.
- [10] Zhu, J. H., Zaman, M. M., and Anderson, S. A., (1998). Modelling of shearing behaviour of a residual soil with recurrent neural network. Int. of Journal Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 22, 8, 671-687.
- [11] Ghaboussi, J., and Sidarta, D.E., (1998). New nested adaptive neural networks for constitutive modeling, Computer and Geotechnics, 22, 1, 29-52.

- [12] Basheer, I.A., (2000). Selection of Methodology for Neural Network Modeling of Constitutive Hystereses Behavior of Soils, *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 15, 440-458.
- [13] Sivrikaya, O., Toğrol, E. ve Kömür, M., (2004). Yapay sinir ağları İle serbest basınç mukavemetinin (qu) belirlenmesi, *Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği Onuncu Ulusal Kongresi*, ITÜ, İstanbul.
- [14] Güllü, H., Pala, M. ve İyisan, R., (2007). Yapay sinir ağları ile en büyük yer ivmesinin tahmin edilmesi *Altıncı Ulusal Deprem Mühendisliği Konferansı*, 185-194
- [15] Sinha, S.K. and Wang, M.C., (2008). Artificial neural network prediction models for soil compaction and permeability, *Geotech Geol Eng*, 26, 47-64.
- [16] Sivakugan, N., Eckersley, J. D., and Li, H., (1998). Settlement predictions using neural Networks, *Australian Civil Engineering Transactions*, CE40:49-52.
- [17] Shahin, M.A., Maier, H.R., Jaksa, M.B., (2002). Predicting settlement of shallow foundations using neural networks, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, 128, 9, 785-793.
- [18] Meyerhof, G. G., (1965). Shallow foundations, *Journal Soil Mech. ve Found. Div.*, ASCE, 91(SM2), 21-31.
- [19] Schultze, E., and Sherif, G., (1973), Prediction of settlements from evaluated settlement observations for sand, *Proc., 8th Int. Conf. Soil Mech. & Found. Engrg.*, 1, 3, 225-230.
- [20] Schmertmann, J. H., Hartman, J. P., and Brown, P. B., (1978). Improved strain influence factor diagrams, *Journal Geotech. Engrg.*, ASCE, 104, GT8, 1131-1135.
- [21] Goh, A. T. C., (2002). Probabilistic neural network for evaluating seismic liquefaction potential, *Can. Geotech. Journal*, 39, 219-232.
- [22] Baziar, M.H. and Nilipour, N. (2003). Evaluation of liquefaction potential using neural-networks and CPT results, *Soil Dynamics and Eartquake Engineering*, 23, 631-636.
- [23] Kurup, P.U., and Griffin, E.P., (2006). Prediction of soil composition from CPT data using general regression neural network, *Journal of Computing in civil Engineering*, ASCE, 20, 4, 281-289.

- [24] Yıldırım, E., Sertkaya, C. and Karavul, C. 'Shear Wave Velocity Estimation By Using Fuzzy Logic, Artificial Neural Networks and Neuro-Fuzzy Models', Elec Lett Sci Eng , Vol. 3(1) , (2007), 1-9
- [25] Kramer, S.L., 1996, Geotechnical earthquake engineering, Prentice-Hall Inc., USA, ISBN: 0-13-374943-6.
- [26] Telford, W.M., Geldart, L.P. and Sheriff, R.E., 1990, Applied geophysics, Cambrige University Press, New York, ISBN: 0-521-32693-1.
- [27] Reynolds, J.M., 1997, An introduction to applied and environmental geophysics, John Wiley and Sons, England, ISBN: 0-471-96802-1.
- [28] Kurtuluş, C., 2010, Sismik araştırmalar teori ve uygulama, Özlem matbaası, Kocaeli.
- [29] Novotny, O., 1999, Seismic surface waves, Lecture notes for post-graduate studies, Instituto de fisica, Instituto de geociencias.
- [30] Graff, K.F., 1975, Wave motion in elastic solids, Dower publication, New York, ISBN: 0-486-66745-6.
- [31] Richart, F.E. Hall Jr, J.R. and Woods, R.D., 1970, Vibrations of soils and foundations, Prentice Hall, New Jersey, ISBN: 13-941716-8.
- [32] Aki, K. and Richards P.G., 1980, Quantitative seismology, W.H.Freeman, San Fransisco, ISBN: 0-935702-96-2..
- [33] Kanlı, A.I., 2010, Integrated approach for surface wave analysis from near-surface to bedrock, Advances in near-surface seismology and ground-penetrating radar, In: Miller, R. D., Bradford, J.H., Holliger, K. (ed.), Chapter 29, SEG, Oklahoma, USA, ISBN: 978-0-931830-41-9, 461-476.
- [34] Kanlı, A.İ., Toros, E., Pronay, Z., Neducza, B., Tildy, P., Hermann, L., 2006, Colculation of VS30 avarege shear wave velocity and its use for geotechnical purpose in UBC-Eurocode-8 internatioanl solid classification, The 17th international geophysical congress & exhibition of Turkey, 14-17 November 2006 Ankara.
- [35] Martin A.J. Shawver J.B. and Diehl J.G., 2006, Combined use of active and passive surface-wave techniques for cost effective UBC/IBC site classification, Proceedings of the 8th national conference on earthquake engineering, 18-22 April 2006 San Fransisco, 1013.
- [36] Lavergne, M., 1986, Methodes sismiques, Editions Technip, Paris, ISBN: 2710805146.

- [37] Redpath, B.B., 1973, Seismic refraction exploration for engineering site investigations, Technical Rep. No. TR E-73-4, U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station Explosive Excavation Research Laboratory, Livermore, Calif.
- [38] Anomohanran, O., 2013, Seismic refraction method: a technique for determining the thickness of stratified substratum, American journal of applied sciences, 10 (8), 857-862.
- [39] Louie J.N., 2001, Faster, better shear-wave velocity to 100 meters depth from refraction microtremor arrays, Bulletin of the seismological society of america, 91 (2), 347- 364.
- [40] Park, C.B., and Miller, R.D., 2008, Roadside passive multichannel analysis of surface waves (MASW), Journal of environmental & engineering geophysics, 13 (1), 1- 11.
- [41] Park, C.B. and R.D. Miller, 2005c, Multichannel analysis of passive surface waves modeling and processing schemes, Proceedings of the Geo-Frontiers conference, 23-26 January Austin Texas.
- [42] Cox, B.R., Wood, C.M., 2010, A comparison of linear-array surface wave methods at a soft soil site in the mississippi embayment, Geo florida, 20-24 February 2010 Florida, USA, American society of civil engineers, ISBN: 978-0-7844-1095-0, 1369-1378.
- [43] Kanıt, R., 2003, Temel İnşaatı, Gazi Kitabevi, Ankara 1-90s.
- [44] Ulusay, R., 2001. Uygulamalı Jeoteknik Bilgiler, 2. Baskı, TBMMOB Jeoloji Mühendisleri Odası Yayınları, No: 38, Ankara, 385s.
- [45] Özaydin, K., 1997, Zemin Mekaniği, Birsen Yayınevi, İstanbul, 140-166s.
- [46] Önalp, A., 2002. Geoteknik Bilgisi I. Birsen Yayınevi Ltd.Şti., İstanbul.
- [47] Güven, C., 2007. Yüksek Plastisiteli Bir Kilde Kum Miktarının Kayma Mukavemetine Etkileri. Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü yüksek lisans tezi, Sakarya.
- [48] Genç, D., Zemin Mekaniği ve Temeller. İçinde: Kayma Direnci. TMMOB Jeoloji Mühendisleri Odası Yayınları, 335 – 343, 2011.
- [49] Emre, Ö., Erkal, T., Tchepalyga, A., Kazancı, N., Keçer, M., Ünay, E., Doğu Marmara Bölgesinin Neojen-Kuvaternerdeki Evrimi, MTA Dergisi 120, 233-258, 1998.

- [50] www.hidro.hacettepe.edu.tr/duyurular/hid351F12HLD/zamanced.jpg Erişim Tarihi:19.05.2016.
- [51] Texier, C., *Asie Mineure*, Paris, 1862.
- [52] Tchihatcheff, P., *Asie Mineure, Geologie*, I, II, III, Paris, 1867-1869.
- [53] Meriç, E., *Marmara Denizi Araştırmaları, Workshop-III, Deniz Jeolojisi Ulusal Araştırma Programı, Tübitak-MTA*, 1997.
- [54] Rish, C., *Der Sabandjasee und Seine Umgebund*, Gotha, 1909.
- [55] Peck, W., *Die Tectonischen Gründzüge Westkleinasiens*, Stuttgart, 1918.
- [56] Pfannenstiel, M., *Die diluvialen Entwicklungsstadien und die Urgeschichte von Dardanellen, Marmarameer und Bosphorus, DiluvialGeologie und Klima, Geologische Rundschau, Band 3/4, Helf 7/8*, Stuttgart, 1944.
- [57] Lahn, E., *Türkiye Göllerinin Jeolojisi ve Jeomorfolojisi Hakkında Bir Tür Etüt*, MTA Enst. Yayınları, Seri B, No: 12, Ankara, 1948.
- [58] Erinç, S., *Sapanca Gölünün Derinlik Haritası ve Morfometrisi*, Türk Coğrafya Dergisi, Sayı XI-XII, Ankara, 1949.
- [59] İnandık, H., *Adapazarı Ovası ve Çevresinin Joemorfolojik Etüdü*, İstanbul, 1953.
- [60] Bilgin, T., *Adapazarı Ovası ve Sapanca Oluğunun Alüvyal Morfolojisi ve Kuvaternerdeki Jeoforfolojik Tekamülü*, İst. Üni. Edebiyat Fak. Yayınları, No: 2572, İstanbul, 1984.
- [61] Gökçen, R., *Sakarya ve Marmara Bölgesi*, Özyürek Yayınları, İstanbul, 1990.
- [62] Erken, A., *The Role of Geotechnical Factors on Observed Damage in Adapazarı*, XV ICMGE Satelite Conference on Lessons Learned from Recent Strong Earthquakes, İstanbul, 2001.
- [63] Tsukamoto, Y., Ishihare, K., Nakazawa, H., Yasuda, S., Horie, Y., *Soil Properties of the Deposits in Adapazarı from Laboratory Tests*, XV ICSMGE TC+ Satellite Conference on LEssons Learned from REcend Strong Earthquakes, İstanbul, 2001.
- [64] Kiku, H., Yoshido, N., Yasuda, S., Irisawa, T., Nakazawa, H., Shimizu, Y., Ansal, A., Erken, A., *In-Situ Penetration Test and Soil Profiling in Adapazarı, Turkey*, XV ICSMGE TC4 Satellite Conference on Lessons Learned from Recent Strong Earthquakes, İstanbul, 2001.

- [65] MTA, Sakarya İlinin Çevre Jeolojisi ve Doğal Kaynakları, MTA Genel Müdürlüğü Jeoloji Etütleri Dairesi, Ankara, 1998.
- [66] Erken, A., Okan, R., Erdem, A., 17 Ağustos 1999 Kocaeli Depreminde Adapazarında Yeralan Zeminlerin Davranışı, V. Ulusal Deprem Müh. Konferansı, İstanbul, 2003.
- [67] Bol, E., Adapazarı Zeminlerinin Geoteknik Özellikleri, Doktora Tezi, SAÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü, 2003.
- [68] Anderson D.R., Sweeney D.J., Williams T.A., 1981.Introduction to Statistical to: an applications approach , Publishing Company, pp.601, New York.
- [69] Gujarati D.N., 2005.Temel ekonometri, (Çev.Ü.Şenesen ve G. Şenesen), LiteratürYayıncılık, s.850, İstanbul.
- [70] Johnson R.A., Wichern D.W., 1998.Applied multivariate statistical analyses, Prentice Hall, pp. 816, New Jersey.
- [71] Kılıçbay A., 1980.Ekonometrinin temelleri, Has Kurtulmuş matbaası, s.677, İstanbul.
- [72] Koutsoyiannis A., 1992.Ekonometri kuramı, (Çev. Ü.Şenesen ve G. Şenesen), Teknik Üniversite matbaası, s.688, İstanbul.
- [73] Çömlekçi N., 1998.Temel istatistik ilke ve teknikleri, Bilim Teknik Yayınevi, s.500, Eskişehir.
- [74] Draper N.R., Smith H., 1998. Applied regression analysis, John Wiley&Sons,Inc., New York.
- [75] Haykin, S., Neural Networks: A Comprehensive Foundation, New York: Macmillan College Publishing Co., pg. 696, ISBN: 9780023527616, 1994.
- [76] Öztemel, E., Yapay Sinir Ağları, İstanbul, Papatya Yayıncılık, s. 238, 2003.
- [77] Rosenblatt, F., The Perceptron: A probabilistic model for information storage and organization in the brain. Psychological Review, Vol. 65, pp. 386-408, 1958.
- [78] Widrow, B. and Hoff, M. E., Adaptive switching circuits, Ire Wescon Convention Record, 4, pp. 96-104, 1960.
- [79] Kohonen, T., Self-organized formation of topologically correct feature maps. Biological Cybernetics, 43, pp. 59-69, 1982.

- [80] Rumelhart, D. E., Hinton, G. E. and Williams, R. J., Learning internal representations by error propagation. In D.,E. Rumelhart and J.L. McClelland, eds, Vol 1, Chapter 8, Cambridge, MA: MIT Press., 1986.
- [81] Hagan, M. T., Demuth, H. B. and Beale, M., Neural Network Design, PWS Publishing Company, Boston, 1996.
- [82] Kulluk, S., Karınca Koloni Optimizasyonu ile Yapay Sinir Ağlarından Kural Çakarımı, Doktora tezi, Erciyes Üniversitesi, FBE Enstitüsü, Kayseri, 2009.
- [83] Sağiroğlu, Ş., Beşdok, E., Erler, M., Mühendislikte Yapay Zeka Uygulamaları-I, Ufuk Kitap Kırtasiye-Yayıncılık Tic. Ltd., 2003.
- [84] Elmas, Ç., Yapay Sinir Ağları (Kuram, Mimari, Uygulama), Ankara, Seçkin Yayıncılık, s. 193, 2003.
- [85] Öztemel, E., Yapay Sinir Ağları, Papatya Yayıncılık, İstanbul, ISBN 9789756797396, s. 232, 2006.

ÖZGEÇMİŞ

Mustafa İLHAN, 07.04.1984 de Adapazarı'nda doğdu. İlk, orta ve lise eğitimini Adapazarı'nda tamamladı. 2002 yılında Ali Dilmen Lisesi'nden mezun oldu. 2004 yılında başladığı Sakarya Üniversitesi Jeofizik Mühendisliği Bölümü'nü 2009 yılında bitirdi. 2013 – 2015 yılları arasında çeşitli firmalarda iş güvenliği uzmanı olarak çalıştı. Şu anda T.C. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, Mekansal Planlama Genel Müdürlüğü, Yer Bilimsel Etüt Dairesi'nde jeofizik mühendisi olarak görev yapmaktadır.