T.C.

YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

SIVILAŞMA KAYNAKLI YANAL YAYILMALARIN YAPAY SİNİR AĞLARI İLE TAHMİNİ

Okan ÇETİNKAYA

YÜKSEK LİSANS TEZİ

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Geoteknik Programı

Danışman

Doç. Dr. Pelin TOHUMCU ÖZENER

Şubat, 2022

T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

SIVILAŞMA KAYNAKLI YANAL YAYILMALARIN YAPAY SİNİR AĞLARI İLE TAHMİNİ

Okan ÇETİNKAYA tarafından hazırlanan tez çalışması 23.02.2022 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı Geoteknik Programı **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Doç. Dr. Pelin TOHUMCU ÖZENER
Yıldız Teknik Üniversitesi
Danışman

Jüri Üyeleri

Doç. Dr. Pelin TOHUMCU ÖZENER, Danışman
Yıldız Teknik Üniversitesi _____

Dr. Öğr. Üyesi Murat Ergenekon SELÇUK, Üye
Yıldız Teknik Üniversitesi _____

Doç. Dr. Mustafa Kubilay KELEŞOĞLU, Üye
İstanbul Üniversitesi - Cerrahpaşa _____

Danışmanım Doç. Dr. Pelin TOHUMCU ÖZENER sorumluluğunda tarafımca hazırlanan Sıvılaşma Kaynaklı Yanal Yayılmaların Yapay Sinir Ağları ile Tahmini başlıklı çalışmada veri toplama ve veri kullanımında gerekli yasal izinleri aldığımı, diğer kaynaklardan aldığım bilgileri ana metin ve referanslarda eksiksiz gösterdiğimi, araştırma verilerine ve sonuçlarına ilişkin çarpıtma ve/veya sahtecilik yapmadığımı, çalışmam süresince bilimsel araştırma ve etik ilkelerine uygun davrandığımı beyan ederim. Beyanımın aksinin ispatı halinde her türlü yasal sonucu kabul ederim.

Okan ÇETİNKAYA

İmza

Aileme ithafen

TEŞEKKÜR

Yuksek lisans öğrenimim ve tez çalışmam boyunca hiçbir zaman destek ve yardımlarını esirgemeyen, inşaat mühendisliğinin dışında kendime önemli bir yetenek daha kazanmamı sağlayan çok değerli hocam Doç. Dr. Pelin TOHUMCU ÖZENER'e en içten dileklerimle teşekkür ederim.

Sadece tez çalışmamda değil hayatımın her aşamasında desteğini gösteren; vazgeçtiğim, kendime güvenemediğim zamanlarda bile benden vazgeçmeyen Batuhan ÇAKIR'a en içten teşekkürlerimi ederim.

Tez çalışmam boyunca desteklerinden dolayı başta Ece KARACA olmak üzere değerli çalışma arkadaşlarıma da teşekkürü bir borç bilirim.

Ve son olarak emeklerini hiçbir zaman esirgemeyen, yalnızca eğitimimde değil hayatımın her aşamasında beni destekleyen canım aileme teşekkür ve minnetimi sunmak isterim.

Okan ÇETİNKAYA

İÇİNDEKİLER

SİMGE LİSTESİ vii
KISALTMA LİSTESİ x
ŞEKİL LİSTESİ xii
TABLO LİSTESİ xiv
ÖZET xv
ABSTRACT xvii
1 GİRİŞ 1
1.1 Literatür Özeti . . . 1
1.2 Tezin Amacı . . . 1
1.3 Hipotez . . . 1
1.4 Sıvılaşmanın Tanımı . . . 2
1.5 Sıvılaşma Duyarlılığını Etkileyen Faktörler . . . 3
1.5.1 Zemin Özelliklerinin Sıvılaşmaya Olan Etkisi . . . 4
1.5.2 Deprem Özelliklerinin Sıvılaşmaya Olan Etkisi . . . 8
1.6 Sıvılaşma Analiz Yöntemleri . . . 9
1.6.1 Seed ve Idriss (1971) Basitleştirilmiş Sıvılaşma Analizi Yöntemi 10
1.6.2 Youd vd. (2001) Sıvılaşma Analizi Yöntemi . . . 11
1.6.3 Boulanger ve Idriss (2014) Sıvılaşma Analizi Yöntemi . . . 19
1.7 Sıvılaşma Şiddeti İndeksi (LSI) . . . 20
1.8 Sıvılaşma Hasarı . . . 21
1.8.1 Bina Altında Meydana Gelebilecek Oturmalar . . . 21
1.8.2 Zeminin Taşıma Gücünü Kaybetmesi . . . 21
1.8.3 Yanal Yayılma . . . 23
1.9 Sıvılaşma ve Olası Hasar Tahmininde Kullanılabilecek Diğer Parametreler 23
1.9.1 Kayma Dalgası Hızı . . . 23
1.9.2 En Büyük Yer Hızı (PGV) . . . 24
1.9.3 Arias Şiddeti (I_a) . . . 25
1.9.4 Kümülatif Mutlak Hız (CAV-CAV_5) . . . 26
1.9.5 PGV^2/PGA . . . 27
2 SIVILAŞMA KAYNAKLI YANAL YAYILMALAR 28
2.1 Yanal Yayılmanın Tanımı . . . 28
2.2 Yanal Yayılmayı Etkileyen Faktörler . . . 29
2.2.1 Sıvılaşan Tabaka Kalınlığı . . . 30
2.2.2 Topoğrafik Eğim ve Serbest Yüzey . . . 30
2.2.3 İnce Dane İçeriği . . . 32

2.3 Sıvılaşma Kaynaklı Yanal Yayılmaların Tahmininde Kullanılan Hesap Yöntemleri 33
2.3.1 Çoklu Regresyon Analizine Dayanan Yöntemler 34
2.3.2 Yapay Zekaya Dayanan Yöntemler 38
2.3.3 Maksimum Olabilirliğe Dayanan Yöntemler 56
3 YAPAY SİNİR AĞLARI 59
3.1 Makine Öğrenmesi ve Yapay Sinir Ağları (YSA) 59
3.2 Yapay Sinir Ağlarının Tarihçesi 60
3.3 Yapay Sinir Ağlarının Yapısı 61
3.4 Model Tahminlerinin Değerlendirilmesi 64
3.5 Derin Öğrenmede Eniyileme 65
3.6 Derin Öğrenmede Yaygın Kullanılan Kütüphaneler 66
4 VERİ SETİNİN OLUŞTURULMASI 67
5 MODELİN OLUŞTURULMASI VE ANALİZLER 87
5.1 Keşifçi Veri Analizi 87
5.2 Modelin Oluşturulması 93
5.3 Analiz Sonuçları 95
5.4 Adapazarı Depremine Ait Verilerin Doğrulanması 95
6 SONUÇLAR VE ÖNERİLER 103
KAYNAKÇA 106
TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR 113

SİMGE LİSTESİ

$CRR_{7.5}$	7.5 büyüklüğündeki deprem için Çevrimsel Direnç Oranı
N_{arazi}	Arazide elde edilen ham Standart Penetrasyon Testi vuruş sayısı
I_a	Arias şiddeti
r_u	Artık boşluk suyu basıncı
R^2	Belirleme katsayısı
u	Boşluk suyu basıncı
C_E	Çekiç enerji düzeltme katsayısı
T_d	Deprem kaydının toplam süresi
M	Depremin büyüklüğü
R_0	Depremin büyüklüğüne bağlı sabit
h	Depremin fiktif hiposantr derinliği
M_L	Depremin lokal büyüklüğü
M_w	Depremin moment büyüklüğü
σ'_v	Düşey efektif gerilme
V_{s1}	Düzeltilmiş kayma dalgası hızı
F_{15}	Düzeltilmiş SPT vuruş sayısı $N_{1,60} \leq 15$ olan, sıvılaşan zemin tabakalarının ince dane içeriği
T_{15}	Düzeltilmiş SPT vuruş sayısı $N_{1,60} \leq 15$ olan, sıvılaşan zemin tabakalarının kümülatif kalınlığı
$D50_{15}$	Düzeltilmiş SPT vuruş sayısı $N_{1,60} \leq 15$ olan, sıvılaşan zemin tabakalarının ortalama dane çapı
C_N	Efektif örtü yükü düzeltme katsayısı
μ	Elek çapı
z_{cr}	En kritik sıvılaşan tabakanın derinliği
a_y/a_{max}	En kritik zemin seviyesinin kaymaya karşı güvenlik katsayısı
ER	Enerji oranı (Energy Ration)
$q_{c1,Ncs}$	Eşdeğer temiz kum direnci

F_N, F_R	Fay tipine bağlı olarak değişen indikatör katsayılar
π	Pi sayısı
r_d	Gerilme azaltma faktörü
F	İnce dane içeriği
b	İnce dane içeriği için temiz kum SPT düzeltme katsayısı
a	İnce dane içeriği için temiz kum SPT düzeltme katsayısı
V_s	Kayma dalgası hızı
γ	Kayma şekil değiştirmesi
G	Kesme modülü
kPa	Kilo Paskal
C_B	Kuyu çapı düzeltme katsayısı
τ_{max}	Maksimum kayma gerilmesi
a_{max}	Maksimum yer ivmesi
R^*	Modifiye uzaklık
C_S	Numune alıcı kılıf düzeltme katsayısı
D50	Ortalama dane çapı
$N_{1,60}$	Örtü yükü ve yüzde atmış enerji düzeltmesi yapılan Standart Penetrasyon Testi vuruş sayısı
$N_{1,60,cs}$	Örtü yükü ve yüzde atmış enerji düzeltmesi yapılan Standart Penetrasyon Testi vuruş sayısının eşdeğer temiz kum değerine düzeltilmiş hali
T	Periyot
D_r	Rölatif sıkılık
W	Serbest yüzey oranı
L	Serbest yüzeyin alt ucundan deplasman vektörüne kadar olan mesafe
H	Serbest yüzeyin yüksekliği
R	Sismik kaynağa uzaklık
$\phi_{eqv,liq}'$	Sıvılaşabilen veya potansiyel sıvılaşabilen zeminin eşdeğer mobilize içsel sürtünme açısı
H	Sıvılaşan tabaka kalınlığı

NT	Sıvılaşmayan üst tabaka kalınlığı
N	SPT vuruş sayısı
C_R	Tij uzunluğu düzeltme katsayısı
σ_v	Toplam düşey gerilme
S	Topoğrafik eğim
β	Topoğrafik eğim açısı
θ	Topoğrafik eğim veya sıvılaşan zemin tabakasının tabanının eğiminden büyük olanı
D	Yatay doğrultudaki kalıcı deformasyon
a_y	Yenilme ivmesi
g	Yerçekimi ivmesi
K_α	Yüksek statik kayma gerilmesine maruz kalan zemin katmanları için düzeltme katsayısı
K_σ	Yüksek statik normal gerilmeye maruz kalan zemin katmanları için düzeltme katsayısı
N_{60}	Yüzde 60 enerji aktarımı için düzeltmiş Standart Penetrasyon Testi vuruş sayısı
z	Yüzeyden olan derinlik
I_c	Zemin davranış tipi indeksi
S_C, S_D	Zemin tipine bağlı olarak değişen indikatör katsayılar
ϕ'	Zeminin drenajsız koşullardaki içsel sürtünme açısı
c'	Zeminin drenajsız koşullardaki kohezyonu
τ	Zeminin kayma dayanımı

KISALTMA LİSTESİ

ANFIS	Uyarlanabilir Nöro Bulanık Girişim Sistemi (Adaptive Neuro Fuzzy Inference System)
ANOVA	Varyans analizi (Analysis of Variance)
BF	Temel fonksiyon (Basis function)
BPT	Becker Penetrasyon Testi
CAV	Kümülatif mutlak hız
CAV_5	5 cm/sn^2'den küçük amplitüdlerin elimine edilmesiyle elde edilen kümülatif mutlak hız
CPT	Koni Penetrasyon Testi
CRR	Çevrimsel Direnç Oranı (Cyclic Resistance Ratio)
CSR	Çevrimsel Gerişim Oranı (Cyclic Stress Ratio)
DT	Karar ağacı (Decision tree)
FC	İnce Dane İçeriği (Fines Content)
GELCH	Büyük Deprem Yanal Yayılma Vaka Tarihi (Great Earthquake Lateral Spread Case History)
GMDH	Taşıma verilerin grup yöntemi (Group method of data handling)
GP	Kötü derecelenmiş çakıl
GS	Güvenlik sayısı
GS	Kumlu çakıl
GW	İyi derecelenmiş çakıl
GWT	Yeraltı su seviyesi (Ground water table)
İTO	İnce Tane Oranı
LSI	Sıvılaşma Şiddeti Endeksi (Liquefaction Severity Index)
MAE	Ortalama mutlak hata (Mean absolute error)
MARS	Multivariate Adaptive Regression Splines, Çok Değişkenli Uyarlanabilir Regresyon Eğrileri
ML	Düşük plastisiteli silt
MLP	Çok Katmanlı Algılayıcı (Multi Layer Perceptron)

MLR	Çoklu Doğrusal Regresyon (Multi Linear Regression)
MSE	Ortalama kareler hatası (mean squared error)
MSF	Deprem büyüklük ölçekleme faktörü (Moment Scaling Factor)
MT	Model ağacı (Model Tree)
NEFLAS	Sıvılaşma kaynaklı Yanal Yayılımın Nöro-Bulanık Tahmini
PGA	En büyük yer ivmesi (Peak Ground Acceleration)
PGV	En büyük yer hızı (Peak Ground Velocity)
RMSE	Ortalama karelerin hatasının karekökü (Root mean squared error)
RSM	Tepki Yüzey Yöntemi (Response Surface Method)
SC	Killi Kum
SM	Siltli kum
SP	Kötü derecelenmiş kum
SPT	Standart Penetrasyon Testi
SPT-N_1	Örtü yükü düzeltmesi yapılan Standart Penetrasyon Testi vuruş sayısı
SW	İyi derecelenmiş kum
YSA	Yapay Sinir Ağları

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 1.1 Sıvılaşma tetiklenme mekanizmasının diyagramı 3
Şekil 1.2 a) Düşük, b) Yüksek eşşekillilik açısından en kolay ve potansiyel sıvılaşma aralıkları 6
Şekil 1.3 Depremin moment büyüklüğü-dışmerkez uzaklığı ve sıvılaşma arasındaki ilişki 9
Şekil 1.4 Depremin moment büyüklüğü-dışmerkez uzaklığı ve sıvılaşma arasındaki ilişki 9
Şekil 1.5 Derinlik değerlerine göre değişen r_d (gerilme azaltma faktörü) değerleri grafiği (ortalama değer çizgileri ile) 11
Şekil 1.6 7.5 büyüklüğündeki depremlerden derlenmiş sıvılaşma vakalarından elde edilen SPT-temiz kum eğrisi 13
Şekil 1.7 CSR ve sıvılaşmaya neden olacak çevrim sayısı arasındaki ilişkiyi gösteren temsili grafik 17
Şekil 1.8 Mühendislik uygulamalarında K_σ seçiminde kullanılabilecek önerilen eğri 19
Şekil 1.9 Sıvılaşma nedeniyle oluşan bina oturması mekanizmaları 22
Şekil 1.10 1964 Niigata depremi nedeniyle mukavemetini kaybetmiş zeminde meydana gelen hasar 22
Şekil 1.11 Çevrimsel gerilme oranı ve V_{s1} arasındaki ilişki 24
Şekil 1.12 T=0.5 ve T=1 s periyot için deplasman-I_a ilişkisi 26
Şekil 2.1 (a) düşük eğilim, serbest yüzeyin olmadığı (b) serbest yüzeyin olduğu durumda sıvılaşma kaynaklı yanal yayılmalar 28
Şekil 2.2 Yanal yayılmanın genel karekteristiğini gösteren diyagram 29
Şekil 2.3 O'Rourke ve Lane (1989)'den alınan yanal yayılma nedeniyle boru hatlarında oluşan hasarlar 29
Şekil 2.4 (a) geçirimli (b) geçirimsiz bir üst örtü tabakasında yanal yayılma ile oluşacak yerdeğiştirmeyi gösteren zemin kesiti 31
Şekil 2.5 Serbest yüzeyin varlığında pozitif ve negatif eğim durumlarında serbest yüzey faktörleri 35
Şekil 2.6 Youd vd. (2002) çoklu doğrusal regresyon yönteminin uygulanabileceği geçerli F_{15} ve $D50_{15}$ değerleri 39
Şekil 2.7 Genetik programlama ve çoklu doğrusal regresyon ile elde edilen sonuçların karşılaştırılması 42
Şekil 2.8 Baziar ve Azizkandi (2013)'ın genetik programlama analizleri ile Youd vd. (2002) çoklu doğrusal regresyon analizlerinin karşılaştırılması 45

Şekil 2.9 Basit bir MARS örneğinde düğüm ve doğrusal segmentler 45
Şekil 2.10 MARS modelinde a) serbest yüzey b) hafif eğim durumunda girdi parametrelerinin rölatif önemleri 47
Şekil 2.11 ANN-MLP'nin akış şeması 48
Şekil 2.12 Basit bir ANFIS yapısı 49
Şekil 2.13 Yanal yayılmaların kestirimi için formül seçimi akış şeması 50
Şekil 2.14 Genetik algoritmalı GMDH için belirlenen optimal yapı 53
Şekil 2.15 Genetik algoritmalı GMDH'nin parametrik analizi (a-d) 54
Şekil 2.16 Genetik algoritmalı GMDH'nin parametrik analizi (e-h) 55
Şekil 3.1 Yapay zekâ, makine öğrenmesi ve derin öğrenme arasındaki ilişki . . 60
Şekil 3.2 1970 öncesi yapay sinir ağları çalışmaları 61
Şekil 3.3 1970 sonrası yapay sinir ağları çalışmaları 61
Şekil 3.4 Aktivasyon fonksiyonlarının grafikleri 63
Şekil 3.5 a) İleri beslemeli b) geri beslemeli yapay sinir ağları 64
Şekil 3.6 Model kapasitesini gösterir şekiller (a) Yetersiz uydurma, (b) Uygun kapasite ve (c) Aşırı uydurma 66
Şekil 4.1 Sıvılaşma ve yanal yayılmaların gözlendiği bölgeler 69
Şekil 4.2 Sıvılaşma hasar derecelerini gösterir görsel 70
Şekil 4.3 Dallington Bölgesi'nde yer alan BH-1785 numaralı sondaj logunun etrafına çizilen tampon bölge 71
Şekil 4.4 BH-1837 numaralı sondaj logunda yapılan deneyler 72
Şekil 4.5 Christchurch zeminleri için D50 ve FC arasındaki ilişki 72
Şekil 4.6 Sıvılaşma potansiyelinin değerlendirilmesi için oluşturulan tablo . . 74
Şekil 5.1 Bir yapay zekâ uygulaması için genel akış şeması 87
Şekil 5.2 Keşifçi veri analizi süreci 88
Şekil 5.3 Faylanma yanal deplasman miktarı arasındaki ilişkiyi anlatan keman grafiği (violin plot) 91
Şekil 5.4 Tüm veri setinde yer alan gözlem değerlerinin dağılımlarını gösteren çubuk grafiği 92
Şekil 5.5 Değişkenlerin korelasyon değerlerini gösteren ısı haritası 93
Şekil 5.6 (a) Veri Seti I için eğitim, (b) Veri Seti I için test, (c) Veri Seti II için eğitim ve (d) Veri Seti II için test analiz sonuçları 96

TABLO LİSTESİ

Tablo 1.1 Rölatif sıkılık-sıvılaşma potansiyeli arasındaki ilişki 5
Tablo 1.2 ER ve CE enerji düzeltme katsayısının değişim aralığı 15
Tablo 1.3 Çeşitli araştırmacıların MSF için önerileri 18
Tablo 2.1 MARS modelindeki BF değerleri 46
Tablo 2.2 Parametrelerin yanal yayılma üzerindeki önemi 51
Tablo 2.3 Sıvılaşma kaynaklı yanal yayılma tahmininde yapay zekaya dayanan yöntemlerin özeti 57
Tablo 2.4 Analiz yöntemlerinde kullanılan depremler 58
Tablo 4.1 Literatürde yer alan çalışmalarda kullanılan veri setlerindeki toplam veri adetleri 67
Tablo 4.2 2010 Darfield ve 2011 Christchurch Depremlerinde sıvılaşan bölgelerden toplanan zeminlerin ince dane içerik bilgileri 73
Tablo 4.3 Yapay sinir ağları modelinde kullanılmak üzere derlenen nihai veri seti 75
Tablo 5.1 Veri setinde yer alan değişkenlerin özellikleri 89
Tablo 5.2 Deprem özelliklerine ait parametrelerin minimum, ortalama, maksimum ve standart sapma değerleri 97
Tablo 5.3 Zemin özelliklerine ait parametrelerin minimum, ortalama, maksimum ve standart sapma değerleri 98
Tablo 5.4 Arazi özelliklerine ait parametrelerin minimum, ortalama, maksimum ve standart sapma değerleri 99
Tablo 5.5 Yerdeğiştirme miktarının depremlere göre minimum, ortalama, maksimum ve standart sapma değerleri 100
Tablo 5.6 Değişkenlere ait korelasyon değerleri 100
Tablo 5.7 Model mimarisine ilişkin detaylar 101
Tablo 5.8 Analiz sonuçları 101
Tablo 5.9 Adapazarı Depremine ait verilerin doğrulanmasına ilişkin elde edilen sonuçlar 101
Tablo 5.10 Çalışmanın sonuçlarını da içeren, sıvılaşma kaynaklı yanal yayılma tahmininde yapay zekaya dayanan yöntemlerin özeti 102

ÖZET

Sıvılaşma Kaynaklı Yanal Yayılmaların Yapay Sinir Ağları ile Tahmini

Okan ÇETİNKAYA

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı
Yüksek Lisans Tezi

Danışman: Doç. Dr. Pelin TOHUMCU ÖZENER

Deprem gibi dinamik bir etkinin kohezyonsuz veya düşük kohezyonlu suya doygun zeminlere etkimesi neticesinde oluşabilen sıvılaşma, birçok önemli problemi de beraberinde getirebilmektedir. Bu problemlerden biri olan yanal yayılmalar 2010-2011 Canterbury Deprem Sekansında görüldüğü gibi oldukça büyük problemlere, can ve mal kayıplarına neden olabilmektedir. Sıvılaşma nedeniyle oluşabilecek potansiyel yanal deplasmanların tahmini bu nedenle oldukça elzem bir konu haline gelmektedir.

Karmaşık mühendislik problemlerinin çözümünde sıklıkla kullanılmaya başlanan yapay sinir ağları, laboratuvar deneyleri veya amprik yollarla yapılan çalışmalara oranla çok daha yüksek doğruluklarda sonuçların elde edilebilmesine imkân tanımaktadır. Bu çalışma kapsamında da yapay sinir ağlarının bu özelliği kullanılarak bir tahmin modeli geliştirilmeye çalışılmıştır.

Literatürde yer alan çalışmalar kullandıkları veri setleri itibari ile iki kategoriye ayrılabilirler. Bunlardan ilki Standart Penetrasyon Testi'ne dayanan verilerin kullanıldığı, güncel depremlerin büyük bir çoğunluğunu içermeyen, Youd vd. (2002) veri setine ya da bu veri setinden üretilmiş yeni veri setlerine dayanmaktadır. İkincisi ise özellikle Yeni Zelanda depremleri için kullanılan Koni Penetrasyon Testi'ne dayanan verilerin kullanıldığı, yalnızca Yeni Zelanda depremleri için geliştirilmiş yöntemlerdir.

Bu çalışma kapsamında geçmişte kullanılan Standart Penetrasyon Testi verileri ile üretilmiş mevcut veri setlerine, Yeni Zelanda depremlerine ait Standart Penetrasyon Testi verilerinden elde edilmiş verilerin eklenmesi ile daha güncel ve daha geniş kapsamlı bir veri seti oluşturulmuştur. Oluşturulan veri seti literatürdeki çalışmaların büyük bir çoğunluğunun aksine, sıvılaşma hasarının tahmininde önemli bir rol oynayabilecek depremin hız bileşeni de eklenmiştir. Elde edilen güncel ve geniş kapsamlı veri seti ve yapay sinir ağı kullanılarak problemin çözümü modellenmeye

çalışılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Yanal yayılma, sıvılaşma, derin öğrenme, yapay sinir ağları

ABSTRACT

Prediction of Liquefaction Induced Lateral Spreadings with Artificial Neural Networks

Okan ÇETİNKAYA

Department of Civil Engineering
Master of Science Thesis

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Pelin TOHUMCU ÖZENER

Liquefaction, which may occur as a result of the impact of a dynamic effect such as an earthquake on cohesionless or low cohesion saturated soils, can bring along many important problems. Lateral spreading, which is one of these problems, can cause serious problems, loss of life and property, as seen in the 2010-2011 Canterbury Earthquake Sequence. Estimation of potential lateral displacements due to liquefaction therefore becomes an essential issue.

Artificial neural networks, which are frequently used in the solution of complex engineering problems, allow to obtain results with much higher accuracy compared to laboratory experiments or empirical studies. In this study, a prediction model has been tried to be developed by using this feature of artificial neural networks.

Studies in the literature can be divided into two categories based on the data sets they use. The first of these is Youd et al. (2002) dataset or new datasets generated from this dataset. The second is the methods developed only for New Zealand earthquakes, using data based on the Cone Penetration Test, which is used only for New Zealand earthquakes.

Within the scope of this study, a more up-to-date and more comprehensive data set was created by adding the data obtained from the Standard Penetration Test data of New Zealand earthquakes to the existing data sets produced with the Standard Penetration Test data used in the past. Contrary to the majority of the studies in the literature, the data set created is also includes the velocity component of the earthquake, which can play an important role in the estimation of liquefaction damage. The solution of the problem has been tried to be modeled by using the current and comprehensive data set and artificial neural network.

Keywords: Lateral spreading, liquefaction, deep learning, artificial neural networks

YILDIZ TECHNICAL UNIVERSITY
GRADUATE SCHOOL OF SCIENCE AND ENGINEERING

1
GİRİŞ

1.1 Literatür Özeti

Günümüzde hala önemli bir problem olan, altyapı sistemlerinden köprülere kadar birçok yapıda önemli hasarlara neden olabilen sıvılaşma kaynaklı yanal yayılmalar birçok araştırmacının ilgi odağında olmuştur. Sıvılaşan tabakanın üzerindeki katmanların bloklar halinde yüzey eğimi veya serbest yüzey doğrultusunda hareket etmesi şeklinde tanımlanan yanal yayılmalar birçok parametreden etkilenmektedir: Sıvılaşan tabaka kalınlığı, ince dane içeriği, ortalama dane çapı, yüzey eğimi, serbest yüzey oranı, depremin ivmesi vb.

Literatürde yer alan çalışmaların büyük bir çoğunluğu yukarıda bahsedilen parametreler kullanılarak yürütülmüş olup depremin hız ölçütlerine ilişkin yapılan çalışmalar ise oldukça kısıtlı kalmıştır. Hamada vd. (1986)'nın çoklu regresyona dayanan yöntemi ile başlayan veriye dayanan tahmin yöntemleri Youd vd. (2002) kapsamında oluşturulan düzenlenmiş veri seti ile ivmelenmiş olup günümüzde makine öğrenmesi, yapay sinir ağları gibi yapay zeka yöntemlerinin problemin çözümüne entegre edilmesi ile başka bir boyut kazanmıştır.

1.2 Tezin Amacı

Bu tez çalışmasının ana amacı geoteknik deprem mühendisliğinde oldukça önemli bir yer tutan sıvılaşma kaynaklı yanal yayılmalar, modern tahmin yöntemlerinden olan yapay sinir ağları ile tahmin etmektir. Ana amaca yönelik yapılacak çalışmalarda belirlenen yan amaçlar ise Standart Penetrasyon Testi ile elde edilen veriler kullanılarak güncel bir veri setinin oluşturulması ve depremin hız ölçütlerinin yanal yayılma tahminindeki etkilerinin belirlenmesidir.

1.3 Hipotez

Tezin hipotezi sıvılaşma kaynaklı yanal yayılmaların tahmini için kullanılan veri setlerinin güncellenerek literatürde kendine çok az yer bulan veya bulamayan depremin hız ölçütlerinin tahmin modeli üzerinde olumlu sonuçlar doğuracağıdır.

1.4 Sıvılaşmanın Tanımı

Literatürde ilk kez Mogami ve Kubo (1953) ile kendine yer bulan, yıkıcı etkilerinin oldukça fazla olduğu 1964 Alaska ve Niigata depremlerinden sonra geoteknik deprem mühendisliğinin en önemli konularından biri olan sıvılaşma güncelliğini ve literatürdeki önemini korumaktadır. Bina temellerinde oturmalara, köprü ayakları ve altyapıda yanal yayılmalardan kaynaklı hasar oluşumuna kadar birçok araştırmaya değer önemli ve yıkıcı etkisi bulunmaktadır.

Youd (1984) sıvılaşmayı, suya doygun kohezyonsuz zeminlerin ani bir dinamik kuvvet etkisi nedeniyle tekrarlı gerilmeler altında boşluk suyu basıncının aniden artarak zemin daneleri arasındaki efektif gerilmenin, zeminin mukavemetini kaybedecek noktaya kadar düşmesi ve bunun neticesinde bir sıvı gibi davranması olarak tanımlamıştır [1]. Sıvılaşma matematiksel olarak, Mohr Columb'un kayma dayanımı eşitliği ile aşağıdaki şekilde açıklanabilmektedir:

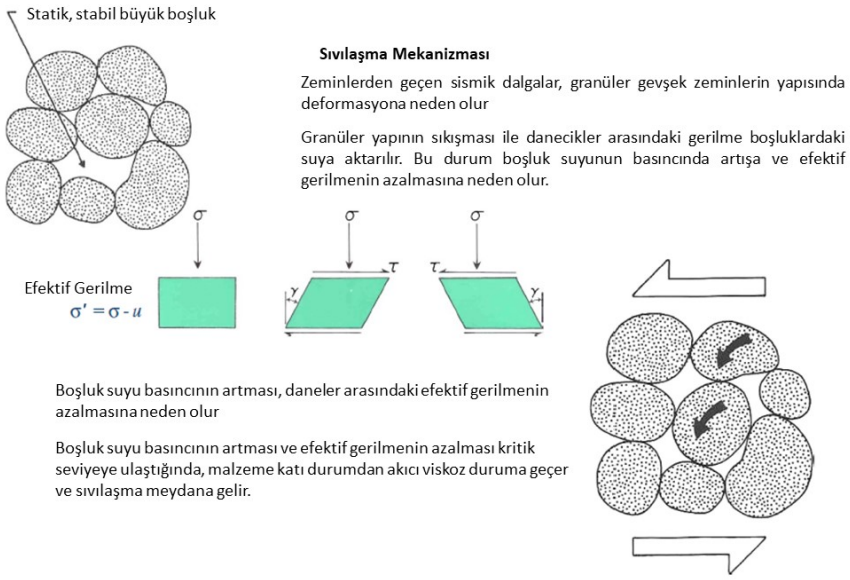
$$\tau = c' + \sigma'_{v} * tan\varphi' \tag{1.1}$$

$$\sigma'_{v} = \sigma_{v} - u \tag{1.2}$$

Burada τ zeminin kayma dayanımı, c' zeminin drenajsız şartlardaki kohezyonu, σ'_{v} toplam efektif gerilme, φ' zeminin drenajsız şartlardaki içsel sürtünme açısı, σ_{v} toplam düşey gerilme, u boşluk suyu basıncını temsil etmektedir.

Eşitlikten de görülebileceği gibi boşluk suyu basıncındaki artış, toplam gerilmenin sabit olması nedeniyle efektif gerilmenin azalmasına neden olacaktır. Kohezyonsuz gevşek kumlarda zeminin kohezyonu (c') sıfıra eşit olduğundan efektif gerilmenin azalımı (ve sıfırlanması), zeminin τ kayma dayanımının azalması ve hatta sıfırlanmasına ve böylece zeminin bir sıvı gibi davranmasına neden olmaktadır. Bu durum Şekil 1.1'deki diyagramda görülebilmektedir [2].

Sıvılaşma direkt olarak hasar meydana getirmek zorunda değildir. Sıvılaşma nedeniyle hasar oluşumu, sıvılaşma etkilerinin zemin deformasyonlarına, zemin yerdeğiştirmelerine ya da insan yapımı yapıların etkilenmesi ile oluşur. Oluşan bu sıvılaşma kaynaklı hasar, hasar oluşum yönünün yatay veya düşey olmasına göre iki genel kategoriye ayrılabilir. Yatay olarak oluşan zemin hasarları akma sıvılaşması, yanal yayılma ve zemin osilasyonunu içerir. Bu yenilmeler arasındaki sınırlar geçişkendir. Yenilmenin tipi ve yerdeğiştirmenin miktarı yerel zemin eğimine veya serbest yüzeye yakınlığa, zeminin özelliklerine ve sıvılaşan tabaka kalınlığına bağlıdır [3]. Düşey deplasmanlar ise zeminde meydana gelen oturmaları, zemin çökmelerini



Şekil 1.1 Sıvılaşma tetiklenme mekanizmasının diyagramı

ya da zeminin taşıma gücünü kaybetmesi neticesinde bina altında meydana gelen yapısal oturmaları kapsamaktadır.

1.5 Sıvılaşma Duyarlılığını Etkileyen Faktörler

Statik halde iken herhangi bir problem teşkil etmeyen (taşıma gücü, oturma gibi) zeminler deprem gibi tekrarlı dinamik yükler altında taşıma güçlerinde kayba uğrayabilir veya oturma, yanal yayılma gibi potansiyel sorunlar ile karşı karşıya kalabilir. Bu nedenle statik durumda herhangi bir sorun teşkil etmeyen zeminlerin dinamik etki altında davranışlarının değerlendirilmesi daha sonra yaşanabilecek olası problemlerin önüne geçilmesinde oldukça büyük bir önem taşımaktadır. Bir zeminin sıvılaşmaya karşı duyarlı oluşu tespit edilirse, sıvılaşma neticesinde oluşabilecek olası hasarların da değerlendirilmesi gerekmektedir.

Kramer (1996) sıvılaşmaya karşı duyarlılığı dört ana başlık altında incelemiştir: Tarihsel, jeolojik, bileşimsel ve durumla ilgili ölçütler [4]. Bu tez kapsamında sıvılaşma duyarlılığın daha genel iki ana başlık çerçevesinde değerlendirilecektir: Zemin özelliklerinin sıvılaşmaya olan etkisi, deprem özelliklerinin sıvılaşmaya olan etkisi.

1.5.1 Zemin Özelliklerinin Sıvılaşmaya Olan Etkisi

Sıvılaşma her koşulda, her zeminde meydana gelen bir olay değildir. Potansiyel olarak sıvılaşabilen zeminler suya doygun kumlar, çakıllı kumlar, siltli killi kumlar, plastik olmayan siltler ve sil-kum karışımlarıdır [5]. Potansiyel olarak sıvılaşabilen bu zeminlerin gerek içerik gerekse yapısal formdaki özellikleri sıvılaşma duyarlılığını farklı şekillerde etkilemektedir.

1.5.1.1 Zeminin Yaşı ve Tarihi

Birçok araştırmacı zeminin yaşının artmasının sıvılaşma direncinin arttırdığını söylemiştir. Birkaç bin sene önce çökelmiş sahalar sıvılaşma riski açısından genelde Holosen sedimentlere oranla daha tehlikelidir. Pleistosen sedimentler sıvılaşmaya daha da dirençli olup, Pleistosen öncesi sedimentler genellikle sıvılaşmaya dirençlidir. Her ne kadar zeminin yaşı ile sıvılaşma riski arasında bir bağ kurulabilse de zeminin yaşını penetrasyon direnci, sıvılaşma analizi gibi mühendislik uygulamalarına dahil etmek için kullanılabilecek herhangi bir korelasyon, düzeltme katsayı geliştirilmemiştir [6].

Geçmişte sıvılaşan bir zemin profilinde, zemin ve yeraltı su durumunun değişmemesi halinde ilgili zeminin tekrar sıvılaşma olasılığı yüksektir [1]. Bu nedenle herhangi bir zeminde olası sıvılaşmanın öngörülebilmesi adına zemin profilinin geçmişi hakkında bilgiye sahip yardımcı olabilmektedir.

1.5.1.2 Rölatif Sıkılık, Dane Şekli ve Dane Çapı Dağılımı

Dane boyu dağılımı, zeminin derecelenmesi, rölatif sıkılık gibi zeminin fiziksel özellikleri sıvılaşmaya etki eden faktörler arasında oldukça önemli bir konumda yer almaktadır.

Sıvılaşma, zemin daneleri arasındaki boşluklarda yer alan suyun deprem gibi tekrarlı yükler nedeniyle basıncının artması nedeniyle oluşan bir fenomendir. Bu nedenle bir zemin profilinin rölatif sıkılığı sıvılaşma riskini ve potansiyel etkilerini oldukça etkileyen bir faktördür. Özellikle gevşek kumların sarsıntı nedeniyle sıkışma eğilimi göstereceğinden, sıvılaşma riskleri dikkatlice değerlendirilmelidir. Seed (1976) rölatif sıkılığı %47'den düşük olan kum zeminlerin sıvılaşma potansiyellerinin yüksek olduğunu belirtmiştir. Maksimum yer ivmesi ile rölatif sıkılığa bağlı sıvılaşma potansiyeli ilişkisi Tablo 1.1'de gösterilmiştir [7].

Rouholamina vd. (2017) yapmış oldukları laboratuvar deneyleri sonucunda zeminin rölatif sıkılığının sıvılaşma sonrasında kum zeminin gerilme-şekil değiştirme

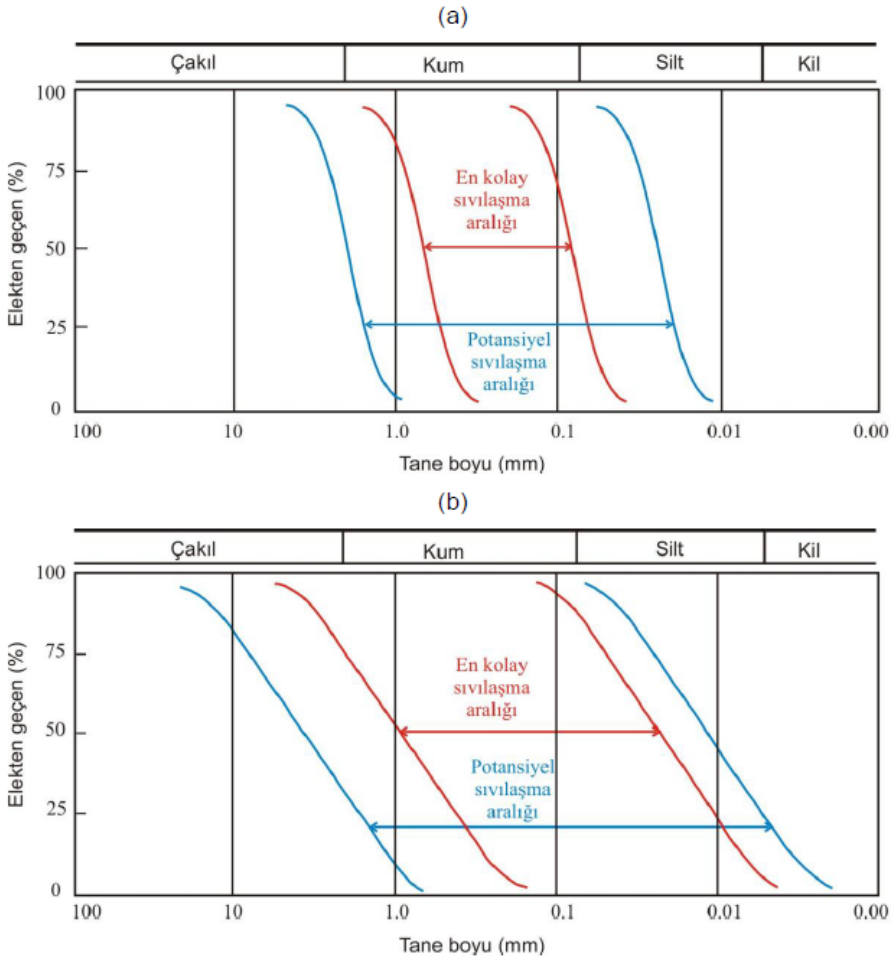
Tablo 1.1 Rölatif sıkılık-sıvılaşma potansiyeli arasındaki ilişki

Maksimum Yer İvmesi (g)	Sıvılaşma Potansiyeli Yüksek (%)	Sıvılaşma Zemin Tipine ve Deprem Büyüklüğüne Bağlı (%)	Sıvılaşma Potansiyeli Düşük (%)
0.10 g	Dr<%33	%33<Dr<%54	Dr>%54
0.15 g	Dr<%48	%48<Dr<%73	Dr>%73
0.20 g	Dr<%60	%33<Dr<%85	Dr>%85
0.25 g	Dr<%70	%33<Dr<%92	Dr>%92

davranışında etkili olduğunu göstermiştir. Dört farklı tipte temiz kum üzerinde gerçekleştirilen çok aşamalı teste dayalı olarak, sıvılaşan kumun gerilme-şekil değiştirme davranışı, üç parametre açısından tanımlanan çift-doğrusal eğri olarak modellenebilir: ilk kesme modülü (G_1), kritik durum kesme modülü (G_2) ve zemin sıvılaşma sonrası durumda genişlemeye başladığında kayma şekil değiştirmesi olarak tanımlanan genişleme sonrası kayma şekil değiştirmesi ($\gamma_{\text{genişleme-sonrası}}$). Bu sıvılaştırma sonrası parametrelerinin her birinin, kumların başlangıçtaki rölatif sıkılığının bir fonksiyonu olduğu gösterilmiştir. Rölatif sıkılığın artması G_1 ve G_2'yi arttırmakta; ancak, $\gamma_{\text{genişleme-sonrası}}$'nı azaltmaktadır. Kumun rölatif sıkılığının, penetrasyon direncinden veya başka herhangi bir yoldan ampirik olarak tahmin edilmesi ile bahsi geçen sıvılaştırma sonrası üç parametre tahmin edilip, sıvılaşma sonrası davranış tanımlanabilir [8].

Dane boyunun kendisi kadar dağılımı da sıvılaşmayı etkileyen faktörlerden biridir. İyi derecelenmiş zeminler neredeyse her dane boyundan partikül içermektedir. Böylece daneler arasındaki boşluklara küçük boyutlu zemin daneleri yerleşeceğinden zeminin boşluklarında azalma görülür. Böylece deprem anında boşluk suyu basıncındaki artış daha az olacaktır. Kötü derecelenmiş zeminlerde ise neredeyse sadece belirli boyutta daneler bulunacağından daneler arasındaki boşluklar daha geniştir. Bu nedenle deprem sırasında oluşacak aşırı boşluk suyu basıncı da daha fazla olacaktır. Bu durum da sıvılaşma potansiyelinde artışa neden olacaktır. Dane boyu dağılımı açısından sıvılaşabilen zeminler Şekil 1.2'de görülebilir [9].

Rölatif sıkılık, dane boyu ve dağılımın yanında dane şekli de sıvılaşma potansiyelini etkileyebilecek bir etkendir. Poulos vd. (1985) yuvarlak daneli zeminlerin sıvılaşma potansiyelinin, köşeli danelerinkine oranla daha fazla olduğunu belirtmişlerdir [10]. Keramatikerman ve Chegenizadeh (2017) de yapmış oldukları statik üç eksenli basınç deneylerinin sonucunda zemin şekli tanımlayıcılarının (yuvarlaklık, küresellik ve düzenlilik) değerlerinin arttırılmasıyla zemin numunelerinin mukavemetini azalttığını göstermiştir [11]. Ashmawy vd. (2003) yapmış oldukları deneyler ve modeller



Şekil 1.2 a) Düşük, b) Yüksek eşşekillilik açısından en kolay ve potansiyel sıvılaşma aralıkları

neticesinde maksimum boşluk oranında dane şeklinin sıvılaşmaya herhangi bir etkisi olmadığını ancak sabit boşluk oranında dane şeklinin sıvılaşmayı oldukça fazla etkilediğini ortaya koymuşlardır [12].

1.5.1.3 İnce Dane İçeriği ve Plastisite

Tokimatsu ve Yoshimi (1983) aynı $SPT-N_1$ vuruş sayılarına sahip zemin profillerinde ince dane içeriğine sahip zeminin, temiz kuma oranla sıvılaşma direncinin daha yüksek olduğunu ve bu eğilimin ince dane içeriğinin artması ile daha da artış gösterdiğini bildirmişlerdir [13].

Kil içeriği %20'den fazla olan zeminler plastisite indeksleri düşük olmadığı sürece sıvılaşma olasılıkları düşüktür. $SPT-N_1$ vuruş sayısı 25'ten büyük olan temiz kumlarda sıvılaşma kaynaklı büyük hasarların meydana gelebileceği katastrofik olayların meydana gelmesi beklenmez. Bu limit değer ince dane içeriğinin artışı ile azalım gösterir ([13]).

Bolton Seed vd. (1985) artan ince dane içeriğine paralel olarak sıvılaşma direncinde bir düşüş trendi olduğunu ancak bu trendin nedeninin sıvılaşma direncinde olan artıştan mı yoksa penetrasyon direncinde görülen azalmadan mı kaynaklı olduğunu net bir şekilde ortaya koyamamışlardır [14].

Polito (1999) ise, plastisite indeksinin sıvılaşma üzerindeki etkisinin umut verici sonuçlar çıkarabileceğini belirten Tokimatsu ve Yoshimi'den (1983) sonra, zeminin içindeki ince danenin plastisitesini de değerlendirmiş, plastik ve plastik olmayan ince dane içerinin sıvılaşmaya olan etkilerini ayrı ayrı değerlendirmiştir. Yapılan çalışmalar neticesinde kum zeminin içerisinde yer alan plastik olmayan ince dane içeriğinin belirli bir limit değer kadar artışı zeminin sıvılaşma direncinde azalmaya neden olmakta, bu limit değerden sonra ise sıvılaşma direncinde artışa neden olmaktadır. Polito (1999) plastisite oranı yüksek zeminlerde sıvılaşma direncinin likit limit, plastisite indeksi ve aktiflik ile artacağını, önemli olan noktanın sadece incelerin plasitistesinin değil tüm zemin karışımının plasitisetinin olduğunu yapmış olduğu çalışmalar neticesinde ortaya koymuştur [15].

Swamy vd. (2020) orta sıkılıkta on altı adet zemin kombinasyonu üzerinde yapmış oldukları drenajsız çevrimli üç eksenli basınç deneyleri neticesinde kumların sıvılaşma direnci plastisite indeksinin 5'e kadar artması sonucunda azalttığını, daha ileride 15'e kadar artması sıvılaşma direncini arttırdığını ortaya koymuşladır. Ancak plastisite indeksi 0 ile 5 arasında olan zemin örneklerinin sıvılaşma dirençlerinin hala kumlara oranla daha düşük olduğunu aynı zamanda %40'a kadar ince dane içeren plastik olmayan ve düşük plastik zemin karışımlarının, kumlara göre belirtmişlerdir [16].

1.5.1.4 Çevre basıncı

Sıvılaşma, sığ derinliklerde (maksimum 20 metre) oluşabilen veya etkileri bu derinliklerde yüzeye iletilebilen bir fenomendir. Bu nedenle derinlikle birlikte artan çevre basıncı, sıvılaşma açısından önemli bir değişken haline gelmektedir. Örtü yükünün, çevresel basıncın artışı sıvılaşma riskinde azalmaya neden olmaktadır [17].

1.5.1.5 Yeraltı su seviyesi

Sıvılaşma daha önce de bahsedildiği gibi, zemin daneleri arasındaki boşlukta bulunan suyun, deprem gibi dinamik bir etki ile basıncının artması, artan boşluk suyu basıncı ile efektif gerilmenin azalarak zeminin rijit yapısını kaybedip, bir katı yerine sıvı gibi davranmasıdır [17]. Bu nedenle yeraltı suyunun varlığı ve derinliği sıvılaşma açısından belki de en önemli parametreler biri haline gelmektedir.

Yeraltı suyunun derinde olması aynı zamanda sığ katmanlardaki efektif gerilmede artışa neden olmaktadır. Yeraltı su seviyesinin, 20 metreden daha derinde olduğu durumlarda sıvılaşmanın ender olarak gerçekleştiği belirtilmektedir [17].

1.5.2 Deprem Özelliklerinin Sıvılaşmaya Olan Etkisi

Zemin sıvılaşmasını etkileyen deprem ile ilgili etkenler genel olarak depremin büyüklüğü, süresi, şiddeti, en büyük yatay yer ivmesi ve deprem merkez üssüne olan uzaklık olarak sıralanabilir. Büyüklük ve maksimum yer ivmesi, sarsıntının süresi ve şiddetini karakterize etmede de yardımcı olabilmektedir [6].

Depremin büyüklüğü ve süresi arasındaki ilişki tam olarak net değildir. Örneğin tek yönlü bir faylanmada (kırılmanın bir başlangıç ve bir bitiş noktası vardır) genelde, çift yönlü faylanmaya (kırılma bir noktada başlar ancak deprem iki zıt yönde ilerler) oranla daha uzun sarsıntıların oluşması söz konusudur. Depremin süresi aynı zamanda sismik enerji kaynağına olan mesafe ile artış gösterir ve tektonik bölge, arazi koşulları ve taban kayası topografyasına göre değişiklik gösterir.

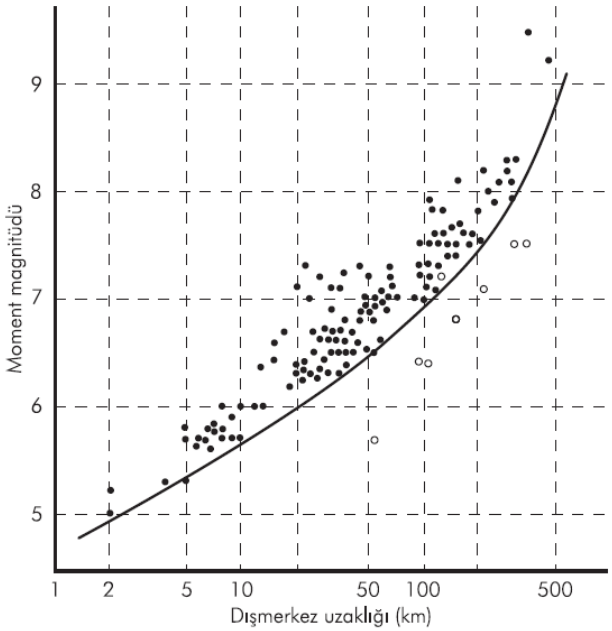
Depremin büyüklüğü ve süresindeki artış ortaya çıkan enerji miktarında artışa bu da maksimum yer ivmesinde artışa neden olacaktır. Yer ivmesinin artması ile sıvılaşma riskinde artış görülmektedir.

Kramer (1996) sıvılaşmanın depremden belli uzaklıkta sınırlandığını, Ambraseys (1988) sığ odaklı (derinliği 50 metreden düşük olan) ve büyüklüğü 5'ten büyük olan depremlerden elde ettiği veriler neticesinde sıvılaşmanın gerçekleştiği bölgeler ile depremin merkez üssü arasındaki mesafenin de sıvılaşma duyarlılığı açısından önemli olduğu sonucunu ortaya koymuştur (Şekil 1.3) [4, 18].

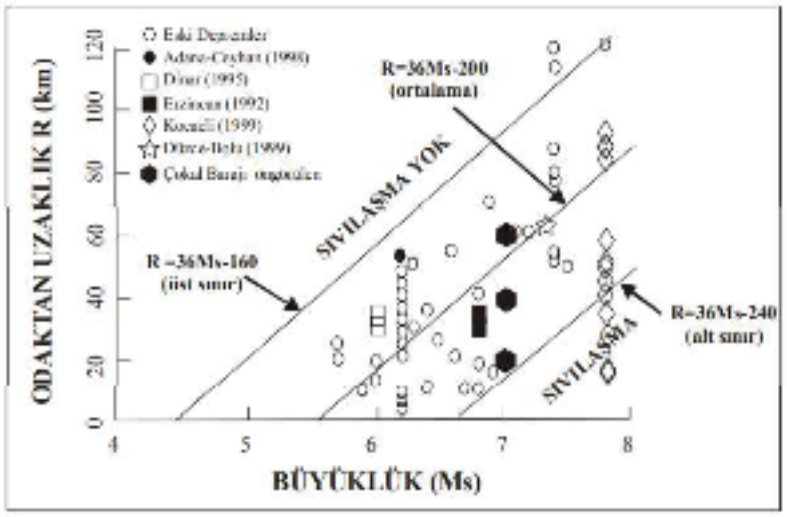
Grafikte yer alan siyah noktalar sıvılaşmanın görüldüğü, beyaz noktalar ise görülmediği verileri temsil etmektedir. Grafikten her ne kadar net ve kesin bir bilgi elde edilemese de sıvılaşma olasılığı ve dışmerkez uzaklığı arasında bir korelasyon olduğu görülebilmektedir.

Aynı şekilde sıvılaşma olasılığı ve deprem odak noktasına olan uzaklık arasındaki ilişkiyi inceleyen Ündül ve Gürpınar (2003) Şekil 1.4'teki grafiği önermişlerdir [19].

Şekil 1.4'teki grafik incelendiğinde, Ambraseys'in (1988) önerdiği grafikteki gibi deprem odak merkezine olan mesafenin artışının sıvılaşma olasılığını düşürdüğü görülebilmektedir. Bu sonucun, odak uzaklığının artışı ile maksimum yer ivmesinin arasındaki ters orantılı korelasyondan ortaya çıktığı söylenebilir.



Şekil 1.3 Depremin moment büyüklüğü-dışmerkez uzaklığı ve sıvılaşma arasındaki ilişki



Şekil 1.4 Depremin moment büyüklüğü-dışmerkez uzaklığı ve sıvılaşma arasındaki ilişki

1.6 Sıvılaşma Analiz Yöntemleri

Son 60 senedir geoteknik deprem mühendisliğinin ilgi odağında olan sıvılaşmanın değerlendirilmesi birçok araştırmacının ilgisini çekmiştir. Bu araştırmacıların bir kısmı Standart Penetrasyon Testi (SPT), Koni Penetrasyon Testi (CPT), Kayma Dalgası hızı (V_s) gibi arazi deney verilerine dayanan yöntemler geliştirmiş olup, bir kısmı da laboratuvar ortamında modellenen deneyler yardımı ile sıvılaşma fenomenini incelemiştir.

Gerek sıvılaşma riski araştırılan granüler zeminden örselenmemiş numunenin elde edilmesinin, gerekse laboratuvar deneylerinde arazi koşullarının birebir modellenmesinin zorluğu nedeniyle sıvılaşma riski analizinin arazi deneylerine dayanan yöntemler kullanılarak yapılması tercih nedenidir. Bu tez çalışması kapsamında da arazi deneylerinden biri olan Standart Penetrasyon Testi'nin (SPT) kullanıldığı gerilme tabanlı analiz yöntemlerinden Seed ve Idriss (1971), Youd vd. (2001) ve Boulanger ve Idriss (2014) incelenecektir.

- Seed ve Idriss (1971)
- Youd vd. (2001)
- Boulanger ve Idriss (2014)

1.6.1 Seed ve Idriss (1971) Basitleştirilmiş Sıvılaşma Analizi Yöntemi

1964 Alaska ve Niigata depremleri ile oluşan yıkıcı hasar neticesinde Seed ve Idriss tarafından 1971 yılında geliştirilen bu yöntem, zeminlerin sıvılaşma potansiyelinin değerlendirilmesinde sıkça başvurulan yöntemlerden biri olmuştur. Gerilme tabanlı yaklaşımla zeminlerin sıvılaşma potansiyellerinin hesaplandığı bu yöntem yıllar içinde periyodik olarak modifiye edilip geliştirilmiştir. Gerilme tabanlı sıvılaşma analizi aynı zamanda günümüze kadar birçok araştırmacıya bir temel dayanak olmuştur [6, 20, 21].

Zeminlerin sıvılaşma potansiyellerinin Standart Penetrasyon Testi verileri kullanılarak geliştirilmiş olan bu yöntem aynı zamanda literatürde "basitleştirilmiş yöntem" olarak da kendine yer bulmaktadır. Basitleştirilmiş sıvılaşma tetiklenme analizi, arazi gözlemleri ve laboratuvar deneyleri neticesinde elde edilen veriler kullanılarak geliştirilmiştir. Arazi sıvılaşma gözlemleri, arazide gözlemlenebilen kum kaynaması, çatlaklar ve yanal yayılmalar ile genellikle tutarlı bir korelasyonda olmuştur. Toplanan verilerin büyük bir çoğunluğu derinliği 15 metreden düşük sığ, Holocone alüvyal ve fluvyal sedimentlerden oluştuğu için bahsi geçen yöntemin bu arazi koşullarında uygulanması daha uygundur [6].

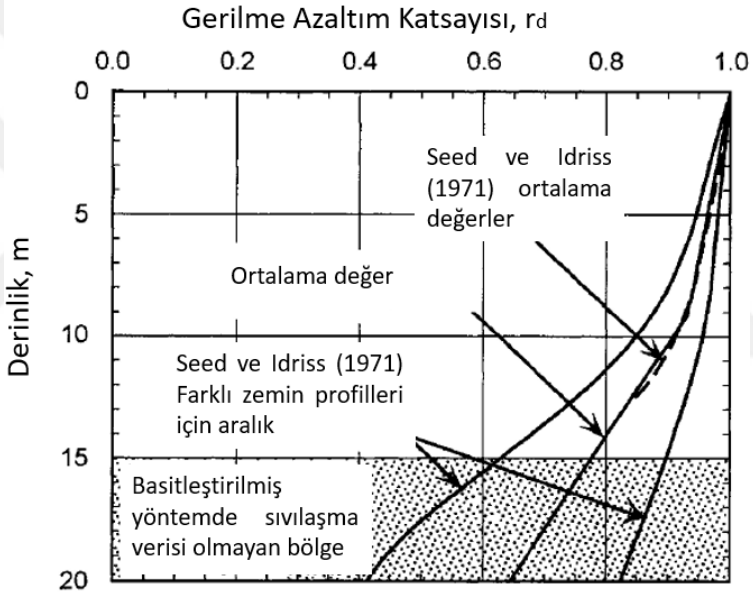
Bir deprem veya tekrarlı gerilme halinde, zeminde oluşacak maksimum tekrarlı makaslama gerilmesinin (τ_{max}), tekrarlı makaslama gerilmesi uygulanmadan önce zemindeki kayma gerilmesine (σ'_v) oranını ifade eden Çevrimsel Gerilme Oranı (Cyclic Stress Ratio, CSR) bir zeminin sıvılaşmaya karşı direncinin hesaplanmasında ve sıvılaşma karakteristiklerinin belirlenmesinde çok uygun bir parametredir. Seed ve Idriss inceledikleri Alaska ve Niigata depremleri ve laboratuvar deneyleri neticesinde zeminin herhangi bir noktasındaki ortalama kayma gerilmesinin, maksimum kayma

gerilmesinin %65'i kadar olduğunu tespit etmişlerdir. M_w=7.5 olan bir deprem için CSR'nin hesabı için de aşağıda yer alan formül önerilmiştir:

$$CSR = 0,65 * \frac{\tau_{max}}{\sigma'_v} = 0,65 * \frac{a_{max}}{g} * \frac{\sigma_v}{\sigma'_v} * r_d \tag{1.3}$$

Burada τ_{max} bir deprem veya tekrarlı gerilme halinde zeminde oluşacak en büyük kayma gerilmesini, σ'_v deprem veya tekrarlı gerilme uygulanmadan önce zemindeki efektif düşey gerilmeyi, a_{max} zeminde oluşacak en büyük yer ivmesini (g), g yer çekimi ivmesini, σ_v zemindeki toplam düşey gerilmeyi ve r_d gerilme azaltma faktörünü temsil etmektedir.

Gerilme azaltma faktörünün değeri için Seed ve Idriss (1971) aşağıdaki eğrilerin kullanımını önermiştir [6].



Şekil 1.5 Derinlik değerlerine göre değişen r_d (gerilme azaltma faktörü) değerleri grafiği (ortalama değer çizgileri ile)

Rutin ve kritik öneme sahip olmayan projeler için Liao ve Whitman'ın (1986) önermiş olduğu aşağıdaki formüller de r_d, gerilme azaltma faktörünün hesabı için kullanılabilir [22]:

$$\begin{aligned} r_d &= 1.0 - 0.00765 * z & z \leq 9.15 \\ r_d &= 1.174 - 0.267 * z & 9.15 \leq z \leq 23 \end{aligned} \tag{1.4}$$

1.6.2 Youd vd. (2001) Sıvılaşma Analizi Yöntemi

1996 yılının Ocak ayında T. L. Youd ve I. M. Idriss, basitleştirilmiş prosedürü güncellemek ve önceki on yılın araştırma bulgularını dahil etmek için 20 uzmandan

oluşan bir atölye topladı. 2001 yılında yayımlanan makalede bu çalıştayın önerileri özetlenmiştir [6].

Seed ve Idriss (1971) Çevrimsel Gerilim Oranı (CSR) hesabı için aşağıdaki formülün kullanımını önermişti:

$$CSR = 0,65 * \frac{\tau_{max}}{\sigma'_v} = 0,65 * \frac{a_{max}}{g} * \frac{\sigma_v}{\sigma'_v} * r_d \tag{1.5}$$

Çalıştay katılımcıları formülde ufak modifikasyonlar önermiştir: Basitleştirilmiş yöntemden farklı olarak derinlik düzeltme faktörünün hesabı için Şekil 1.5'teki Derinlik-r_d grafiğinin değil, T. F. Blake'in (1996) önerdiği, grafikte çizilen ortalama gerilme eğrisinin formülasyonunun kullanılmasını önermişlerdir [6]:

$$r_d = \frac{(1.000 - 0.4113 * z^{0.5} + 0.4052 * z + 0.001753 * z^{1.5})}{(1.000 - 0.4117 * z^{0.5} - 0.006205 * z^{1.5} + 0.00121 * z^2)} \tag{1.6}$$

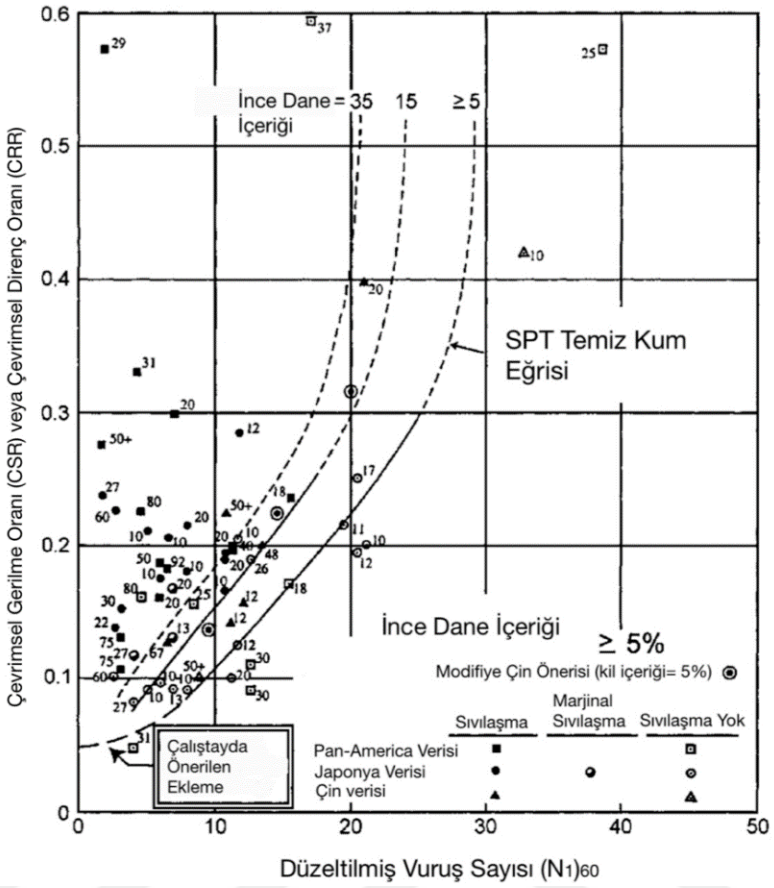
Burada z zemin yüzeyinden, sıvılaşma riski araştırılan zemin katmanının derinliğidir. Bazı araştırmacılar daha derin z derinlikleri için r_d değerinin hesaplanmasına yönelik yaklaşımlar önermiş olsalar da basitleştirilmiş yöntem bu derinlikleri kapsamamaktadır [23]. Aynı zamanda daha derindeki katmanlarda yapılacak incelemeler rutin uygulamaların sınırları dışında kalmaktadır [6].

Çevrimsel Direnç Oranı'nın (CRR) hesabı için arazi verilerine dayanan yöntemlerin tercih edilebileceğini söylenen çalıştayda dört arazi deneyi üzerinde durulmuştur: SPT, CPT, V_s, BPT, SPT'nin yoğun olarak kullanılıyor oluşu ve yöntem kapsamında İnce Tane Oranı (İTO) ve D50 gibi sıvılaşmayı ve sıvılaşma kaynaklı hasarı etkileyecek faktörlerin elde edilebilmesinin sağlanması nedeni ile bu tez kapsamında sadece SPT ile CRR hesabına yer verilecektir.

Standart Penetrasyon Testi verilerine dayanarak sıvılaşma direncinin hesabı için genellikle Şekil 1.6'te görülebilen Çevrimsel Gerilim Oranı (CSR) ile düzeltilmiş Standart Penetrasyon Testi vuruş sayısı $(N_1)_{60}$ korelasyonuna dayanan grafik kullanılmaktadır. Şekilde yer alan $(N_1)_{60}$ ifadesi yaklaşık 100 kPa'lık örtü yükü (1 ton/ft^2) ve %60 etkinliğindeki çekiç enerjisine göre düzeltilmiş Standart Penetrasyon Testi vuruş sayısını temsil etmektedir [6].

Şekil 1.6'teki CSR-$(N_1)_{60}$ grafiği daha önce sıvılaşma etkilerinin görüldüğü ve/veya görülmediği arazilerden elde edilmiştir. İlgili araziler için hesaplanan CSR ve buna karşılık gelen $(N_1)_{60}$ verileri ortalama 7.5 büyüklüğündeki depremleri kapsamaktadır.

Şekilde de görülebileceği üzere eğri %5, %15 ve %35'lik ince dane içeriğine sahip granüler zeminlere göre çizilmiştir. Yüzde 5 ince dane oranından daha düşük



Şekil 1.6 7.5 büyüklüğündeki depremlerden derlenmiş sıvılaşma vakalarından elde edilen SPT-temiz kum eğrisi

ince dane oranına sahip eğri basitleştirilmiş yöntem için temel penetrasyon noktası olup SPT-Temiz Kum olarak bahsedilmektedir. Şekildeki CRR eğrileri yalnızca 7.5 büyüklüğündeki depremler için geçerlidir.

Teksas Üniversitesi'nden A. F. Rauch 1998 yılında temiz kum eğrilerinin aşağıdaki formül yardımı ile elde edilebileceğini bildirmiştir [24]:

$$CRR_{7.5} = \frac{1}{34-(N_1)_{60}} + \frac{(N_1)_{60}}{135} + \frac{50}{\left[10*(N_1)_{60}+45^2\right]} - \frac{1}{200} \tag{1.7}$$

Bu denklem sadece $(N_1)_{60} < 30$ değerleri için geçerlidir. $(N_1)_{60} > 30$ değerleri için temiz granüler zeminler sıvılaşma için fazla yoğun olarak sınıflandırılır.

Seed vd. (1985) CRR ile ince dane içeriği arasında bariz bir ilişki olduğunu ancak bu ilişkinin kaynağının sıvılaşma direncinin artışı ya da penetrasyon direnci ile olup olmadığı konusunda net bir bilginin olmadığını bildirmişlerdir [14]. Çalıştay katılımcıları ince dane içeriğinin sıvılaşmaya olan etkisinin aşağıdaki formüller ile sağlanabileceğini bildirmişlerdir. Bu eşitlikler I. M. Idriss ve R. B. Seed tarafından

$(N_1)_{60}$ değerinin bir eşdeğer temiz kum değerine düzeltilmesi yolu ile geliştirmişlerdir:

$$(N_1)_{60,cs} = \alpha + \beta * (N_1)_{60} \tag{1.8}$$

Buradaki alfa ve beta aşağıdaki formülasyonlar yardımı ile hesaplanmaktadır:

$$\begin{aligned} &\alpha = 0, && FC \leq 5\% \\ &\alpha = exp\left[1.76 - (\frac{190}{FC^2})\right], && 5\% < FC < 35\% \\ &\alpha = 5.0, && FC \geq 35\% \end{aligned} \tag{1.9}$$

$$\begin{aligned} &\beta = 1.0, && FC \leq 5\% \\ &\beta = \left[0.99 + \left(\frac{FC^2}{1,000}\right)\right], && 5\% < FC < 35\% \\ &\beta = 1.2, && FC \geq 35\% \end{aligned} \tag{1.10}$$

Zeminin plastisitesi gibi özellikleri her ne kadar ince dane içeriği gibi sıvılaşma potansiyelini etkilese de yukarıdaki formülasyonlar için herhangi bir düzeltme uygulanmamıştır.

Standart Penetrasyon Testi ile elde edilen ham SPT-N vuruş sayılarının ince dane oranı ve uygulanan enerji oranına göre düzeltilmesinin yanında testin yapıldığı kuyunun çapı, örtü yükü, yeraltı su seviyesi gibi başka faktörlere göre de düzeltilip mühendislik hesaplamalarında kullanılmak üzere bir standart haline getirilmesi gerekmektedir. Düzeltme için kullanılacak diğer faktörler Tablo 1.1'deki gibi olup düzeltilmiş vuruş sayısı aşağıdaki formül yardımı ile hesaplanmaktadır [6]:

$$(N_1)_{60} = N_m * C_N * C_E * C_B * C_R * C_S \tag{1.11}$$

Burada; N_m ölçülen standart penetrasyon direnci, C_N efektif örtü yükü düzeltme katsayısı, C_E çekiç enerji düzeltme katsayısı, C_B kuyu çapı düzeltme katsayısı, C_R tij uzunluğu düzeltme katsayısı, C_S numune alıcı kılıf düzeltme katsayısını temsil etmektedir.

Granüler zeminlerin penetrasyona olan dirençleri, çevre basıncından oldukça etkilenir. Aynı özelliklere sahip granüler bir zeminde sığ derinliklerde yapılan SPT, daha derinde yapılan SPT'den daha düşük penetrasyon direncinin elde edilmesi ile sonuçlanacaktır. Bu nedenle incelenen derinlikte elde edilen SPT vuruş sayısı örtü yükü düzeltme katsayısı ile çarpılmalıdır. Liao ve Withman'a (1986) göre bu faktör aşağıdaki gibi hesaplanabilir [22]:

$$C_N = \left(\frac{P_a}{\sigma'_{v0}}\right)^{0.5} \tag{1.12}$$

C_N örtü yükü düzeltme faktörü, 1.7 ile sınırlandırılmış olup, jeolojik gerilmenin 100 kPa'dan küçük olduğu derinliklerde uygulanmaz [25].

Bir diğer önemli düzeltme faktörü enerji düzeltme katsayısıdır. Standart Penetrasyon Testi'nde 63.5 kilogramlık tokmağın 762 milimetrelik yükseklikten düşürülmesi ile teorik olarak 475 Joule'lük bir enerji meydana gelmektedir. Ancak hiçbir sondaj makinesi, tokmak %100 verim ile çalışmaz. Birçok farklı tokmak tipi bulunmakta olup, bu tokmakların tijlere aktardığı enerji çeşitlilik göstermektedir. Verimlilik, tokmağa ve düşürülme tipine bağlıdır. SPT ile ilgili korelasyonların büyük bir çoğunluğu, Birleşik Devletler test prosedürlerinin ortalaması olan %60'lık enerji verimliliğine dayanmaktadır. Bu nedenle C_E enerji düzeltme katsayısı aşağıdaki şekilde hesaplanabilir [25].

$$C_E = \frac{ER}{60} \tag{1.13}$$

ER yüzdece aktarılan enerjiyi temsil etmekte olup ER ve C_E için çeşitli araştırmacıların önerileri Tablo 1.2'deki gibidir [25]:

Tablo 1.2 ER ve CE enerji düzeltme katsayısının değişim aralığı

Referans	Tokmak Tipi	ER (%)	CE
Seed vd. (1985) [14]	Otomatik	45	0.75
	Güvenli	60	1.00
	Trip	100	1.67
Youd ve Idriss (1997)	Halka	30-60	0.50-1.00
	Güvenli	42-72	0.70-1.20
	Otomatik-trip halka	48-78	0.80-1.30
Durgunoğlu vd. (2000)	Güvenli	52-60	0.87-1.00

Tabloda yer alan aralık değerler sondaj ve deney ekipmanındaki değişiklikler düşünülerek elde edilmiştir.

SPT-N vuruş sayıları tablodaki aralık değerler yardımı ile enerji düzeltmesine tabi tutulabileceği gibi SPT'nin yapılması sırasında enerjinin ölçümü ile de yapılabilir.

Pratik geoteknik mühendisliği uygulamalarında genellikle yukarıda bahsi geçen iki faktör (örtü yükü ve enerji) için düzeltme yapılması yeterli olabilmektedir. Ancak daha net hesapların gerektiği bazı durumlarda bahsi geçen diğer düzeltme katsayılarının da uygulamaya dahil edilmesi gerekmektedir. Birçok durumda teorik serbest düşme tokmak enerjisinin %60'ına göre düzeltilmiş vuruş sayısı olan N_{60} ve teorik serbest düşme tokmak enerjisinin %60'ına ve efektif jeolojik basıncı 100 kPa alarak düzeltilmiş vuruş sayısı aşağıdaki gibi hesaplanabilir [25].

$$N_{60} = N_{arazi} * C_E \tag{1.14}$$

$$N_{1,60} = N_{60} * C_N \tag{1.15}$$

Şekil 1.6'te yer alan CRR eğrileri 7.5 büyüklüğündeki bir deprem için elde edilmiştir. 7.5 büyüklüğünden daha büyük ya da küçük büyüklükteki depremler için Seed ve Idriss (1982) "büyüklük ölçekleme faktörleri" (magnitude scaling factors, MSF) önermişlerdir. Bu faktörler CRR eğrilerinin aşağı ya da yukarı yönlü ölçeklenmesini sağlamıştır. Büyüklük ölçekleme faktörünün (MSF) aksine büyüklük ağırlıklama faktörü (MWF, ki MSF'nin tam tersidir) CSR'nin düzeltilmesi için kullanılır. Ancak gerek MSF'nin gerekse MWF'nin kullanımı ile aynı sonuca varılmaktadır [6].

Bu doğrultuda sıvılaşmaya karşı güvenlik sayısı (GS) aşağıdaki gibi hesaplanabilir:

$$GS = \left(\frac{CRR_{7.5}}{CSR}\right) * MSF \tag{1.16}$$

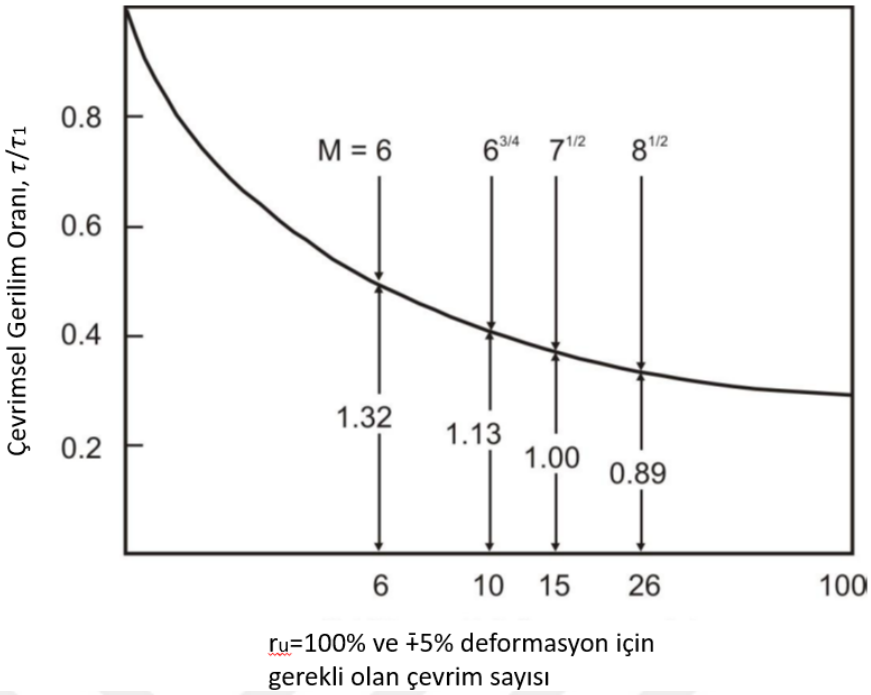
Burada CSR deprem nedeniyle oluşan çevrimsel gerilme oranı, $CRR_{7.5}$ 7.5 büyüklüğündeki bir deprem için çevrimsel direnç oranı (SPT veya CPT, Vs gibi arazi deneyleri ile hesaplanabilir), MSF büyüklük ölçekleme faktörüdür.

Depremin büyüklüğüne göre bir ölçekleme faktörünün kullanılmasının asıl amacı farklı büyüklükteki depremlerin farklı sayıda gerilme üretmeleridir. Seed ve Idriss (1982) ellerindeki sınırlı arazi verisi olması nedeniyle 7.5'ten farklı büyüklükteki depremler için sıvılaşma sınırını net bir şekilde çizememişlerdir. Yapmış oldukları laboratuvar testleri neticesinde Şekil 1.6'da görülebilen eğriyi elde etmişlerdir. Eğri CRR ile sıvılaşmaya neden olacak çevrim sayısının çeşitli büyüklükteki depremler için durumunu ortaya koymaktadır.

Idriss'in MSF yaklaşımı daha sonra tekrar gözden geçirilmiş olup eldeki veriler ile eğri yeniden çizilmiş ve sonunda aşağıdaki formüle ulaşılmıştır:

$$MSF = \frac{10^{2.24}}{M_w^{2.56}} \tag{1.17}$$

Yeniden gözden geçirilmiş ölçekleme faktörleri 7.5 büyüklüğündeki depremlerden küçük depremler için oldukça büyük olmakla birlikte 7.5 büyüklüğündeki depremlerden büyük depremler için de orijinal değerlerden daha düşüktür. Orijinal ölçekleme faktörlerine görece, yenilenmiş yeni ölçekleme faktörleri 7.5'ten küçük büyüklükler için daha az sıvılaşma hasarının hesaplanmasına, 7.5'ten büyük büyüklükler için de daha fazla hesaplanmasına neden olmaktadır [6].



Şekil 1.7 CSR ve sıvılaşmaya neden olacak çevrim sayısı arasındaki ilişkiyi gösteren temsili grafik

Seed ve Idriss (1982), yenilenmiş Idriss ve diğer bazı araştırmacıların MSF için önerileri Tablo 1.2'de görülebilmektedir [26].

Yaygın mühendislik uygulamaları için 7.5'ten küçük depremlerde alt sınır Tablo 1.2'deki 3. sütunda yer alan Idriss'in önerisi olmakla beraber üst sınır Tablo 1.2'deki 6. sütunda yer alan Andrus ve Stokoe (1997)'dir.

7.5'ten büyük depremler için Youd vd. (2001) Idriss tarafından önerilen yeni faktörlerin (Tablo 1.2, sütun 3), kullanılmasını önermişlerdir. Bu yeni faktörlerin Seed ve Idriss (1982)'den küçük olmasından ötürü, hesaplanan sıvılaşma hasarı daha büyük olacaktır. 8'den büyük depremler hakkında yeterli veri olmadığı için yazarlar aynı yaklaşımın mühendislik uygulaması için kullanılabileceğini önermişlerdir.

Daha önce de bahsedildiği gibi basitleştirilmiş yöntem sadece düşük statik gerilmelerin olduğu hafif eğimli araziler ve düşük örtü yüküne maruz, 15 metreden sığ derinlikler için geliştirilmiş ve doğrulanmıştır. Bu nedenle Seed (1983) tarafından geliştirilen K_σ ve K_α düzeltme katsayıları yalnızca uzmanlık gerektiren mühendislik uygulamalarının kullanımında uygundur. Daha çok toprak set barajların ve büyük yapıların sıvılaşma kaynaklı hasarı için kullanılması uygun sıvılaşmaya karşı güvenlik sayısının hesabına aşağıdaki şekilde dahil edilebilir [6].

$$FS = \left(\frac{CRR_{7.5}}{CSR}\right) * MSF * K_\sigma * K_\alpha \tag{1.18}$$

Tablo 1.3 Çeşitli araştırmacıların MSF için önerileri

M*	Seed ve Idriss (1982)	Idriss**	Arango (1996)		Andrus ve Stokoe (1997)	Youd ve Noble (1997)		
			Uzaklık	Enerji		PL 20%	PL 32%	PL 50%
5.5	1.43	2.20	3.00	2.20	2.80			4.44
6.0	1.32	1.76	2.00	1.65	2.10	2.86	3.42	2.92
6.5	1.19	1.44	1.60	1.40	1.60	1.93	2.35	1.99
7.0	1.08	1.19	1.25	1.10	1.25	1.34	1.66	1.39
7.5	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.20	1.00
8.0	0.94	0.84	0.75	0.85	0.8 ?	- - -	- - -	0.73?
8.5	0.89	0.72	-	-	0.65?			0.56?
?: Oldukça belirsiz değerler								
*: Depremin büyüklüğü								
**: Seed Memorial Lecture (T.L. Youd, 1997, sözlü görüşme; Youd vd., 2001)								

Burada K_σ yüksek statik normal gerilmeye maruz kalan zemin katmanları için düzeltme katsayısını, K_σ ise yüksek statik kayma gerilmesine maruz kalan zemin katmanları için düzeltme katsayısını temsil etmektedir.

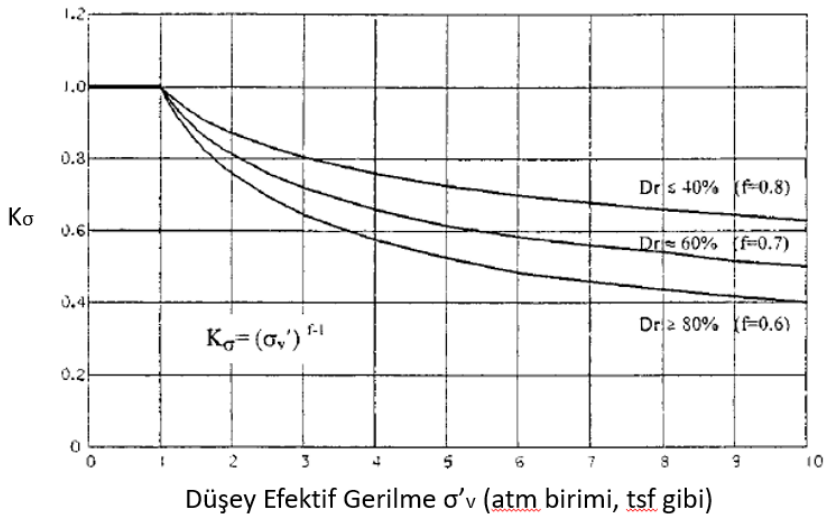
Seed (1983) CRR ve efektif örtü yükü arasındaki lineer olmayan ilişki nedeniyle K_σ düzeltme katsayısını önermiştir. 100 kPa'dan büyük gerilmelere maruz zemin katmanları için kullanılacak katsayı aşağıdaki formül ile hesaplanabilir:

$$K_\sigma = \left(\frac{\sigma'_{v0}}{P_a} \right)^{f-1} \tag{1.19}$$

Burada σ'_{v0} efektif örtü yükünü, P_a atmosfer basıncını, f ise arazi koşullarına (göreli sıkılık, gerilim geçmişi, zeminin yaşı ve aşırı konsolide oranı) göre değişkenlik gösteren bir üsteldir. f'nin K_σ üzerindeki etkisi için Şekil 1.8'deki grafik kullanılabilir [6].

Rölatif sıkılığın %40-60 arasında olduğu durumlarda f değeri 0.7-0.8 aralığında, rölatif sıkılığın %60-80 arasında olduğu durumlarda ise f değeri için 0.6-0.7 seçilebilmektedir. Hynes ve Olsen pratik mühendislik uygulamalarında hem temiz kum ve hem siltli kum için bu değerlerin minimum ve en konservatif şekilde olmasını önermiştir [6].

Düşük çevresel basınca maruz, kısmen sıkı-sıkı granüler zeminler gibi genişleyen zeminlerin sıvılaşma direnci statik kayma gerilmesinin artması ile artış gösterir. Bunun aksine yüksek çevresel basınca maruz, gevşek-kısmen sıkı zeminler gibi büzülebilen zeminlerde ise artan statik kayma gerilmesi ile sıvılaşma direncinde



Şekil 1.8 Mühendislik uygulamalarında K_σ seçiminde kullanılabilecek önerilen eğri

azalma görülür. Statik kayma gerilmesinin sıvılaşmaya olan etkisini hesaplamalara dahil etmek için Seed (1983) K_α düzeltme katsayısını önermiştir. Ancak geoteknik deprem mühendisliği alanında uzman olmayan kişilerin veya rutin mühendislik uygulamalarında K_α düzeltme katsayısının seçiminde kullanılabilen grafiklerin kullanılmaması önerilmektedir [6].

1.6.3 Boulanger ve Idriss (2014) Sıvılaşma Analizi Yöntemi

Seed ve Idriss (1967) tarafından başlatılan sıvılaşma tetikleme potansiyelini değerlendirmek için strese dayalı yaklaşım, son 45 yıldır yaygın olarak kullanılmaktadır [6, 7, 13, 14, 20]. Idriss ve Boulanger (2008) yaklaşımına yeni sıvılaşma vakaları eklenerek geliştirilmiştir. Çok sayıda araştırmacı tarafından benimsenen temel çerçeve, depremin neden olduğu döngüsel gerilme oranlarını (CSR) zeminin döngüsel direnç oranları (CRR) ile karşılaştırır. CSR ve CRR'nin hesap şekilleri diğer iki yöntemle aynı şekilde olmakla birlikte derinlik düzeltme faktörü olan r_d aşağıdaki şekilde hesaplanmaktadır.

$$\begin{aligned} r_d &= \exp[\alpha(z) + \beta(z).M] \\ \alpha(z) &= -1.012 - 1.126\sin(\frac{z}{11.73} + 5.133) \\ \beta(z) &= 0.106 + 0.118sin(\frac{z}{11.28} + 5.142) \end{aligned} \tag{1.20}$$

Burada z derinliği temsil etmekte olup diğer yöntemlerden farklı olarak örtü yükü düzeltmesi aşağıdaki şekilde uygulanmaktadır:

$$K_\sigma = 1 - C_\sigma \ln(\frac{\sigma'_v}{P_a}) \leq 1.1 \quad C_\sigma = \frac{1}{18.9 - 2.55\sqrt{N_{1,60cs}}} \leq 0.3 \tag{1.21}$$

Bunlara ek olarak deprem büyütme katsayısı da aşağıdaki şekilde hesaplanabilmektedir.

$$MSF = 1 + (MSF_{max} - 1)(8.64 \exp\left(-\frac{M}{4}\right) - 1.325)$$
$$MSF_{max} = 1.09 + \left(\frac{(N_{1,60cs}}{31,5}\right)^2 \leq 2.2 \tag{1.22}$$

Güncellenen veriler ile yeniden gözden geçirilen veri setinden elde edilen sonuçların Idriss ve Boulanger (2008) ile uyumlu olduğu görülmüştür [27]. Analizlerin en son 2014 yılında yenilenmiş olmasına istinaden yöntem ismi olarak Idriss ve Boulanger (2008) değil Boulanger ve Idriss (2014) kullanımı tercih edilmiştir [21].

1.7 Sıvılaşma Şiddeti İndeksi (LSI)

Zemin tabakalarının sıvılaşma potansiyellerinin değerlendirilmesi için güvenlik sayısı (GS) hesaplanarak, bu değerin sınır değere göre durumu değerlendirilmelidir. Güvenlik sayısı bir zemin profilinin, katmanın sıvılaşma potansiyelini ölçmede kullanılabilse de sıvılaşma neticesinde oluşabilecek potansiyel hasarın şiddeti hakkında net bir bilgi vermemektedir. Bu nedenle potansiyel olarak sıvılaşabilen bir zeminin doğurabileceği yıkıcı etkilerin hesabı için sıvılaşma indekslerine başvurulması gerekmektedir. Bu tez kapsamında zemin sıvılaşma indekslerinden Youd ve Perkins (1987) Sıvılaşma Şiddeti İndeksi (LSI) incelenecektir [28].

Sıvılaşmanın bir sonucu olarak mühendislik yapılarında meydana gelen hasar genellikle sıvılaşma ile ilişkili farklı zemin deformasyonunun tipinin ve miktarının bir fonksiyonudur. İlk defa Youd ve Perkins (1987) tarafından önerilen sıvılaşma şiddeti indeksi daha sonra Yılmaz ve Çetin (2004) tarafından da geliştirilmiştir [29].

Youd ve Perkins (1987) Sıvılaşma Şiddeti İndeksi (LSI) hesabı için aşağıdaki formülü önermişlerdir:

$$LSI = -3.49 - 1.86 - logR + 0.98M_w \tag{1.23}$$

Burada;

- LSI: Sıvılaşma Şiddeti İndeksi
- R: Sismik enerji kaynağına olan yatay uzaklık (km)
- M_w: Depremin moment magnitüdür.

1.8 Sıvılaşma Hasarı

Suya doygun granüler zeminlerin kuvvetli yer hareketi ile sarsıntıya maruz kalması neticesinde sıvılaşabileceği, sıvılaşma neticesinde zeminin taşıma gücünde kayıp, altyapıda hasar, bina altında oturma, yanal yayılma gibi problemlerin yaşanabileceği bilinmektedir.

1.8.1 Bina Altında Meydana Gelebilecek Oturmalar

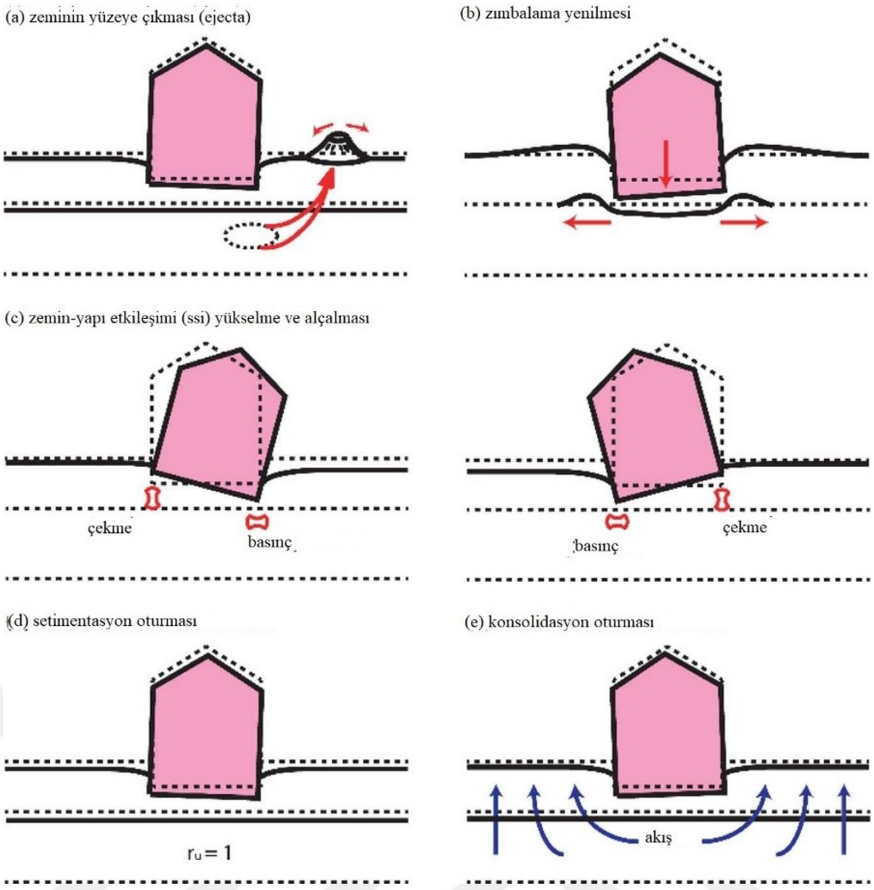
Deprem sarsıntısına maruz kalan granüler zeminlerde görülen sıkılaşma eğilimi hakkında birçok çalışma mevcuttur. Yeraltındaki bu sıkılaşma yüzeyde kendini oturtma olarak gösterir. Depremden kaynaklanan bu bina oturmaları genellikle yüzeysel temellere oturan binaları etkilemektedir.

Sıvılaşmadan kaynaklı bina oturmalarını üç ana mekanizma yürütür: Kayma gerilmeleri ile tetiklenen zemin deformasyonu (shear-induced ground deformation), yapı temelinin altındaki zeminin kum kaynaması şeklinde yer üstüne çıkması ile oluşan zemin deformasyonu (ejecta-induced ground deformation) ve taneli zeminlerin yerleşmesi ile ortaya çıkan hacimsel zemin deformasyonu (volumetric-induced ground deformation). Şekil 1.9'de bina altında meydana gelebilecek bu deformasyonlar görülebilir [30].

Bina etkisini göz ardı eden, serbest yüzey (free-field), tek doğrultulu (1D) sıvılaşma sonrası oturmalarının tahmininde kullanılan deneysel yöntemler mevcuttur [31]. Ancak hacimsel deformasyonlardan kaynaklanan bina oturmalarının yanında kayma gerilmelerinden kaynaklanan ve binayı destekleyen zeminin yeryüzüne çıkmasıyla meydana gelen oturmaların da dikkate alınması gerekir [32]. Sıvılaşmaya neden olacak bütün mekanizmaların dikkatlice düşünülerek uygulanması ile lineer olmayan zemin-yapı etkileşimi analizleri sıvılaşmadan kaynaklı bina oturmalarının hesaplanmasında kullanılabilir. Ancak bu tür analizler yapmadan önce sıvılaşmadan kaynaklı bina oturmalarının basit bir şekilde tahmin edilmesi yararlı olacaktır. Bray ve Macedo'nun (2018) basitleştirilmiş sıvılaşma kaynaklı bina oturmaları hesaplarının, lineer olmayan zemin-yapı etkileşimi analizleri ile bulunan sonuçlarla tutarlı olduğu görülmüştür [33].

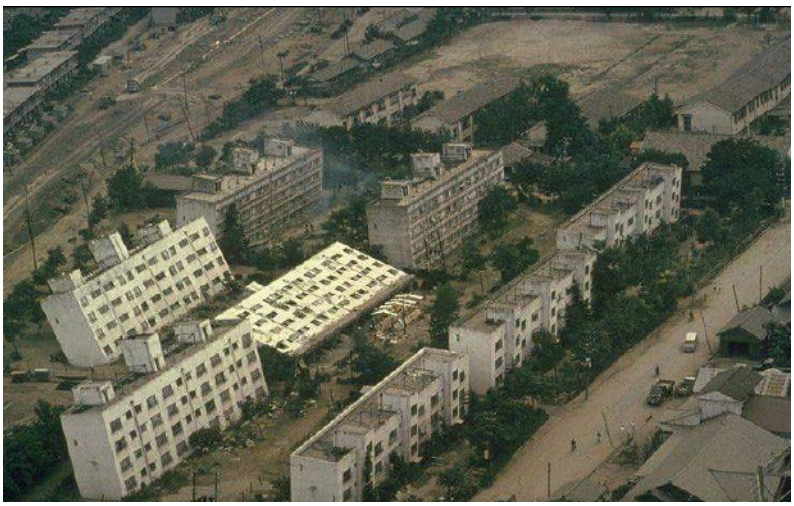
1.8.2 Zeminin Taşıma Gücünü Kaybetmesi

Sıvılaşma nedeniyle zeminler taşıma güçlerinde önemli bir ölçüde kayıp yaşayabilir. Binayı taşıyan zeminde yaşanacak taşıma gücü kayıpları nedeniyle binalarda farklı oturmalar, dönme, yana yatma gibi problemler oluşabilir. Şekil 1.10'da 1964 Niigata depreminde nedeniyle binayı destekleyen zeminin mukavemetini kaybetmesi



Şekil 1.9 Sıvılaşma nedeniyle oluşan bina oturması mekanizmaları

nedeniyle oluşan hasar görülebilmektedir [4].



Şekil 1.10 1964 Niigata depremi nedeniyle mukavemetini kaybetmiş zeminde meydana gelen hasar

1.8.3 Yanal Yayılma

Sıvılaşma nedeniyle oluşabilecek yanal yayılmaların hesabı bu tezin ana konusunu oluşturduğundan ilgili konu bir sonraki bölümde detaylıca incelenecektir.

1.9 Sıvılaşma ve Olası Hasar Tahmininde Kullanılabilecek Diğer Parametreler

Zeminlerin sıvılaşma potansiyellerinin ve potansiyel olarak sıvılaşabilir zeminlerde meydana gelebilecek olası hasarların tahmininde kullanılan yöntemlerin büyük bir çoğunluğu en büyük yer ivmesine dayanmaktadır. Ancak en büyük yer ivmesine ek veya alternatif olarak kullanılabilecek parametreler de mevcuttur. Bu tez kapsamında bu parametrelerden kayma dalgası hızı (V_s), en büyük yer hızı (PGV), Arias şiddeti (I_a) ve 5 cm/sn^2'den küçük amplitüdlerin elimine edilmesiyle elde edilen kümülatif mutlak hız (CAV_5) incelenecektir.

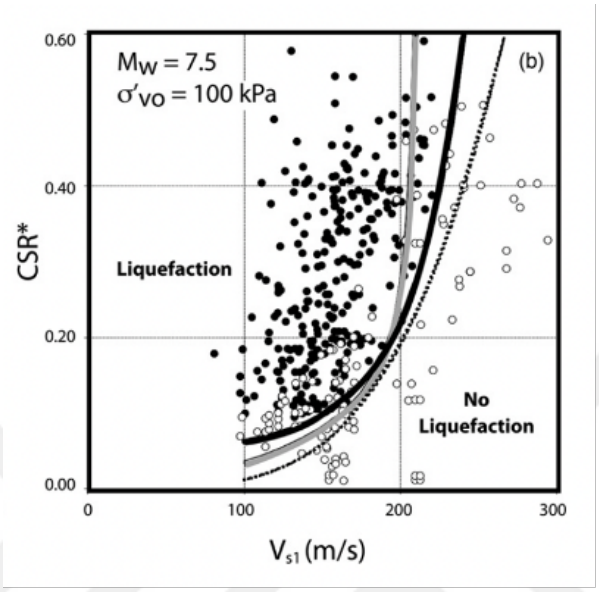
1.9.1 Kayma Dalgası Hızı

Andrus ve Stokeo (2000) penetrasyona dayalı yaklaşımlara umut verici bir alternatif veya ek olarak kayma dalgası hızı V_S'nin olabileceğini belirtmiştir [34]. Hem sıvılaşma direncinin hem de V_S'nin benzer etmenlerden (zeminin jeolojik yaşı, boşluk oranı, zeminin geçmişte maruz kaldığı gerilmeler) etkilenmesi, parametrenin sıvılaşma direnci indeksi olarak kullanımını sağlam temellere oturmasını sağlamaktadır.

Andrus vd. (2000) sıvılaşma analizlerinde kayma dalgası hızının kullanımının avantajlarını şu şekilde özetlemiştir:

- Çakıllı zeminler gibi penetrasyon testlerinin problemli olabileceği zeminlerde numune alımının güç olması,
- Küçük numuneler üzerinden belirlenebilmesinin hem saha hem de laboratuvar ortamında kullanımını arttırması,
- Kayma dalgası hızının, küçük gerinim kayma modülü (Gmax) ile doğrudan ilişkili olması,
- Kayma dalgası hızının (veya Gmax) deprem durumunda oluşacak zemin-yapı etkilemişinde kullanılabilmesi,
- Örnek alımının mümkün olmadığı (düzenli depolama sahaları, sondaja izin verilmeyen bölgeler) veya oldukça güç olduğu (kaya, çakıl, mermer gibi) durumlarda kullanılabilmesidir.

Kayen vd. (2013) ise yapmış oldukları çalışma neticesinde geliştirdikleri yeni korelasyonlar, yüksek CSR değerlerinde sismik zemin sıvılaşmasının değerlendirilmesine, özellikle, sıvılaşma sahaları için düzeltilmiş kayma dalgası hızının (V_{s1}) üst sınırını 215 m/s'de sınırlamak için hiçbir temel bulunmadığına ilişkin önemli bilgiler sağlamışlardır [35].



Şekil 1.11 Çevrimsel gerilme oranı ve V_{s1} arasındaki ilişki

1.9.2 En Büyük Yer Hızı (PGV)

En büyük yer hızı (PGV) deprem sarsıntısının büyüklüğünü göstermek için yaygın olarak kullanılan bir diğer parametredir. Midorikawa ve Wakamatsu (1988) geçmişte sıvılaşan zeminlerde yaptıkları çalışmalar sonucunda, 15 cm/s'den büyük PGV değerlerinin zeminde sıvılaşmaya işaret ettiğini, ancak net bir korelasyon olmadığını göstermiştir [36].

Geofiziksel öneme sahip olmadığı ve deprem mühendisliği için sınırlı bir değeri olduğu yaygın olarak kabul edilmesine rağmen, en büyük yer ivmesi (PGA) en yaygın kullanılan yer hareketi parametresi olmaya devam etmektedir. Bunun nedeni, büyük ölçüde, depreme dayanıklı tasarımın çoğunun ivmenin tepki spektrumuna dayalı olması ve PGA değerinin sıfır periyottaki spektral koordinata karşılık gelmesidir [37, 38].

Makris ve Black (2004), deprem sarsıntısı için güvenilir bir yoğunluk ölçüsü olarak en büyük yer hızının (PGV) "iyiliğini" araştırmıştır. Çalışma kapsamında M_w>7.2 ve M_w>6.7 büyüklüğündeki depremler incelenmiş olup düşük ila orta periyotlu yapıların tepkisi söz konusu olduğunda (T<1,5–2,5 s) birçok durumda en yüksek yer hızının marjinal bir öneme sahip olduğu gösterilmiştir [39].

Sıvılaşmanın başlangıcı için göstergeler, yüzey hareketinin yatay frekans içeriği ve yüzeydeki yatay PGV üzerindeki eşiklerdir. Hem PGA hem de PGV'ye dayanarak bir sıvılaşma potansiyeli değerlendirmesi yapan Orense (2005), yalnızca PGA kullanımının yer hareketinin frekans içeriğinin etkisinin göz ardı edilmesine neden olduğunu ve analizi yüksek frekans-düşük enerji ivme artışlarına duyarlı hale getirdiğini ortaya koymuştur [38].

1.9.3 Arias Şiddeti (I_a)

İlk kez 1970 yılında Arturo Arias tarafından tanımlanan şiddet ölçüsü kuvvetli yer hareketinin yatay düzlemdeki ivme-zaman kayıtlarından faydalanılarak hesaplanan bir büyüklüktür [40]. Temel frekansları $(0;\infty)$ içinde eşit olarak dağılmış olan sonsuz bir tek serbestlik dereceli osilatör seti tarafından absorbe edilen birim ağırlık başına kümülatif enerji ile ilgili olan şiddet ölçütü aşağıdaki formül yardımı ile hesaplanmaktadır:

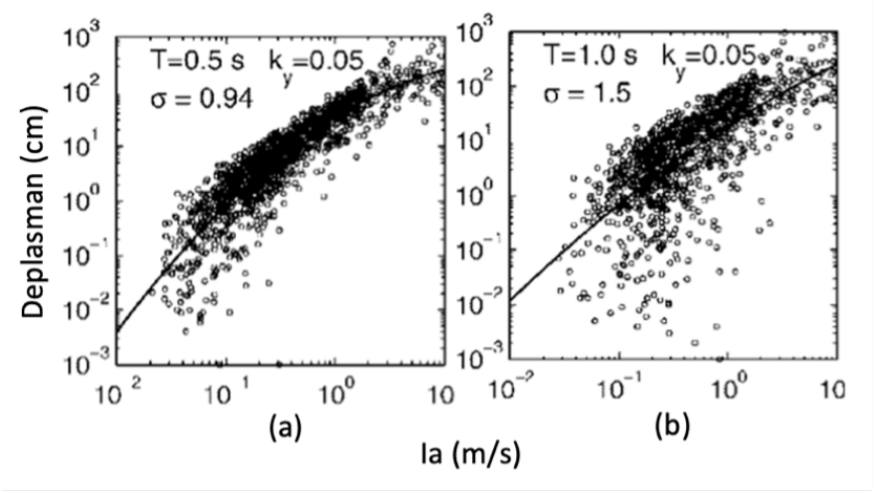
$$I_a = \frac{\pi}{2g} \int_0^{T_d} [a(t)]^2 \, dt \tag{1.24}$$

Arias şiddeti yukarıdaki formülden de görülebileceği ivme (a), deprem ivme kaydının toplam süresi (T_d) ve yerçekimi ivmesine (g) bağlıdır. Yapılan çalışmalar göstermiştir ki depremde meydana gelecek olası mühendislik problemlerinin (sıvılaşma, şev stabilitesi, yapıların dinamik tepkisi gibi) etkisi için kullanılabilecek basit ancak bir o kadar da etkili bir ölçüttür. Birçok araştırmacının dikkatini çeken şiddet ölçütü için literatürde birçok çalışma mevcuttur.

Travasarou vd. (2003) geçmişte geliştirilen eşitliklerin 7 büyüklüğündeki depremler için oldukça fazla, 6 büyüklüğüne eşit veya 6 büyüklüğünden küçük depremler için ise oldukça düşük tahmin edilmesine neden olduğunu belirtmiştir [41]. 75 farklı depremden toplanan 1208 deprem kaydını inceleyen araştırmacılar Arias şiddetinin katı sistemler için (Periyodu 1 saniyeden düşük şevler gibi) geleneksel olarak kullanılan PGA ve PGV^2 gibi parametrelerden daha iyi sonuç verdiğini ancak periyodu 1 saniyeden büyük şevler için hız bileşenlerinin kullanılmasının daha uygun olabileceğini belirtmişlerdir.

$$\begin{aligned} \ln(I_a) = & c_1 + c_2(M-6) + c_3 \ln(M/6) + c_4 \ln\left(\sqrt{R^2+h^2}\right) \\ & + (s_{11} + s_{12}(M-6))\, S_C + (s_{21} + s_{22}(M-6))\, S_D \\ & + f_1 F_N + f_2 F_R \end{aligned} \tag{1.25}$$

Arias şiddetinin hesabı için yukarıdaki formül önerilmiş olup formülde yer alan ifadeler sırası ile,



Şekil 1.12 T=0.5 ve T=1 s periyot için deplasman-I_a ilişkisi

- c_1=2.8, c_2=-1.981, c_3=20.72 ve c_4=-1.703 olmak üzere birer katsayı,
- M depremin moment büyüklüğü,
- R sismik kaynağa olan en yakın mesafe (km),
- Regresyon ile belirlenen h depremin fiktif hiposantr derinliği, 8.78,
- s_{11}=0.454, s_{12}=0.101, s_{21}=0.479 ve s_{22}=0.334 olmak üzere birer katsayı,
- S_c ve S_D zemin tipine bağlı olarak değişen indikatör katsayılar (B tipi zeminler için her ikisi de 0, C tipi zeminler için sırası ile 1 ve 0, D tipi zeminler içinse sırası ile 0 ve 1),
- F_N ve F_R fay tipine bağlı olarak değişen indikatör katsayılar (doğrultu atımlı faylar için her ikisi de 0, normal faylar için sırası ile 1 ve 0, ters/ters-oblik faylar içinse sırası ile 0 ve 1),
- f_1 ve f_2 sırası ile -0.166 ve 0.512'dir.

Burada dikkat edilmesi gereken husus, önerilen eşitliğin kullanımının 4.7≤M≤7.6 ve 0.1≤R≤250 km ile sınırlandırılmış olmasıdır.

1.9.4 Kümülatif Mutlak Hız (CAV-CAV$_5$)

İvmeye 5 cm/s^2'lik eşik değer ile sınırlandırıldığı kümülatif mutlak hız (CAV_5) sıvılaşma hasarı için kullanılabilecek en etkili parametrelerden biridir. Genel olarak aşağıdaki şekilde tanımlanan şiddet indeksi diğer ölçütler olan ivme ve Arias şiddetine göre potansiyel olarak sıvılaşabilir zeminlerde aşırı boşluk basıncı oluşumu

ile çok daha yakından ilişkili olduğunu gösterilmiştir. CAV_5'in sıvılaşma tehlikesi değerlendirmelerine girdi olarak kullanılan kaya hareketleri için verimli, yeterli ve öngörülebilir bir yoğunluk ölçüsü olduğu gösterilmiştir [42].

$$CAV_5 = \int_0^{\infty} \langle \chi \rangle |a(t)| dt \text{ where } \langle \chi \rangle = \begin{cases} 0 & \text{for } |a(t)| < 5 \text{ cm/sec}^2 \\ 1 & \text{for } |a(t)| \geqslant 5 \text{ cm/sec}^2 \end{cases} \tag{1.26}$$

Travasarou vd. (2003) gibi bir yaklaşım izleyen Kramer ve Mitchell (2006) CAV_5 için aşağıdaki eşitliği önermiştir [41]:

$$\ln CAV_5 = c_1 + c_2(M-6) + c_3 \ln(M/6) + c_4 \ln\left(\sqrt{R^2+h^2}\right) + f_1 F_N + f_2 F_R \tag{1.27}$$

Burada;

- c_1, c_2, c_3 ve c_4 birer katsayı olmak üzere sırası ile 3.495, 2.764, 8.539 ve 1.008,
- M depremin moment büyüklüğü,
- R sismik kaynağa olan en yakın mesafe (km),
- Regresyon ile belirlenen h depremin fiktif hiposantr derinliği, 6.155,
- F_N ve F_R fay tipine bağlı olarak değişen indikatör katsayılar (doğrultu atımlı faylar için her ikisi de 0, normal faylar için sırası ile 1 ve 0, ters/ters-oblik faylar içinse sırası ile 0 ve 1),
- f_1 ve f_2 sırası ile -0.464 ve 0.5165'tir.

1.9.5 PGV^2/PGA

İlk kez Pineda ve Ordaz (2007) tarafından önerilen PGV^2/PGA parametresi en büyük yer ivmesi PGA ile en büyük yer hızı PGV'nin birleşiminden oluşmuştur. Özellike gömülü boru hattlarında meydana gelen hasar tahmini için tek başına PGV'den daha iyi korelasyon gösterdiği ortaya konulmuştur [43].

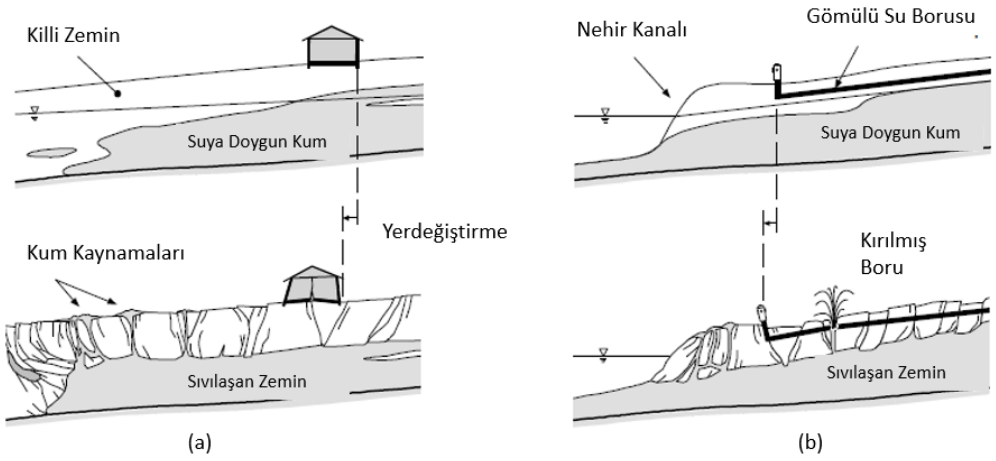
2
SIVILAŞMA KAYNAKLI YANAL YAYILMALAR

Bir önceki bölümde sıvılaşmanın tanımı yapılmış olup, oluşum mekanizması ve literatürde kendine yer bulmuş bazı analz yöntemleri incelenmiştir. Sıvılaşma kaynaklı deformasyonlar genel olarak iki ana kategoride incelenebilir: Yatay deformasyon ve düşey deformasyon. Bu bölüm kapsamında tezin ana konusunu oluşturan sıvılaşma kaynaklı yanal yayılmalar incelenecektir.

2.1 Yanal Yayılmanın Tanımı

Sıvılaşmanın kendisi doğrudan hasara neden olmaz. Hasar, sıvılaşma nedeniyle oluşan deformasyonlar, yeryüzünde oluşan deplasmanlar veya insan yapımı mühendislik yapılarında meydana gelen zemin yenilmesi ile meydana gelir. Yatay deformasyonlar nedeniyle oluşan deformasyonlar akma yenilmeleri, yanal yayılmalar ve zemin osilasyonları içerir. Bu yenilmeler arasındaki bağ geçişkendir. Yenilmenin şekli ve büyüklüğü yerel zemin eğimine ya da serbest yüzeye olan yakınlığa, zemin özelliklerine, sıvılaşan tabaka kalınlığına bağlı olarak değişir [44].

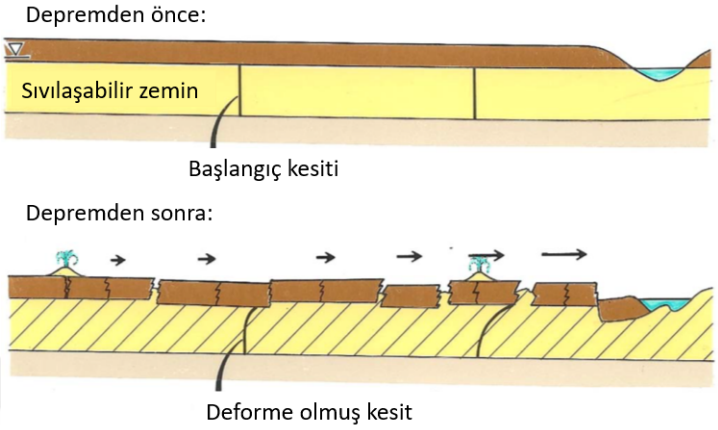
Yanal yayılma, sıvılaşan zemin tabakası üzerinde Şekil 2.1'deki gibi hafif eğim doğrultusunda veya serbest yüzeye doğru ilerlemesi şeklinde tanımlanabilir. Hareket, yerçekimi kuvvetleri ve deprem nedeniyle oluşan içsel kuvvetlerin bir kombinasyonu neticesinde oluşur [24].



Şekil 2.1 (a) düşük eğilim, serbest yüzeyin olmadığı (b) serbest yüzeyin olduğu durumda sıvılaşma kaynaklı yanal yayılmalar

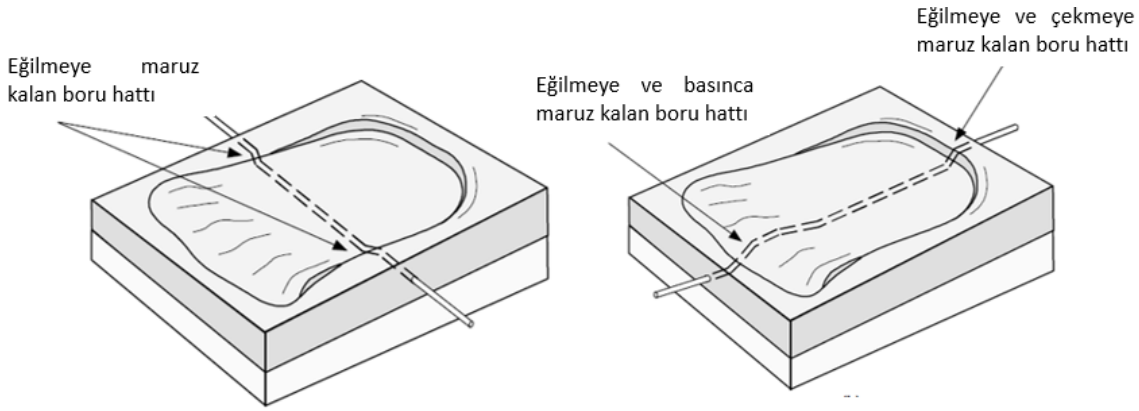
Yanal yayılma sırasında, yüzey katmanları genellikle Şekil 2.2'de görülebildiği gibi

büyük bloklara ayrılır, bu da zemin blokları kademeli olarak hafif eğimlerden veya serbest bir yüze doğru göç ederken zemin dalgaları (zemin salınımı) şeklinde geçici olarak ileri ve geri hareket eder. Deplasmanlar genellikle birkaç metreyi aşmasa da zayıf zeminlere büyük depremlerin etkimesi sonucu daha büyük deplasmanlar görülebilir [2].



Şekil 2.2 Yanal yayılmanın genel karekteristiğini gösteren diyagram

Yanal yayılma, yaşam hattı (lifeline) sistemlerini ciddi şekilde bozabilir (Şekil 2.3) [24]. Boru hattı ağları geniş alanları geçtiği için, bir boru hattı sisteminin bölümlerinin fay hatları ve potansiyel olarak sıvılaşabilir bölgelerden geçmesi oldukça olasıdır. Genellikle bir boru hattının hassas bölgelerin etrafına yönlendirilmesi mümkün olmamaktadır. Bu nedenle sismik bölgelerdeki boru hatlarının tasarımında, büyük zemin yer değiştirmeleri potansiyeline dikkat edilmelidir [45].



Şekil 2.3 O'Rourke ve Lane (1989)'den alınan yanal yayılma nedeniyle boru hatlarında oluşan hasarlar

2.2 Yanal Yayılmayı Etkileyen Faktörler

Bartlett ve Youd (1992) yatay deformasyonların sıvılaşan zemin tabakasındaki kayma mukavemeti kaybının derecesi, çevre zeminin sürekliliği ve sınır koşulları, mobilize

olmuş zemine etkiyen dinamik ve statik makaslama kuvvetlerinin büyüklüğü ve yönü, sıvılaşan zeminde bu kuvvetlerin kayma mukavemetini aştığı süre tarafından kontrol edildiğini belirtmiştir [44]. Bartlett ve Youd (1995) yanal yayılmanın sıvılaşan zemin tabakasının kalınlığı, ince dane oranı, ortalama dane çapı, depremin büyüklüğü ve sismik kaynağa olan uzaklık gibi parametrelerce kontrol edildiğini bildirmiştir [46].

2.2.1 Sıvılaşan Tabaka Kalınlığı

Literatürde kendine yer bulmuş birçok önemli çalışmada sıvılaşan zemin tabakasının kalınlığının, sıvılaşma kaynaklı yanal yayılma büyüklüğünü belirleyen önemli parametrelerden biri olduğunu belirtmiştir [44, 46–48].

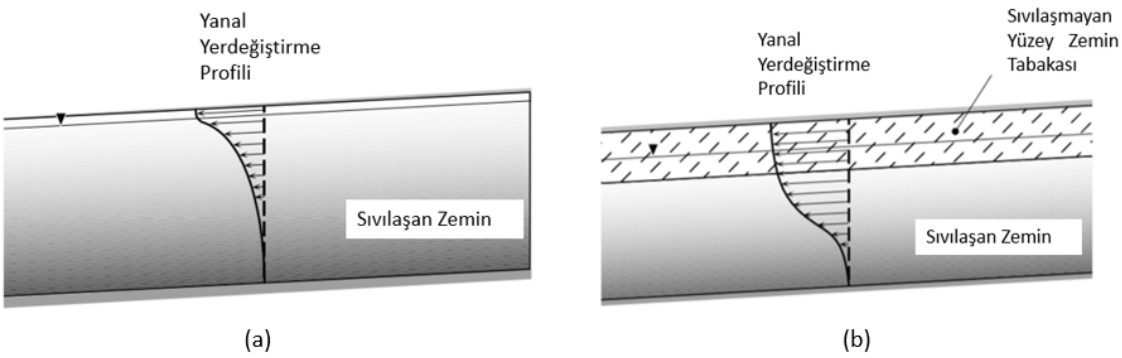
Rauch (1997) sıvılaşan tabaka kalınlığının aşağıdaki mekanizmalarca sıvılaşma kaynaklı yanal yayılmaları kontrol edebildiğini bildirmiştir [24]:

- Kayma deformasyonları sıvılaşan zemin profilinin tüm derinliği boyunca gerçekleştiğinden net yüzey deplasmanı sıvılaşan tabaka kalınlığının artması ile artış gösterir. Kayma deformasyonu derinlik ile değişmiyor olsaydı yanal yayılma profili lineer ve derinlikle artacak şekilde gerçekleşir. Ancak tabi ki bir yanal yayılmada kayma deformasyonları derinlik Şekil 2.5'teki gibi derinliğine göre değişkenlik gösterecektir [24].
- Sıvılaşan zemin profilinin kalınlığı arttıkça yukarı yönlü daha büyük boşluk suyu göçü olacaktır. Bu doğrultuda yüzeye yakın yumuşak bölgenin önemi artacaktır.
- Sıvılaşan tabakanın kalınlığının artışı ile fazla boşluk suyu basıncının drenajı için gerekli olan yol büyüyecektir. Bunun neticesinde daha kalın bir tabaka daha uzun süre sıvılaşmış vaziyette olacak ve bu da daha büyük yüzey deplasmanlarının oluşmasına neden olacaktır.

2.2.2 Topoğrafik Eğim ve Serbest Yüzey

Çeşitli araştırmacılar tarafından topoğrafik eğimin sıvılaşma kaynaklı yanal yayılmalar üzerindeki etkisinin varlığını incelemiştir. Yapılan çalışmalarda yanal yayılmanın hareket yönü genellikle yüzey eğiminin olduğu doğrultuda gerçekleştiği görülmüştür.

Sarsma tablası kullanılarak laboratuvarda yapılan çalışmalardan elde edilen sonuçlar ile arazi gözlemlerinden elde edilen sonuçlar birbirleri ile tam olarak örtüşmemektedir. Laboratuvar ortamında sarma tablası ile gerçekleştirilen deneylerde, saha gözlemlerine dayanan istatistiksel verilere oranla yer değiştirmelerin



Şekil 2.4 (a) geçirimli (b) geçirimsiz bir üst örtü tabakasında yanal yayılma ile oluşacak yerdeğiştirmeyi gösteren zemin kesiti

yüzey eğimi açısından daha çok etkilendiği tespit edilmiştir. Laboratuvar ve saha arasındaki bu farklılığın saha eğiminin tespitinde yaşanabilecek güçlükler olabilmektedir. Laboratuvar ortamında gerçekleştirilen model deneylerde genellikle üniform bir zemin eğim profilinin kullanılışı ancak gerçek saha koşullarında zemin neredeyse düz bir zeminde bile dalgalanmalar, tümsek ve çukurlar bulunmaktadır. Bu doğrultuda sahayı temsil edecek bir topoğrafik eğimin belirlenmesini ve maksimum eğim doğrultusundaki küçük topoğrafik özelliklerin göreli öneminin belirlenmesi güçleştirmektedir [24].

Gerçekte bir yanal yayılmadaki spesifik noktaların hareketi yüzey eğiminin iki farklı ölçüsü ile ilişkili olabilir: İlki, kayan tüm alanın ortalama eğimi kayan kütlenin ortalama hareketini etkiler. İkincisi, kayma kütlesindeki yerel topoğrafik özellikler bir yanal yayılmadaki bir noktadan bir noktaya olan deplasmanı etkiler. Spesifik lokasyonlardaki deplasmanlar, lokal eğimler nedeniyle hareketin genel trendinden farklı olabilir. Yüzey eğiminin yanal yayılmanın hareket yönü üzerindeki etkisi tartışılmaz olsa da etkisinin büyüklüğü tam olarak kestirilememektedir [24].

Aynı zamanda açık kanal gibi bir serbest yüzeyin varlığı sıvılaşma kaynaklı yanal yayılmaları etkileyen önemli faktörlerden biridir [44].

Sıvılaşma kaynaklı yanal yayılmaları etkileyen bir diğer faktör zeminin sıkılık oranıdır. Literatürde genel olarak kabul gören görüş yanal yayılmalarda düzeltilmiş vuruş sayısı 15 ve daha az olan ($SPT-N_{1,60} \leq 15$) zemin katmanlarının etkili olduğudur [48, 49]. Ancak bunun aksine yanal yayılmalarda, düzeltilmiş vuruş sayısı 15'ten büyük olan katmanların da etkili olabileceğini belirten çalışmalar da mevcuttur [50].

Kutter vd. (2004) gerçekleştirdikleri altı büyük ölçekli santrifüj testi çerçevesinde sıvılaşan tabaka kalınlığını ve zeminin sıkılığının oturma ve yanal yayılmalara olan etkisini incelemişlerdir. Yapılan deneylerden elde edilen sonuçlar neticesinde kalınlığı

fazla olan, düzeltilmiş vuruş sayısı 15'ten büyük olan zemin katmanlarının da yanal yayılmada etkili olduğunu ortaya koymuşlardır [50].

Bunn (2014) yapmış olduğu çalışma kapsamında yitim zonlarında meydana gelen büyük ölçekli depremlerden elde edilen verilerle bir veri seti (GELCH) oluşturmuştur. Yitim zonu depremleri sırasında $N_{1,60}$ değeri 15'ten büyük olan zeminlerde olası yanal yayılma, bu araştırmasının birincil ilgi alanı olmuştur. Elde edilen sonuçlarda, 15'ten büyük $N_{1,60}$ değerine sahip zeminlerin yanal yayılmaya maruz kalmama eğiliminde olduğu iddiasını desteklediğini görmüştür. Dalma batma zonu depremleri sırasında orta derecede sıkı zeminlerde (yani $N_{1,60}$'ın 15 ila 30'a eşit olduğu yerlerde) yanal yayılmanın meydana gelip gelemeyeceğini belirlemek için çok daha fazla vaka geçmişi verisi ve gelecekteki çalışmalara ihtiyaç olduğunu ancak sonuç olarak orta derecede sıkı zeminlerde yanal yayılmanın daha az yaygın olduğunu belirtmiştir [51].

2.2.3 İnce Dane İçeriği

İri daneli zeminlerdeki ince dane içeriği ($\mu < 75$ mm) zeminin sıvılaşma karakteristiğini önemli derecede etkilemektedir. Hem sıvılaşma direnci hem de rezidüel kayma dayanımı ince dane içeriğinden etkilenmektedir. Bunlara ek olarak zemindeki ince dane içeriği boşluk suyu basıncının drenajını ve aşırı boşluk suyu basıncının sönümlenmesini engellemektedir. Bu nedenle ince dane içeriğinden, sıvılaşma kaynaklı yanal yayılmaların oldukça etkileneceği söylenebilir.

İnce dane içeriğinin sıvılaşma hasarına olan etkisi hakkında literatürde birçok görüş bulunmaktadır. İnce dane içeriğine dair belirsizlikler sıvılaşma hasarının değerlendirilmesini birkaç şekilde etkileyebilir. Bartlett ve Youd (1995) zemin içeriğinde ince danenin artışının sıvılaşma nedeniyle oluşacak yanal yer değiştirmelerde azalışa neden olacağını belirtmiştir [46]. Plastik ince dane içeriği sıvılaşmayı engelleyecek daneler arası yeterli adezyonu sağlayabilmektedir. Öte yandan Koester (1994) ince dane içeriğinin %30'dan küçük olduğu zeminlerde sıvılaşma direncinin, belirli bir boşluk oranında ince danelerin toplam fraksiyonel ağırlığının zeminin plastisitesinden daha önemli olduğunu belirtmiştir [52].

İnce dane içeriğinin aynı zamanda arazide ölçülen penetrasyon direncinde artışa neden olacağı da unutulmamalıdır. Aynı çevrimsel kayma mukavemetine sahip zeminlerde, ince dane içeriği fazla olan zeminin az olan zemine oranla penetrasyon direnci daha fazladır. Sonuç olarak aynı penetrasyon direncine sahip zeminler kıyaslandığında, ince dane içeriği daha fazla olan zeminin çevrimsel kayma mukavemeti daha fazla olacaktır [24].

Ranga Swamy vd. (2020) zeminde plastisite indeksinin 0'dan 5'e kadar artışının sıvılaşma direncinde artışa neden olurken, 5'ten 15'e kadar artışı sıvılaşma direncinde azalmaya neden olduğu, ancak belirtilen durumlardaki sıvılaşma direncinin (0-15 arasındaki plastisite) hala temiz kumlardan daha düşük olduğu belirtmiştir. Kum iskeletindeki boşluk oranının, ince dane içeriğinin artması ile artış gösterdiğini, bunun da sıvılaşma direncini düşürdüğünü ortaya koymuşlardır. Aynı zamanda %40'a varan ince dane içeren plastik olmayan ve düşük plastik zemin karışımlarının, kumlara göre yüksek sıvılaşma duyarlılığı olan kum benzeri bir davranış sergilediğini belirtmişlerdir. Sonuç olarak, su içeriğinin likit limitin 0,86 katı olduğu ve ince dane içeriğinin $\leq$ %40, likit limitin $\leq$ %40 ve plastik limitin $\leq$ %15 olduğu durumlarda siltli kum (SM) ve killi kum (SC) zeminlerin sıvılaşabildiğini söylemişlerdir [16].

2.3 Sıvılaşma Kaynaklı Yanal Yayılmaların Tahmininde Kullanılan Hesap Yöntemleri

Sıvılaşma kaynaklı yanal yayılmaların anlaşılması ve tahmin edilebilmesi için birçok araştırmacı ve bilim insanı yaklaşık son 60 yıllık dönemde birçok çalışma gerçekleştirmiştir. Gerçekleştirilen bu çalışmaların bir kısmı basitleştirilmiş analitik yöntemlere, bir kısmı nümerik metotlara, bir kısmı araziden toplanan vakaların çoklu lineer regresyon veya makine öğrenmesi yöntemleri ile analizine, bir kısmı ise laboratuvar ve santrifüj deneylerine dayanmaktadır.

Sıvılaşma kaynaklı yanal yayılmaların nümerik olarak modellenebilmesi için, sismik uyarılmanın, boşluk suyu basıncındaki artışın zeminde yaratacağı yumuşamanın, kayma mukavemetindeki hızlı düşüşün, dinamik yüklemeden sonraki deplasmanların devamlılığının ve boşluk suyu basıncının sönümlenmesinin ardından meydana gelecek olan konsolidasyonun etkilerinin detaylı bir şekilde irdelenmesi gerekmektedir (Baziar ve Azizkandi, 2013).

Hamada vd. (1986) sıvılaşma kaynaklı yanal deplasmanların hesaplanması için sonlu elemanlar tekniğini kullanan ilk araştırmacılar olmuştur. Noshiro, Japonya'daki yanal yayılmayı modellemek için 2 boyutlu sonlu eleman tekniğini kullanmışlardır. Ancak kurmuş oldukları model, malzemenin elastik davranışı varsayımına oldukça fazla bağlıdır. Nümerik analiz yöntemleri, saha gözlemlerine dayanan yöntemlere oranla daha sınırlı başarılı sonuçlar alınmasına neden olmaktadır. Bu nedenle nümerik analiz yöntemleri kullanım alanı bakımından kendine fazla yer edinememiştir (Baziar ve Azizkandi, 2013).

Bu çalışma kapsamında öncelikle literatürde kendine yer bulmuş olan önemli

çalışmalar incelenecek olup daha sonra makine öğrenmesine dayanan bir yöntem olan Yapay Sinir Ağları (YSA) irdelenecektir.

Arazide gözlenen vakaların çoklu doğrusal regresyon analizleri ve makine öğrenmesi yöntemleri ile irdelenmesine dayanan görgül yöntemler, sıvılaşma kaynaklı yanal yayılmaların hesabında özellikle son yıllarda oldukça sık kullanılmaktadır. Yanal yayılmaların tahmininde yapay sinir ağlarından genetik algoritmalara, bulanık mantıktan karar ağaçlarına kadar birçok makine öğrenmesi uygulaması kullanılabilmektedir.

Literatürde kendine yer bulmuş yöntemlerin büyük bir çoğunluğunda kullanılan veri setleri Standart Penetrasyon Testi ile elde edilmiş olmasına rağmen, az sayıda da olsa Koni Penetrasyon Testi ile elde edilen verilerin kullanıldığı çalışmalar da mevcuttur.

2.3.1 Çoklu Regresyon Analizine Dayanan Yöntemler

Çoklu doğrusal regresyon yönteminin temel amacı bağımlı ve bağımsız değişkenler arasındaki ilişkiyi ifade eden doğrusal bir fonksiyon bulmaktır. Hamada vd. (1986), Barlett ve Youd (1992, 1995), Rauch (1997), Youd vd. (2002), Bardet vd. (2002), Al Bawwab (2005), Gillins ve Bartlett (2013), Goh ve Zhang (2014) gibi birçok araştırmacı regresyon analizleri yardımı ile sıvılaşma kaynaklı yanal yayılmaların hesabında kullanılabilecek bir denklemin elde edilebilmesi için çalışmıştır [24, 44, 46, 48, 53–57].

2.3.1.1 Hamada vd. (1986) Yöntemi

Yapılan çalışmada Noshiro ve Niigata şehirlerinin Niigata depreminden önce ve sonra çekilmiş hava fotoğrafları karşılaştırılmış, elde edilen 60 adet deformasyon vektörü üzerinde regresyon analizleri gerçekleştirilmiştir. Yanal yayılma hareketinin eğim doğrultusunda aşağı yönlü olduğu gözlenmiş olduğundan, Noshiro şehrindeki deplasmanlarının nedeninin topoğrafik eğim olduğunu ve hareketin yönünün yüzeydeki çatlaklara dik doğrultuda olduğunu bildirmişlerdir. Niigata şehrinde ise topoğrafik eğimin düşük olduğunu ancak Shinano Nehri'nde görülen 8 metrelik deplasmanlarının nedeninin sıvılaşan tabakaların altındaki eğimin neden olduğunu belirtmişlerdir. Yapılan regresyon analizleri sonucunda, sıvılaşma kaynaklı yanal deformasyonların hesabı için aşağıdaki bağıntıyı önermişlerdir [53]:

$$D = 0.75 * \sqrt[2]{H} * \sqrt[3]{\theta} \tag{2.1}$$

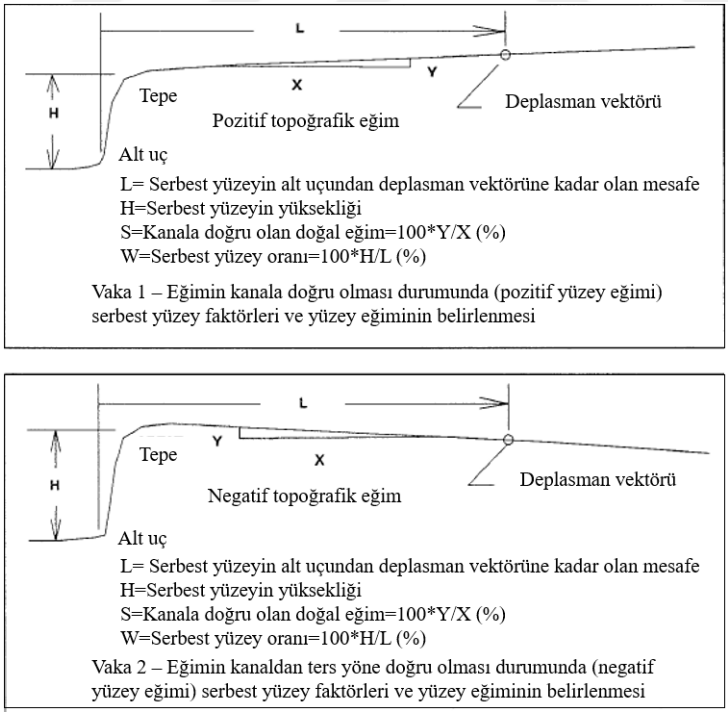
Burada;

- D; yatay doğrultudaki kalıcı deformasyonu,
- H; sıvılaşan tabaka kalınlığını (m),
- θ; Topoğrafik eğim veya sıvılaşan zemin tabakasının tabanının eğiminden büyük olanını (%) temsil etmektedir.

Yapılan çalışmada yalnızca topoğrafik ve jeolojik özelliklerin kullanılması, deprem (depremin büyüklüğü, maksimum yer ivmesi vb.) ve zemin özellikleri (ince dane içeriği, vb.) ile ilgili parametrelerin olmaması, regresyon analizlerinin yapılması için kullanılan verilerin büyük bir çoğunluğunun Noshiro şehrinden elde edilmiş olması dikkate alındında yöntemin kullanımında dikkatli olunması gerektiği açıktır.

2.3.1.2 Barlett ve Youd (1992-1995) Yöntemi

1992 yılında 448, 1995 yılında ise 467 yanal deplasman verisi derlenerek oluşturulan veri setleri üzerinde yapılan Çoklu Doğrusal Regresyon Analizleri (MLR) neticesinde hafif eğilim ve serbest yüzeyin varlığı için denklemler oluşturulmuştur. Serbest yüzey kanal, nehir kesiti vb. durumları tanımlamakta olup bileşenleri Şekil 2.5'deki gibidir [44].



Şekil 2.5 Serbest yüzeyin varlığında pozitif ve negatif eğim durumlarında serbest yüzey faktörleri

Bartlett ve Youd (1995) serbest yüzey ve topoğrafik eğime bağlı olarak aşağıdaki model bağıntılarını geliştirmişlerdir [46]:

Modelin topoğrafik eğim bileşeni:

$$log(D_H) = -15.787 + 1.178M - 0.927logR - 0.013R + 0.429logS + 0.348logT_{15} + 4.527log(100 - F_{15}) - 0.922D50_{15} \quad (2.2)$$

Modelin serbest yüzey bileşeni:

$$log(D_H) = -16.366 + 1.178M - 0.927logR - 0.013R + 0.657logW + 0.348logT_{15} + 4.527log(100 - F_{15}) - 0.922D50_{15} \quad (2.3)$$

Burada;

- D_H; hesaplanan yanal deplasmanı,
- M; depremin büyüklüğünü (M_w),
- R; faya veya sismik enerji kaynağına olan mesafeyi (km),
- S; topoğrafik eğimi (%),
- T_{15}; Düzeltilmiş SPT vuruş sayısı $(N_1)_{60} \leq 15$ olan, sıvılaşan zemin tabakalarının kümülatif kalınlığını (m),
- F_{15}; Düzeltilmiş SPT vuruş sayısı $(N_1)_{60} \leq 15$ olan, sıvılaşan zemin tabakalarının İnce Dane İçeriği yüzdesini (%),
- $D50_{15}$; Düzeltilmiş SPT vuruş sayısı $(N_1)_{60} \leq 15$ olan, sıvılaşan zemin tabakalarının ortalama dane boyutunu (mm),
- W; serbest yüzey oranını temsil etmektedir.

Barlett ve Youd (1995) yapmış oldukları çoklu doprusal regresyon analizlerinde kullanılmak üzere düzeltilmiş Standart Penetrasyon Testi vuruş sayısı 15'ten küçük olan ($(N_1)_{60} \leq 15$) zemin tabakalarının kümülatif kalınlığı T15'in hesabında, kil içeriğinin %15'ten büyük olduğu ve yer altı su seviyesinin üzerinde yer alan tabakaların dahil edilmemesi gerektiğini bildirilmiştir. Aynı zamanda ellerindeki veri setindeki sondaj logları 20 metre derinliğe kadar indiğinden ve bahsi geçen özellikteki

zemin tabakalarının sıvılaşmayacağı düşünüldüğünden yine bu tabakaların T15'in belirlenmesine herhangi bir etkisi olmadığını bildirmişlerdir [46].

Bartlett ve Youd (1995) düzeltilmiş vuruş sayısı 10 ve 20'den küçük ($(N_1)_{60} \leq 10-20$) olan zemin tabakalarının kümülatif kalınlıklarını (T_{10}, T_{20}) da tanımlamışlardır ancak oluşturmuş oldukları veri setinde sıvılaşma kaynaklı yanal yayılmaların genellikle $(N_1)_{60} \leq 15$ ve $M \leq 8$ olduğu durumlarda görüldüğünü tespit ettiklerinden, yanal yayılmaların hesabında T15'in kullanılmasını önermişlerdir [46].

Serbest yüzeyin yüksekliğinin 100 katından büyük serbest yüzey mesafeleri için (W<%1) genellikle topoğrafik eğim hareketin davranışını etkileyen faktör olmaktadır ve modelin topoğrafik eğimi için hesaplanan bileşen formülü kullanılmalıdır. W değerinin 1 ile 5 arasında olduğu durumlarda ($1 \leq W \leq 5$) yüzey eğimli veya serbest yüzeyli durumlardan hangisine daha yakın olduğu ve hangi formüllerin kullanılması gerektiği net değildir. Ancak araştırmacılar W değerinin belirtilen aralıklarda olması durumunda her iki eşitlik yardımı ile yanal deplasmanların hesaplanıp, büyük olan değerin tahmini yanal deplasman olarak seçilmesini önermişlerdir. W değerinin 5 ile 20 arasında olduğu ($5 \leq W \leq 20$) durumda ise serbest yüzey, deplasmanın davranışını kontrol etmektedir. Bu nedenle modelin serbest yüzey için geliştirilmiş eşitliğinin kullanılması gerekmektedir. Veri setini oluşturan dataların büyük bir çoğunluğu W değerinin %20'den küçük veya %20'ye eşit olduğu durumları kapsadığından, değerin %20'den büyük olması durumunda ise yenilme çökmeden veya akmadan kaynaklanabileceğinden eşitliklerin dikkatli bir şekilde kullanılması gerekmektedir.

2.3.1.3 Youd vd. (2002) Yöntemi

Bartlett ve Youd (1995) üzerinde bazı düzenlemeler yapılmıştır. Bu düzenlemeler [48]:

- 1983 Nihonkai-Chubu depreminde oluşan yanal yayılmaların ölçümünde yapılan hatalar düzeltilmiştir.
- Sekiz deplasman vektörü (veya alan) serbest yanal deplasmanın engellenmesi nedeniyle veri setinden çıkartılmıştır.
- 1986 Borah Peak, 1989 Loma Prieta, 1995 Hyogo_Ken Nanbu depremlerine ait yeni veriler veri tabanına eklenmiştir.
- Eşitliklerdeki ortalama dane boyutu $\log D50_{15}$ ifadesi $\log D_{50}+0.1$ halini almıştır.
- Sismik kaynağa veya faya olan uzaklığı temsil eden R'nin yerini $\log R^*$ ifadesi almıştır ve R^* aşağıdaki şekilde hesaplanabilmektedir:

$$R^* = R_0 + R \tag{2.4}$$

$$R_0 = 10^{(0.89M - 5.64)} \tag{2.5}$$

Burada R^* modifiye kaynak mesafesini, R_0 depremin büyüklüğüne bağlı bir sabiti ve M depremin büyüklüğünü temsil etmektedir. Ancak araştırmacılar R değerinin 0.5 km'den küçük olması durumunda, değerin 0.5 olarak alınması gerektiğini belirtmişlerdir.

Yapılan bu düzenlemelerle yeniden yapılan çoklu doğrusal regresyon analizleri neticesinde serbest yüzey ve topoğrafik eğim durumuna göre hesaplanacak yanal deplasman eşitlikleri aşağıdaki formu almıştır:

Modelin topoğrafik eğim bileşeni:

$$\log(D_H) = -16.213 + 1.532M - 1.406\log R^* - 0.012R + 0.338\log W + 0.540\log T_{15} + 3.413\log(100 - F_{15}) - 0.795(\log D50_{15} + 0.1\ mm) \tag{2.6}$$

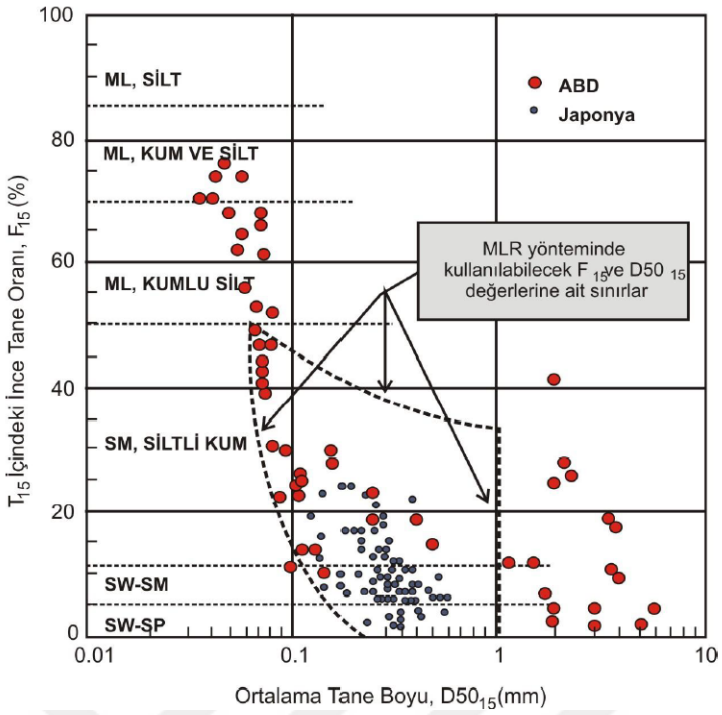
Modelin serbest yüzey bileşeni:

$$\log(D_H) = -16.713 + 1.532M - 1.406\log R^* - 0.012R + 0.592\log W + 0.540\log T_{15} + 3.413\log(100 - F_{15}) - 0.795(\log D50_{15} + 0.1\ mm) \tag{2.7}$$

Youd vd. (2002) modifiye ettikleri çoklu doğrusal regresyon analizinin kullanımında, sıvılaşmayı ve dolayısı ile sıvılaşma kaynaklı yanal yayılmaları etkileyen ince dane içeriği için yöntemlerindeki kısıtlayıcı koşullara dikkat edilmesi gerektiğini belirtmişlerdir. Yöntemin uygulanabilmesi için sınır ince dane içeriği ve ortalama dane boyu grafiği Şekil 2.6'deki gibidir [49].

2.3.2 Yapay Zekaya Dayanan Yöntemler

Sıvılaşma kaynaklı yanal yayılma nedeniyle oluşacak deplasmanların hesaplanması gibi oldukça karmaşık konular makine öğrenmesi/derin öğrenme gibi yapay zekâ teknikleri ile oldukça yüksek doğrulukta çözüme ulaştırılabilmektedir. Titiz bir biçimde oluşturulan bir veri setinin ve doğru yöntemin, algoritmaların seçiminin problemin çözümünde oldukça etkili olacağı açıktır. Analiz için oluşturulan veri setinin bir kısmı makineye problem öğretmek amacıyla kullanılırken, bir kısmı da test



Şekil 2.6 Youd vd. (2002) çoklu doğrusal regresyon yönteminin uygulanabileceği geçerli F_{15} ve $D50_{15}$ değerleri

amacıyla kullanılmaktadır.

Yapay zekâ tekniklerini birçok araştırmacı yanal yayılmalar nedeniyle oluşacak deplasmanların hesabı için kullanılmıştır [58–63]. Yapay Sinir Ağları bir sonraki bölümde detaylı bir şekilde incelenecektir.

2.3.2.1 Wang ve Rahmani (1999) Yöntemi

Sinir ağlarının sıvılaşma nedenli yanal yayılmaların tahmininde kullanıldığı ilk yöntemlerden biridir. Araştırmacılar 467 adet veri içeren Bartlett ve Youd (1995) veri setini kullanmışlardır [46].

Yanal yayılmanın büyüklüğünün tahmini için depremin büyüklüğü (M), sismik enerji kaynağına olan uzaklık (R), topoğrafik yüzey eğimi (S), serbest yüzey oranı (W), düzeltilmiş vuruş sayısı 15'ten küçük olan sıvılaşan tabakaların kümülatif toplam kalınlığı (T_{15}), bu tabakaların ince dane içeriği (FC_{15}) seçilmiştir.

Topoğrafik eğim ve serbest yüzey durumları için ayrı ayrı analizler yapılmıştır. Topoğrafik eğim durumu için eğitim aşamasında 71,1 ve test aşamasında 60,2, serbest yüzey durumu için eğitim aşamasında 85,6 ve test aşamasında 82,1 R^2 değeri elde edilmiştir. Analizlerde herhangi bir doğrulama veri seti oluşturulmamıştır. Sinir ağlarının kullanıldığı ilk yöntemlerden biri olmasına karşın serbest yüzey durumu için

elde edilen veriler tatmin edici seviyededir [64].

2.3.2.2 Baziar ve Gobani (2005) Yöntemi

Youd vd. (2002) veri seti ile yapay sinir ağları kullanan araştırmacılar Wang ve Rahmani (1999) yönteminde kullanılan bağımsız değişkenlere ek olarak Youd vd. (2002) veri setinde yer alan ortalama dane çapını da kullanmışlardır. Tüm verilerin %78'ini eğitim ve %22'sini test için ayıran araştırmacılar doğrulama için üçüncü bir set oluşturmamıştır.

Girdi ve çıktı parametreleri 0 ve 1 arasında ölçeklendirilmiş olup aktivasyon fonksiyonu olarak sigmoid fonksiyonu seçilmiştir. Topoğrafik eğim ve serbest yüzey durumları ayrı ayrı değerlendirilmemiş olup eğitim aşamasında 95 ve test aşamasında 85 R^2 değeri elde edilmiştir. Ancak bağımsız değişkenlerin yanında bağımlı değişkenin (çıktı) de ölçeklendirilmesi yüksek R^2 değerlerinin elde edilmesine neden olmuş olabileceği düşünülmektedir [65].

2.3.2.3 Javadi vd. (2006) Yöntemi

Standart Penetrasyon Testi verileri ile oluşturulan Youd vd. (2002) veri tabanına, canlıların biyolojik evrimini taklit eden genetik programlama yöntemi uygulanmıştır. Genetik programlamanın avantajlarından biri, yeni (yapay) (örneğin Youd vd. (2002)'deki R*) veya fonksiyonel (logaritmik gibi) parametrelerin kullanılmasına gerek kalmamakta, parametreler oldukları gibi, herhangi bir kullanılabilmektedir [58].

Yapılan analizler neticesinde sıvılaşma nedenli oluşacak yanal yayılma deplasmanları, Youd vd. (2002)'de olduğu gibi topoğrafik eğim durumu ve serbest yüzey durumu olmak üzere iki eşitlik tanımlanarak hesaplanabilmektedir.

Serbest yüzey durumu için yanal yayılma miktarı:

$$D_H = -163.1\frac{1}{M^2} + 57\frac{1}{R * F_{15}} - 0.0035\frac{{T_{15}}^2}{W * {D50^2}_{15}} - 0.26\frac{{T^2}_{15}}{{F^2}_{15}} + 0.006{T^2}_{15} - 0.0013W^2 + 0.0002M^2 * W * T_{15} + 3.7 \quad (2.8)$$

Hafif topoğrafik eğim durumu için yanal yayılma miktarı:

$$D_H = -0.8\frac{F_{15}}{M} + 0.0014{F^2}_{15} + 0.16T_{15} + 0.112S + 0.04\frac{S * T_{15}}{D50_{15}} - 0.026RD50_{15} + 1.14 \quad (2.9)$$

Elde edilen bu eşitlikler doğrultusunda araştırmacılar 1.5 metreden büyük yanal yayılmalar için algoritmanın yüksek doğrulukla sonuç verdiğini ancak 1.5 metreden küçük yanal yayılmalar için bu durumun söylenemeyeceğini belirtmişlerdir. Youd vd. (2002)'nin belirttiği gibi bu sorunu ortadan kaldırmak için ortalama bir yanal deplasman miktarının belirlenmesi önemlidir. Bu nedenle araştırmacılar iki özel genetik programlama modelini ortalama yanal yayılma miktarını belirlemek amacıyla eğitmişlerdir. Bu eğitim ve test uygulamaları sırasında yanal yayılma deplasmanlarının 1.5 metreye kadar olduğu veriler kullanılmıştır. Bir seri eğitimden sonra araştırmacılar ortalama yanal yayılma deplasmanlarının hesabı için aşağıdaki eşitlikleri önermişlerdir.

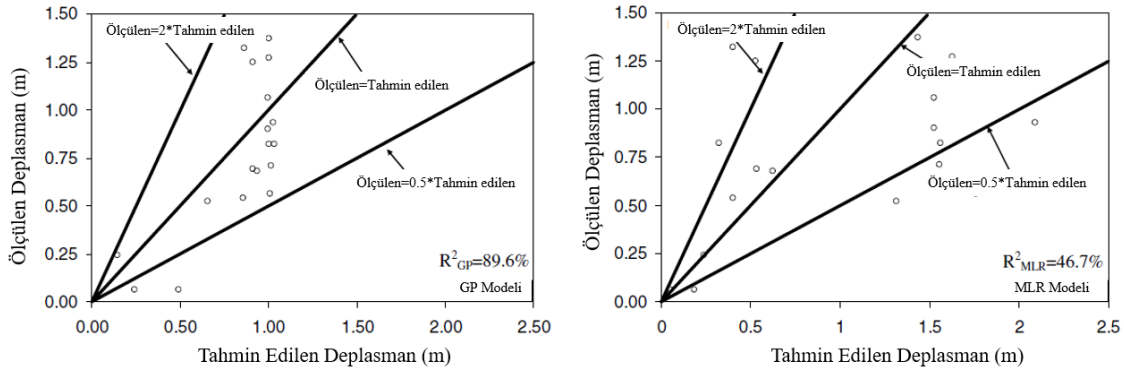
Serbest yüzey durumu için:

$$D_H = -234.4\frac{1}{M^2 * R * W} - 156\frac{1}{M^2} - 0.008\frac{F_{15}}{R^2 * T_{15}} + 0.01\frac{W * T_{15}}{R} - 2.9\frac{1}{F_{15}} - 0.036\frac{M * {T^2}_{15} * {D50^2}_{15}}{R^2 * W} + 9.4\frac{M}{R * F_{15}} - 4 * 10^{-6}\frac{M * R^2}{D50_{15}} + 3.84 \quad (2.10)$$

Hafif topoğrafik eğim durumu için:

$$D_H = -0.027\frac{{T^2}_{15} * F_{15}}{M^2} + 0.05\frac{R * T_{15}}{M^2 * D50_{15}} + 0.44\frac{1}{M * R^2 S * T_{15}} - 0.03R - 0.02\frac{M}{S * T_{15}} - 5 * 10^{-5}\frac{M * R}{{D50^2}_{15}} + 0.075M^2 - 2.4 \quad (2.11)$$

Elde edilen sonuçlar grafikler yardımı ile Şekil 2.7'deki gibidir [58]. Grafikten de anlaşılabileceği üzere genetik programlama yardımı ile elde edilen sonuçlar, çoklu doğrusal regresyon analizleri ile elde edilen sonuçlara oranla daha yüksek doğruluk oranı vermektedir (Javadi vd., 2006). Topoğrafik eğim durumu için eğitim aşamasında 90.8 ve test aşamasında 91.8, serbest yüzey durumu için eğitim aşamasında 92.1 ve test aşamasında 85.3 R^2 değerleri elde edilmiştir.



Şekil 2.7 Genetik programlama ve çoklu doğrusal regresyon ile elde edilen sonuçların karşılaştırılması

2.3.2.4 Garcia vd. (2010) Yöntemi

Youd vd. (2002) veri setini kullanan araştırmacılar literatürde yer alan en yüksek R^2 değerlerinin elde edildiği çalışmalardan birini gerçekleştirmiştir. Sıvılaşma nedeniyle oluşacak yanal yayılma miktarının tahmini için depremin moment büyüklüğü (M_w), Youd vd. (2002) tarafından önerilen modifiye uzaklık (R^*), maksimum yer ivmesi (A), topoğrafik eğim (S), serbest yüzey oranı (W), deplasman noktasının serbest yüzeye uzaklığı (L), düzeltilmiş SPT-N vuruş sayısı 15'ten küçük sıvılaşan tabakaların kümülatif kalınlığı (T_{15}), bu katmanların ince dane içeriği (F_{15}), bu katmanların ortalama dane çapı ($D50_{15}$) bağımsız değişkenleri seçilmiştir.

Araştırmacılar, parametreleri optimize ederek bilgiyi yorumlanabilir bir şekilde temsil etmede çok iyi olan bulanık sistemleri ve gelişmiş öğrenme yeteneğine sahip sinir ağlarını birleştirerek NEFLAS (Sıvılaşma kaynaklı LAteral Yayılımın NEuroFuzzy tahmini) adlı bir modeli kullanmıştır. Bu hesaplama aracı, nitel analizleri modellemek için bulanık EĞER-ÖYLEYSE kurallarını kullanan bir bulanık çıkarım sistemi olan Takagi ve Sugeno (1985) model yapısına dayanmaktadır. Youd vd. (2002), modelin eğitim aşamasında NEFLAS kullanılmadan önce, gereksiz ve çelişkili bilgiler içerdiğinden bulanık kümeleme tekniği kullanılarak ön işleme tabi tutulmuştur. Sıvılaşma nedeniyle oluşacak yanal yayılmayı etkileyen faktörler göz önünde bulundurularak NEFLAS sistemi Reg-NEFLAS, Site-NEFLAS ve Geotech-NEFLAS olmak üzere üç modül kullanılarak oluşturulmuştur. Reg-NEFLAS, sismik tehlike araştırmalarının tanımlandığı coğrafi bölgelerdeki yatay yer değiştirmelerin tahmin edilmesi için uygun olduğu belirtilmiştir. Site-NEFLAS, geoteknik koşullar hakkında minimum veri ile sahaya özel çalışmalar için yatay yer değiştirme tahminleri için uygun olduğunu ve Geotech-NEFLAS, geoteknik zemin sondajlarından ek veriler mevcut olduğunda yatay yer değiştirmelerin daha rafine tahminlerinin olduğunu gösterir [66].

Analiz sonuçlarında elde edilen R^2 değerlerinin diğer yöntemlere göre çok iyi sonuçlar vermesi, eğitim ve test aşamalarında elde edilen R^2 değerlerinin birbirine çok yakın olması NEFLAS'ın çoklu doğrusal regresyon ve sinir ağlarından daha iyi sonuçlar verdiğini göstermektedir. Yöntem sonucunda 3 metreden daha az yer değiştirmeler için yapılan tahminlerin gerçek değerlere çok yakın olması modellerin etkili bir şekilde çalıştığını göstermektedir.

2.3.2.5 Siyahi vd. (2008) Yöntemi

Literatürdeki diğer birçok çalışmanın aksine Youd vd. (2002) yerine Tokimatsu ve Yoshimi (1983) veri seti kullanılmıştır. Yanal yer değiştirme tahminleri için bağımsız değişkenler, depremin lokal büyüklüğü (M_L), düşey toplam gerilimi (σ_0), düşey efektif gerilimi (σ'_0), düzeltilmemiş Standart Penetrasyon Testi darbe sayısı (N), yer ivmesinin yerçekimi ivmesine oranı (a/g), ortalama kesme geriliminin toplam dikey gerilime oranı (τ/σ_0), sıvılaşan tabakaların ince dane içeriği (F), sıvılaşan tabakaların ortalama tane çapı (D_{50}) seçilmiştir. Eğitim ve test setleri dışında analizler için herhangi bir doğrulama veri seti oluşturulmamıştır. Makalede bahsedilen doğrulama, test aşaması olarak kabul edilebilir. Çalışmanın sonucunda diğer çalışmalardan farklı olarak değerlendirme metriği olarak R^2 değil yüzde hatası kullanılmış ve akışı bozmamak için özetleyici tabloda (Tablo tab:5-8) R^2 değerleri için yüzde hatası yazılmıştır [67].

2.3.2.6 Önder (2010) Yöntemi

Deprem sırasında sıvılaşma nedeniyle oluşacak yanal yayılmaların hesabında bir yapay sinir ağı modelleyen araştırmacı veri seti olarak Hasançebi (2011)'i, analiz içinse NeuroSolutions isimli yazılımı kullanmıştır. Siyahi vd. (2008) yönteminde kullanılan parametrelere ek olarak sismik kaynağa olan uzaklık (R) da bağımsız değişken olarak kullanılmıştır.

Verilerin %80'i model eğitimi ve %20'si test için ayrılmıştır. Tek katmanlı 5000 nöron ile çok derin bir ağ kullanılan çalışmanın sonunda sadece eğitim aşamasının sonuçları paylaşılmış olup, test sonuçları hakkında hiçbir bilgi paylaşılmamıştır. Sonuçlar Youd ve Perkins'in (1987) LSI hesaplama yöntemi ile karşılaştırılmış ve ortalama %1,52 hata elde edilmiştir. Hangi depremden hangi verilerin elde edildiği net olarak belirtilmeyen veri seti ile paylaşılmıştır. Bu nedenle özet tabloda (Tablo tab:5-8) bu yöntem için herhangi bir deprem bilgisi işaretlenmemiştir. Sonuç karşılaştırmaları herhangi bir grafik veya görsel ile ifade edilmemiştir [59].

2.3.2.7 Baziar ve Azizkandi (2013) Yöntemi

Depremin büyüklüğü (M), sismik kaynağa olan mesafe (R), serbest yüzey oranı (W), yüzey eğimi (S), düzeltilmiş Standart Penetrasyon Testi (SPT) darbe sayıları 15'ten az sıvılaşan tabakaların kümülatif kalınlığı (T_{15}), bu katmanların ince içeriği (F_{15}) ve bu katmanların ortalama dane çapı ($D50_{15}$) araştırmacılar tarafından bağımsız değişkenler olarak seçilmiştir. Youd vd. (2002) veri setine 1999 Kocaeli ve 1999 Chi-Chi depremlerine ait 41 adet yeni veri daha ekleyen araştırmacılar SPT ile oluşturulan veri setlerinde en yüksek veri sayısına (525) sahip çalışmalardan birini gerçekleştirmiştir. Veri setinde kullanılan en güncel deprem 1999 Chi-Chi depremidir. Yanal yayılma miktarını hesaplamak için yapay sinir ağları ve genetik programlama kullanılmıştır [60].

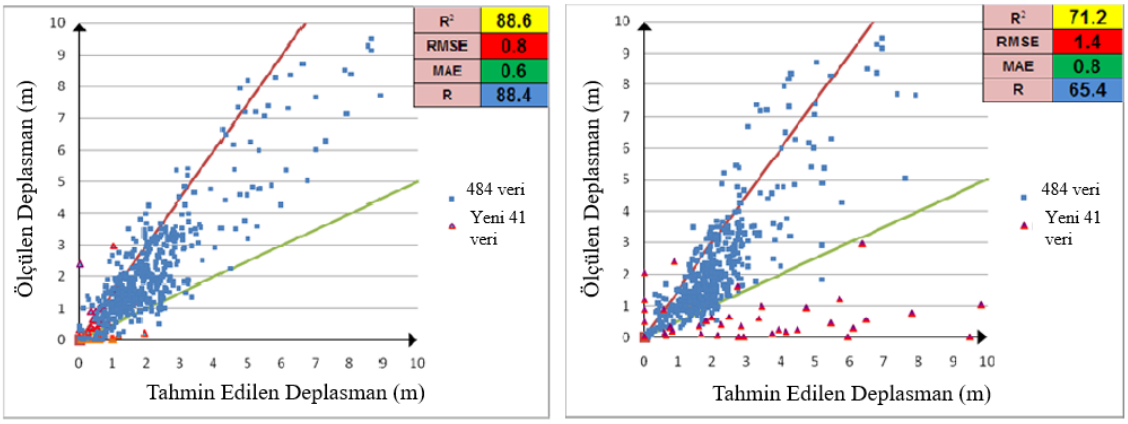
Elde edilen eşitlikler, Youd vd. (2002) vb. analiz yöntemlerinin aksine serbest yüzey ve hafif topoğrafik eğim olarak ayrılmamış, her iki durum için de tek bir eşitlik geliştirilmiştir:

$$\begin{aligned} D_H = {} & \frac{54.36T_{15}}{D_{50}+0.6532} - \frac{55.34T_{15}}{D_{50}+0.6689} + \frac{196.9T_{15}}{W+0.9212} - \frac{199.8T_{15}}{W+0.9434} \\ & + \frac{0.0446(W-S)}{R} - \frac{1.718}{S+0.8956} - 0.02452T_{15}F_{15} - 0.00625F_{15}S \\ & + 0.001474R(W-T_{15}) - 0.06875T_{15}(W-S) + M(0.1058T_{15} \\ & + 0.009652T_{15}W - 0.1225 + 0.00024T_{15}F_{15}^2 - 0.00255RWS + 2.6 \end{aligned} \quad (2.12)$$

Genetik programlama ile edilen sonuçlar Youd vd. (2002) ile kıyaslanmış ve yanal yayılma deplasmanlarının daha yüksek doğruluk oranı ile hesaplandığı gösterilmiştir (Şekil 2.8) [60].

Yanal yayılmaya en çok etki eden parametrelerin tespiti için hassaslık analizleri de gerçekleştirilmiş, çıkan sonuçlara göre deprem parametrelerinin topoğrafik parametrelere oranla yanal yayılma üzerinde daha fazla etkiye sahip olduğu tespit edilmiştir [60].

Yanal yayılmaya en çok etki eden parametrelerin tespiti için hassaslık analizleri de gerçekleştirilmiş, çıkan sonuçlara göre deprem parametrelerinin topoğrafik parametrelere oranla yanal yayılma üzerinde daha fazla etkiye sahip olduğu tespit edilmiştir. Veri sayısındaki bu önemli artışa rağmen, geçmişteki diğer çalışmalara kıyasla sonuçlarda önemli bir gelişme görülmemiştir (eğitim için R^2 91.02 ve test için 84.3'tür).



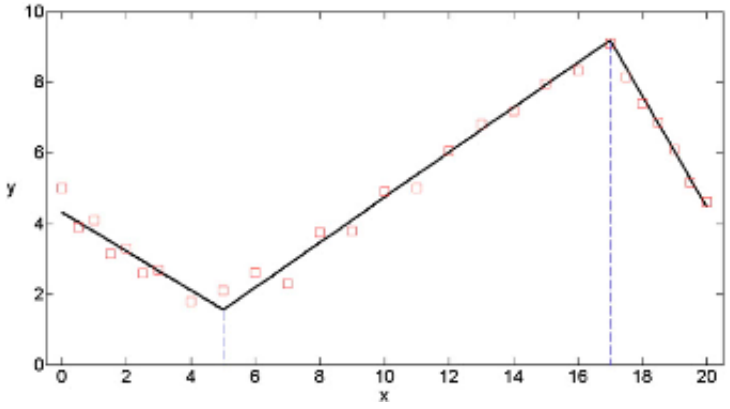
a) Baziar ve Azizkandi (2013) genetik programlamadan elde edilen sonuçlar

b) Youd vd. (2002) eşitliğinden elde edilen sonuçlar

Şekil 2.8 Baziar ve Azizkandi (2013)'ın genetik programlama analizleri ile Youd vd. (2002) çoklu doğrusal regresyon analizlerinin karşılaştırılması

2.3.2.8 Goh ve Zhang (2014) Yöntemi

MARS (Multivariate Adaptive Regression Splines, Çok Değişkenli Uyarlanabilir Regresyon Eğrileri) bir dizi girdi değişkeni ile bağımlı değişkenler arasındaki ilişkiyi uydurmak için istatistiksel bir yöntemdir. MARS, eğitim veri setlerinin farklı eğimlere sahip ayrı parçalı doğrusal segmentlere (spline'lara) bölündüğü bir böl ve yönet stratejisine dayanan doğrusal olmayan, parametrik olmayan bir yöntemdir (Şekil 2.9) [57]. Girdi değişkenleri ile çıktı arasındaki temel işlevsel ilişki hakkında belirli bir varsayıma gerek yoktur. Segmentlerin uç noktaları düğüm olarak adlandırılır. Bir düğüm, bir veri bölgesinin sonunu ve diğerinin başlangıcını işaretler. Ortaya çıkan parçalı eğriler (temel fonksiyonlar olarak bilinir), modele daha fazla esneklik sağlar ve doğrusal fonksiyonlardan eğilmelere, eşiklere ve diğer sapmalara izin verir [57].



Şekil 2.9 Basit bir MARS örneğinde düğüm ve doğrusal segmentler

Yapılan MARS analizleri sonucunda araştırmacılar hafif eğim ve serbest yüzey durumlarında yanal deplasmanların hesabı için aşağıdaki eşitlikleri önermişlerdir:

Serbest yüzey durumu için:

$$D_H = 0.464 - 2.022 * BF1 + 3.456 * BF2 + 0.919 * BF3 - 0.027 * BF4 + 0.270 * BF5 - 6.056 * BF6 - 1.477 * BF7 + 1.555 * BF8 + 0.867 * BF9 - 2.300 * BF10 + 8.488 * BF11 + 0.597 * BF12 + 6.796 * BF13 - 3.508 * BF14 + 0.071 * BF15 - 0.116 * BF16 + 16.577 * BF17 \quad (2.13)$$

Hafif eğimli durum için:

$$D_H = -1.766 - 1.647 * BF1 + 3.102 * BF2 + 1.78 * BF3 - 0.035 * BF4 + 0.08 * BF5 + 0.798 * BF6 - 0.036 * BF7 - 13.161 * BF8 + 0.52 * BF9 - 0.658 * BF10 - 3.312 * BF11 - 0.976 * BF12 - 0.662 * BF13 + 35.986 * BF14 - 3.357 * BF15 + 18.876 * BF16 - 17.095 * BF17 + 1.864 * BF18 \quad (2.14)$$

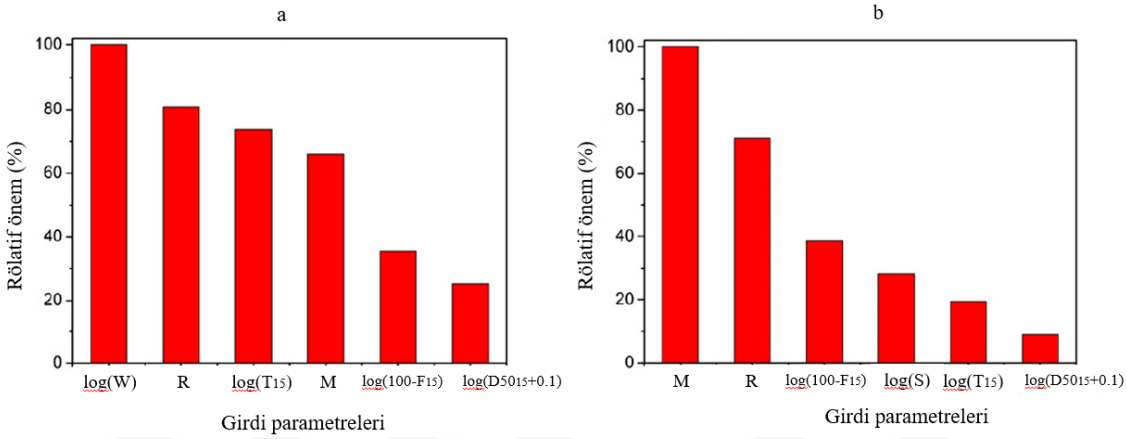
Burada BF (basis function, temel fonksiyon) olmak üzere temsil ettikleri parametreler Tablo 2.1'deki gibidir [57]. $D50_{15}$, F_{15}, R^* gibi parametreler Youd vd. (2002) çalışması ile aynıdır.

Tablo 2.1 MARS modelindeki BF değerleri

Serbest Yüzey Durumu		**Hafif Eğim Durumu**	
BF1	max(0, log($T_1$5) 0.699)	BF1	max(0, 7.5 M)
BF2	max(0, 0.699 log(T15))	BF2	BF1 × max(0, log(R^*) 0.8873)
BF3	max(0, M 6.6)	BF3	BF1 × max(0, 0.8873 log(R^*))
BF4	max(0, R 6)	BF4	max(0, R 27)
BF5	max(0, 6 R)	BF5	max(0, 27 R)
BF6	max(0, 1.9315 log(100 F_{15}))	BF6	BF5 × max(0, log(T_{15}) 0.9445)
BF7	max(0, 1.2495 log(W))	BF7	BF5 × max(0, 0.9445 log(T_{15}))
BF8	max(0, 0.2441 log($D50_{15}$ + 0.1))	BF8	max(0, log(S) + 0.6198) × max(0, log(T_{15}) 1.0294)
BF9	BF7 × max(0, M 6.8)	BF9	max(0, log(S) + 0.6198) × max(0, 1.0294 log(T_{15}))
BF10	BF7 × max(0, 6.8 M)	BF10	max(0, log($D50_{15}$ + 0.1) + 0.4763)
BF11	BF7 × max(0, log(T_{15}) 1.1038)	BF11	max(0, 0.4763 log($D50_{15}$ + 0.1))
BF12	BF7 × max(0, 1.1038 log(T_{15}))	BF12	max(0, log(T_{15}) 0.7404)
BF13	BF6 × max(0, 0.906 log(W))	BF13	max(0, 0.7404 log(T_{15}))
BF14	max(0, 0.9823 log(T_{15}))	BF14	BF1 × max(0, log(100 F15) 1.8808)
BF15	BF8 × max(0, R 21)	BF15	max(0, 1.9912 log(100 F_{15}))
BF16	BF5 × max(0, 0.5682 log(T_{15}))	BF16	max(0, log(S) + 0.6198) × max(0, 1.9868 x6)
BF17	BF1 × max(0, log(100 F_{15}) 1.8808)	BF17	BF15 × max(0, log(S) + 0.2518)
		BF18	max(0, M 6.6)

Araştırmacılar aynı zamanda Niigata vakaları üzerinde MARS modelini kullanarak sıvılaşma kaynaklı yanal yayılmalar üzerinde F_{15} ve $D50_{15}$'in etkilerini incelemiştir. Elde edilen sonuçlar mantıklı olup, F_{15} ve $D50_{15}$ değerlerinin artışının yanal

deplasman değerinde azalmaya neden olduğu görülmüştür. Aynı zamanda diğer parametrelerin (W, R, T15, M, $100 - F_{15}$, $D50_{15} + 0.1$) yanal yayılma üzerindeki etkileri ANOVA (analysis of variance, varyans analizi) yöntemi ile irdelenmiştir. Serbest yüzey ve hafif eğim durumları için yapılan analizler sonucunda Şekil 2.10'daki histogramlardan da görülebileceği gibi serbest yüzey durumunda yanal yayılma üzerinde en çok etkili olan parametre serbest yüzey oranı, W iken en az etkiye sahip parametre zeminin ortalama dane içeriği olan $D_{50} + 0.1$ parametresidir. Hafif eğimli durumda ise yanal deplasman üzerinde en çok etkiye sahip değer depremin büyüklüğü, M iken en az etkili olan parametre serbest yüzey durumundaki gibi $D50_{15}$ parametresidir [57].



Şekil 2.10 MARS modelinde a) serbest yüzey b) hafif eğim durumunda girdi parametrelerinin rölatif önemleri

2.3.2.9 Jirdehi vd. (2014) Yöntemi

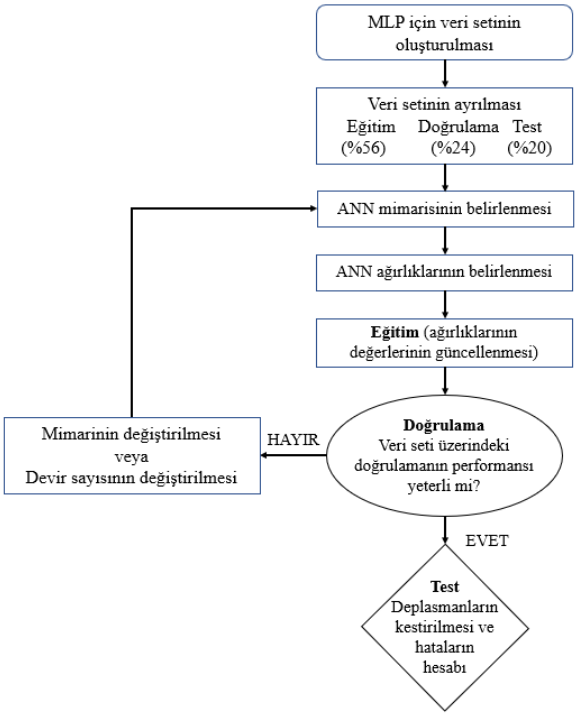
Ivakhnenko (1971) tarafından geliştirilen grup veri işleme yöntemi (Group Data Handling Method, GMDH) ile sinir ağlarının kullanıldığı çalışma, literatürde en yüksek R^2 değerlerinin elde edildiği çalışmalardan biridir. Diğer çalışmalara göre daha az veri (250 veri) ile gerçekleştirilen çalışma deprem momenti büyüklüğü (M_w), maksimum yer ivmesinin yerçekimi ivmesine oranı (a_{max}/g), topografik eğim (S), serbest yüzey oranı (W), sıvılaşma şiddet indeksi (LSI), en kritik sıvılaşabilir zemin tabakasının derinliği (z_{cr}), en kritik alt tabakanın kaymaya karşı güvenlik faktörü (a_y/a_{max}) ve yerçekimi kuvvetlerine karşı en kritik alt katmanın güvenlik faktörü $tan\phi'/tan\beta'$ bağımsız değişken olarak kullanılmıştır. GMDH yönteminin tahmin modellerinin geliştirilmesindeki başarısı (serbest yüzey durumunda eğitim için 99 ve serbest yüzey durumu için 98 R^2 puanı, hafif eğim durumunda eğitim için 98 ve test için 99 R^2 puanı) yapılan çalışmada görülmektedir. Eğitim ve test dışında bir doğrulama seti oluşturulmamıştır [68].

2.3.2.10 Kaya (2016) Yöntemi

Araştırmacı çoklu doğrusal regresyon (MLR), çok katmanlı algılayıcılar (MLP) ve uyarlanabilir bulanık mantık arayüz sistemleri (ANFIS) gibi analiz yöntemleri ile 12 depreme ait 488 adet veri kullanmıştır.

Daha önce de bahsedildiği gibi MLR, tek bir sürekli bağımlı değişken ile iki veya daha fazla bağımsız değişken arasındaki doğrusal ilişkiyi modellemek için kullanılan basit doğrusal regresyon analizinin bir uzantısıdır.

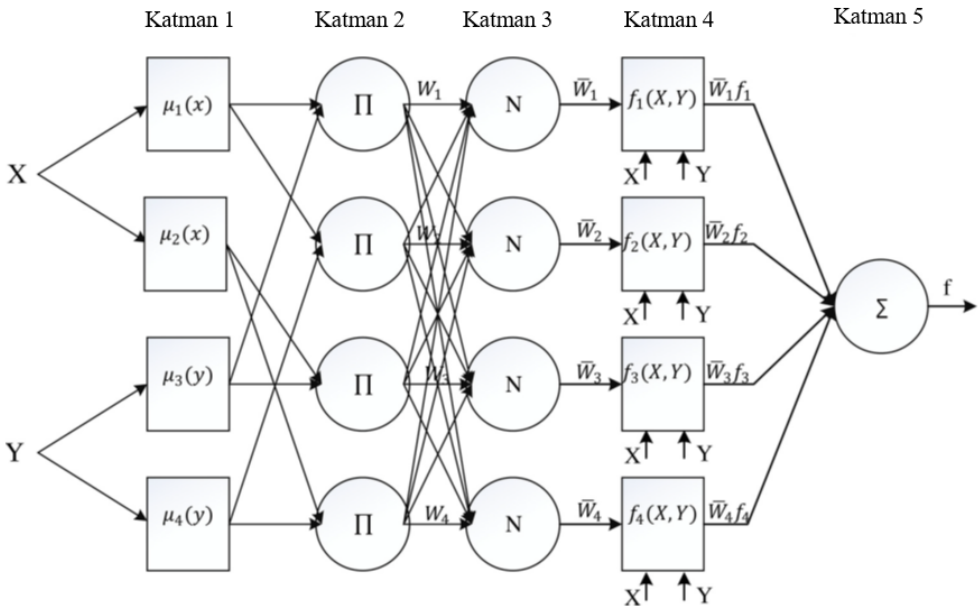
Yapay sinir ağlarına dayanan MLP'de ise bir veya daha fazla gizli katmanlar ve nöral hücreler kullanılarak sonuca ulaşmaya çalışılmaktadır. Araştırmacı MLP'yi eğitmek için geleneksel gradyan-iniş tekniğinden daha güçlü ve hızlı olduğu bilinen Levenberg-Marquardt tekniğini kullanmıştır. MLP'ler, ölçülen çıktılar ile MLP modeli tarafından tahmin edilen çıktılar arasındaki hata fonksiyonunu en aza indirmek için model girdilerinin ve çıktılarının örneklerini tekrar tekrar sunarak ağırlıklarını ayarlarlar [61]. MLP'nin akış şeması Şekil 2.11'deki gibidir [61].



Şekil 2.11 ANN-MLP'nin akış şeması

Karma bir öğrenme prosedürü kullanarak ANFIS, kesin nicel analizler kullanmadan insan bilgisinin niteliksel yönlerini (bulanık eğer-öyleyse kuralları şeklinde) ve muhakeme süreçlerini modelleyebilir. Şekil 2.12'te görülebilen ANFIS yapısında, her düğüm noktası sabit veya değiştirilebilir birer düğüm fonksiyonu ile tanımlanır [61].

Yapılan analizler sonucunda 3 metreden büyük yanal deplasmanlarda ANFIS ve



Şekil 2.12 Basit bir ANFIS yapısı

MLP'nin Youd vd. (2002)'ye oranla gerçeğe daha yakın tahminler yapabildiği görülmüştür. MLP ve ANFIS modelleri MLR ve Youd vd. (2002) eşitliğine oranla daha düşük hata oranlarına sahiptir. Test aşamasında serbest yüzey koşullarında MLP ANFIS'e oranla daha iyi bir performans gösterirken, hafif eğimli durum için ANFIS MLP'ye oranla daha iyi performans sergilemiştir. Aynı zamanda MLP'nin daha iyi bir performans sergilediği ve bu nedenle Adapazarı için kullanılabileceği belirtilmiştir [61].

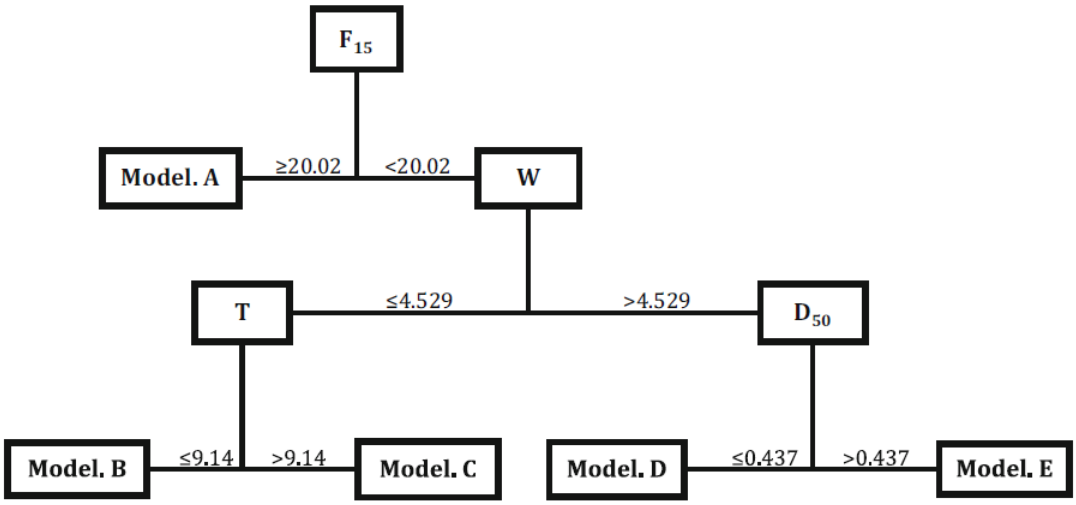
2.3.2.11 Avval ve Derakhshani (2018) Yöntemi

Karar ağaçları (DT'ler), tahmin için ve verileri kategorilere ayırmak için uygun şekilde uygulanabilen çok değişkenli analizin basit ama güçlü bir şeklidir. Model ağacı (MT), regresyon ağaçlarından daha kesin ve YSA'lardan daha kolay ve anlaşılır olan sağlam bir yöntemdir.

Önceki birçok çalışmadan farklı olarak yanal deplasmanların tahmininde kullanılmak üzere hem hafif eğim durumu için hem de serbest yüzey durumu için, M5' model ağaç algoritması ile geliştirilen tek bir eşitlik önerilmiştir. Aynı zamanda girdi parametrelerinin, çıktı üzerindeki etkilerinin anlaşılabilmesi için hassaslık analizi gerçekleştirilmiştir.

Quinlan (1992) tarafından geliştirilen M5 model ağaç algoritması, çok değişkenli doğrusal modellerle bir ağaç oluşturan ve olağandışı hesaplamalı büyümeye yol açmayan modelleri öğrenmek için kullanılan bir algoritmadır. Diğer karar ağacı

tabanlı algoritmalara oranla daha basit ve görece daha yüksek doğruluğa sahip algoritma, Wang ve Witten (1997) tarafından geliştirilerek M5' adını almıştır. Bu geliştirilmiş algoritma, bir regresyon ağacı oluşturmak için girdi (örnek) alanını tekrarlayan bir şekilde bölmeye dayanmaktadır. Şekil 2.14'te akış şeması görülebilen karar ağacında bölme işlemi, dallar aracılığıyla kökten düğüme alt küme içi varyasyonları azaltmak için yapılır [69].



Şekil 2.13 Yanal yayılmaların kestirimi için formül seçimi akış şeması

Yapılan hassaslık analizleri sonucunda diğer birçok araştırmacının kullandığı topoğrafya özelliklerini yansıtan W (%) ve S (%) parametrelerinin öneminin diğer parametrelere (deprem ve zemin özellikleri) oranla daha düşük etkiye sahip olduğunu belirtmişlerdir (Tablo 2.2). Aynı zamanda Baziar ve Azizkandi (2013)'nin benzer sonuçlar elde etmelerinden ötürü, araştırmacılar yanal yayılma kaynaklı deplasmanların hesabı için aşağıdaki eşitliği önermişlerdir:

$$D_H = \frac{{M_w}^{18.21} {T_{15}}^{0.554} (100 - F_{15})^{4.524}}{10^{23.53} D50^{0.543} R^{1.305}} \tag{2.15}$$

Eşitlikteki girdi parametreleri Youd vd. (2002)'deki ile aynı anlamları ifade etmektedir ancak parametreler boyutsuzdur.

Analizlerde kullanılan girdi parametrelerinin boyutsuz seçilmesi durumunda genelleştirilmesinin kolaylaşacağını bildiren araştırmacılar, analizlerinde kullandıkları M_w, S, W ve F_{15} dahil girdilerin tümünü boyutsuz olarak işleme tabi tutmuşlardır.

Aynı zamanda T/D_{50} ve R_0/R boyutsuz parametrelerini tanıtan araştırmacılar, veri seti üzerinde yaptıkları analizler neticesinde aşağıdaki boyutsuz eşitliği önermişleridir. Önerilen eşitliğin "boyutsuz beş parametreli" model ile uyumlu

Tablo 2.2 Parametrelerin yanal yayılma üzerindeki önemi

Model	**CC**	**MAE**	**RMSE**
M_w olmadan kurulan model	0.797	0.997	1.456
F_{15} olmadan kurulan model	0.828	1.640	2.140
R olmadan kurulan model	0.839	0.866	1.300
T olmadan kurulan model	0.850	0.874	1.294
D_{50} olmadan kurulan model	0.867	0.773	1.880
W olmadan kurulan model	0.880	0.763	1.248
S olmadan kurulan model	0.904	0.708	1.130
Model	0.95	0.510	0.790

olduğunu belirtmişlerdir.

$$D_H = 10^{-9.557}\left(\frac{R_0}{R}\right)^{1.229}\left(\frac{T}{D50}\right)^{0.574} W^{0.136} S^{0.206} (100 - F_{15})^{4.794} \tag{2.16}$$

Burada R_0, Youd vd. (2002)'nin tanıttığı mesafe faktörüdür:

$$R_0 = 10^{(0.89M_w - 5.64)} \tag{2.17}$$

2.3.2.12 Karalı (2019) Yöntemi

Hasançebi (2011) veri seti üzerinde, yapay sinir ağları kullanılarak sıvılaşma kaynaklı yanal yayılmalar tahmin edilmeye çalışılmıştır. Hasançebi (2011) veri setinin kullanımında herhangi bir değişiklik yapılmamış yani girdi parametreleri olarak aynı kriterler seçilmiştir. Tek katmanlı, 70 adet nöron içeren ileri beslemeli geri yayılımlı, Levenberg-Marquardt öğrenme fonksiyonlu bir yapay sinir ağı modeli kurulmuştur. Belirtilen modelin kullanımı ile %83 R^2 değeri elde edilmiştir [70].

Kurulan yapay sinir ağı modeli kullanılarak, İzmir şehrinde 6.5 büyüklüğünde bir depremde meydana gelebilecek yanal yayılmaların kestirimi için 50 adet sondaj verisi kullanılmıştır.

Çalışmada herhangi bir hassaslık analizi yapılmamış, sıvılaşma kaynaklı yanal yayılma deplasmanlarının hesabı için kullanılabilecek bir eşitlik önerisinde bulunulmamıştır.

2.3.2.13 Pirhadi vd. (2019) Yöntemi

Kramer ve Mitchell (2006), 5 cm/sn^2'den küçük amplitüdlerin elimine edilmesiyle elde edilen kümülatif mutlak hız (CAV_5) değerinin maksimum yer ivmesi (a) yerine sıvılaşma hasarını tahmin etmede oldukça etkili bir parametre olduğunu göstermişlerdir. Bu bilgilere dayanarak, araştırmacılar CAV_5 parametresini Youd

vd. (2002) veri setine ekleyerek hız değişkeninin eklendiği güncel bir veri seti oluşturulmuştur. Aynı zamanda ince tane içeriği 28'den az olan veriler seçilerek ayrı bir veri seti oluşturulmuştur ki bu da sıvılaşma riskinde ve zararında çok önemli rol oynamaktadır. Youd vd. (2002) verileri ve FC_{15} değerinin 28'den küçük veya eşit olduğu verilerde yapay sinir ağı (YSA) modeli kullanılarak ayrı analizler yapılmıştır. İkinci dereceden bir polinomun elde edilebildiği Tepki Yüzey Yöntemi (RSM) YSA ile birleştirilerek her iki veri seti için sıvılaşma kaynaklı yanal yayılmanın hesaplanmasında kullanılmak üzere bir denklem önerilmiştir. Analiz sonuçlarında eğitim için 92 test içinse 95 R^2 skoru elde edilmiştir [71].

2.3.2.14 Farrokhi vd. (2019) Yöntemi

Karmaşık sistemlerin modellenmesinde kullanılan GMDH (Group Method of Data Handling, Taşıma Verilerin Grup Yöntemi) veri madenciliği ve veri bulma, optimizasyon ve görüntü tanıma, tahmin ve sistem modelleme gibi birçok çeşitli problemin çözümünde kullanılmaktadır. Algoritma sayesinde eldeki verilerdeki karşılıklı ilişkilerin bulunması, bir ağın veya modelin en uygun yapısının seçimi ve mevcut algoritmalardaki doğruluğu artırma olanağı sunmaktadır. Genel olarak GMDH modeli sinir ağı, bir dizi değişkenden en uygun değişkeni bulma ve seçme, farklı çözümleri sıralayarak kullanıcının modellemenin yapısı ve sonuçları üzerindeki etkisini azaltma ve modelin optimal yapısının bilgisayar tarafından seçilmesi gibi avantajlara sahiptir [63].

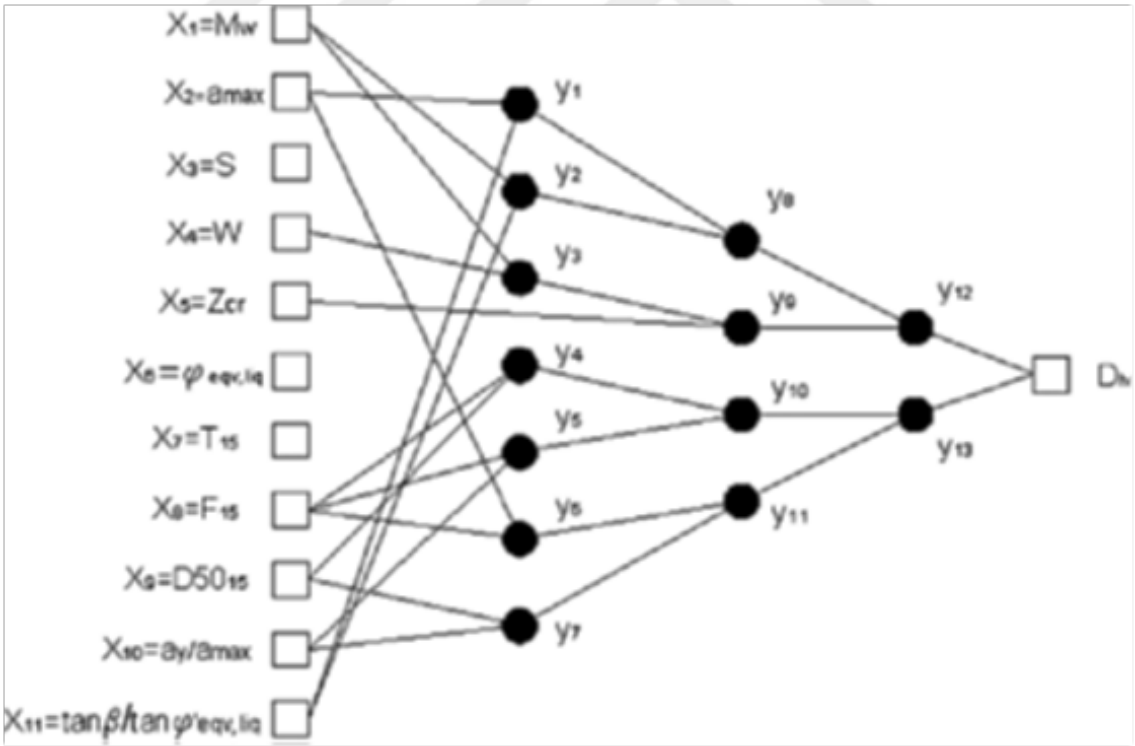
Araştırmacılar Youd vd. (2002) veri tabanına çeşitli eklemeler ve düzeltmeler yapmıştır:

- Sekiz büyük depreme (1976 Guatemala, 1977 Arjantin, 1990 Luzon, 1994 Northridge, 1999 Kocaeli, 1999 Chi-Chi, 2003 San Simeon, 2003 Tokachi-Oki) ait 62 yeni vaka veri tabanına eklenmiştir.
- Bazı parametrelerin çıkartılıp, yeni parametreler eklenmiştir. Girdi parametreleri olarak M_w, a_{max}, S, W, T15, $D50_{15}$, $\varphi\prime_{eqv,liq}$, zcr (m), ∂_y/a_{max}, $tan\beta/tan\varphi\prime_{eqyv,liq}$.

Sismik enerji kaynağına olan mesafeyi temsil eden R bu çalışmada kullanılmamış olup, yerine yine R ile azalım ilişkisi kurulabilen maksimum ivme olan a_{max} kullanılmıştır. Aynı zamanda bu yeni modelde sıvılaşan ya da potansiyel olarak sıvılaşabilen zemin tabakalarındaki eşdeğer mobilize içsel sürtünme açısı ($\varphi\prime$) topoğrafik eğim olan β'ya bağlı $tan\beta/tan\varphi\prime_{eqyv,liq}$ parametresi kullanılmıştır.

Bu normalleştirilmiş değişken, en kritik alt katman için yerçekimi kuvvetlerine karşı güvenlik önlemini temsil eder. ay/amax'ın normalleştirilmiş değişkeni, ay'nin sonlu eğim varsayımıyla $tan\beta/tan\varphi\prime_{eqyv,liq}$ g'ye eşit akma ivmesi olduğu en kritik alt katman için kaymaya karşı güvenliği temsil eder. Bir diğer yeni parametre, zemin yüzeyinden potansiyel olarak sıvılaşan en kritik alt katmana kadar olan derinlik olan zcr'dir. Önerilen parametreler deprem özellikleri (M, a_{max}), geoteknik ve zemin koşulları (T_{15}, F_{15}, $D50_{15}$, $\varphi\prime_{eqv,liq}$, z_{cr}, a_y,) ve topografik koşullara (S, W) göre sınıflandırılabilir [63].

Genetik algoritma tabanlı GMDH'ın kullanıldığı bu çalışmada efektif girdi parametreleri ve optimum gizli katman ve düğümler, algoritmanın kendisi tarafından optimize edilmiştir. Şekil 2.14'te eğitilmiş modelin optimize edilmiş mimarisi gösterilmektedir. Görüldüğü gibi, optimal model sekiz değişkenli bir giriş katmanına sahiptir, ilk olarak yedi düğümlü gizli bir katman, ikincisi dört düğümü olan gizli bir katman, üçüncüsü iki düğümü olan bir gizli katman ve bir değişkenli bir çıktı katmanı bulunmaktadır. Beklendiği gibi, GMDH'nin kendi kendine organize edilmiş yöntemi etkili parametreleri tanımış ve bu nedenle, optimum eğitimli modelde üç parametre, S, T_{15} ve $\varphi\prime_{eqv,liq}$ silinmiştir. Bu nedenle, yanal yayılmayı tahmin etmek için en iyi eşitlik aşağıdaki şekilde temsil edilebilmiştir [63].



Şekil 2.14 Genetik algoritmalı GMDH için belirlenen optimal yapı

$$D = f(M_w,\ a_{max},\ W,\ F_{15},\ D50_{15},\ z_{cr},\ \partial_y/a_{max},\ tan\beta/tan\varphi\prime_{eqv,liq}) \tag{2.18}$$

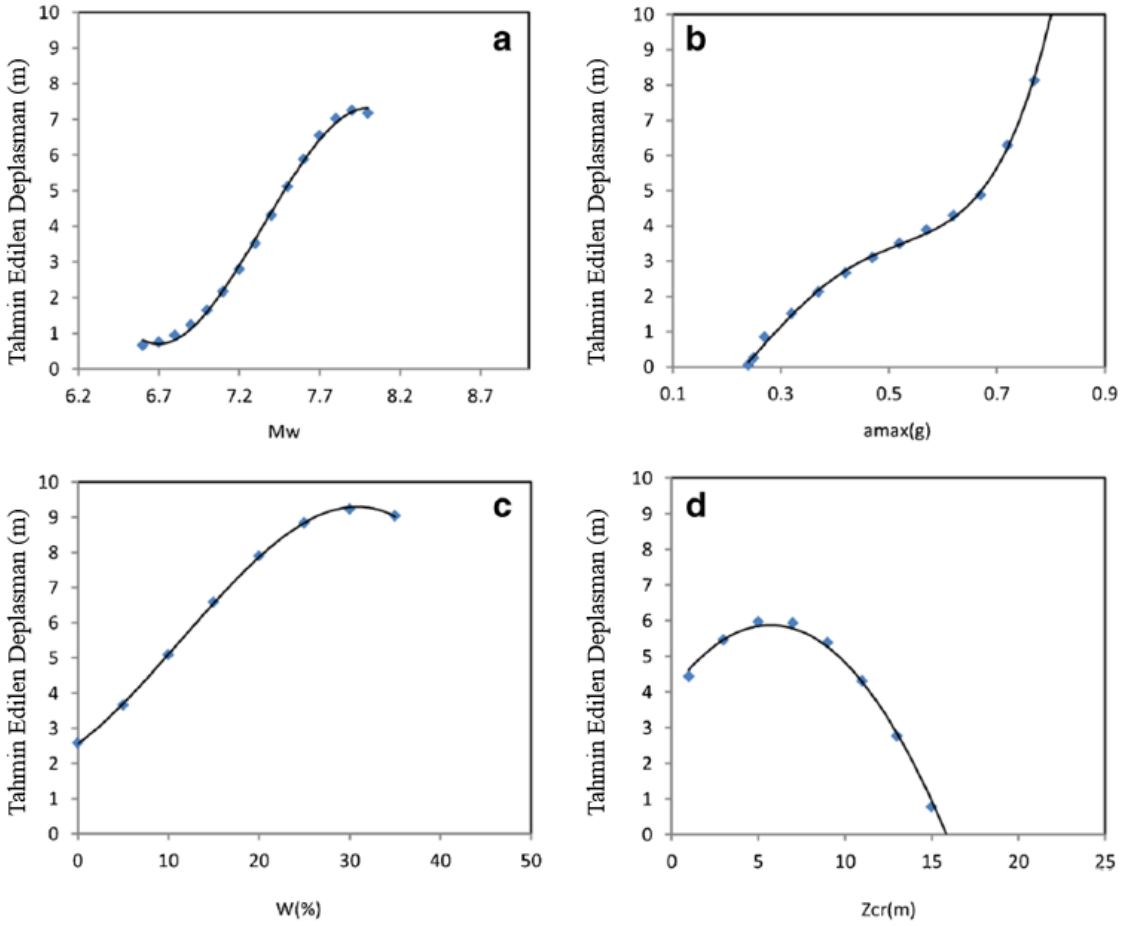
Eğitilmiş modelin bağlantıları için elde edilen optimal polinom ağırlıkları ile, sıvılaşma

kaynaklı yanal yayılmayı tahmin etmek için aşağıdaki ifade önerilmiştir:

$$D_h = 0.0493 + 0.1388Y_{12} + 0.4341Y_{13} + 0.011\,(Y_{12})^2 - 0.099\,(Y_{13})^2 + 0.2728Y_{12}Y_{13} \tag{2.19}$$

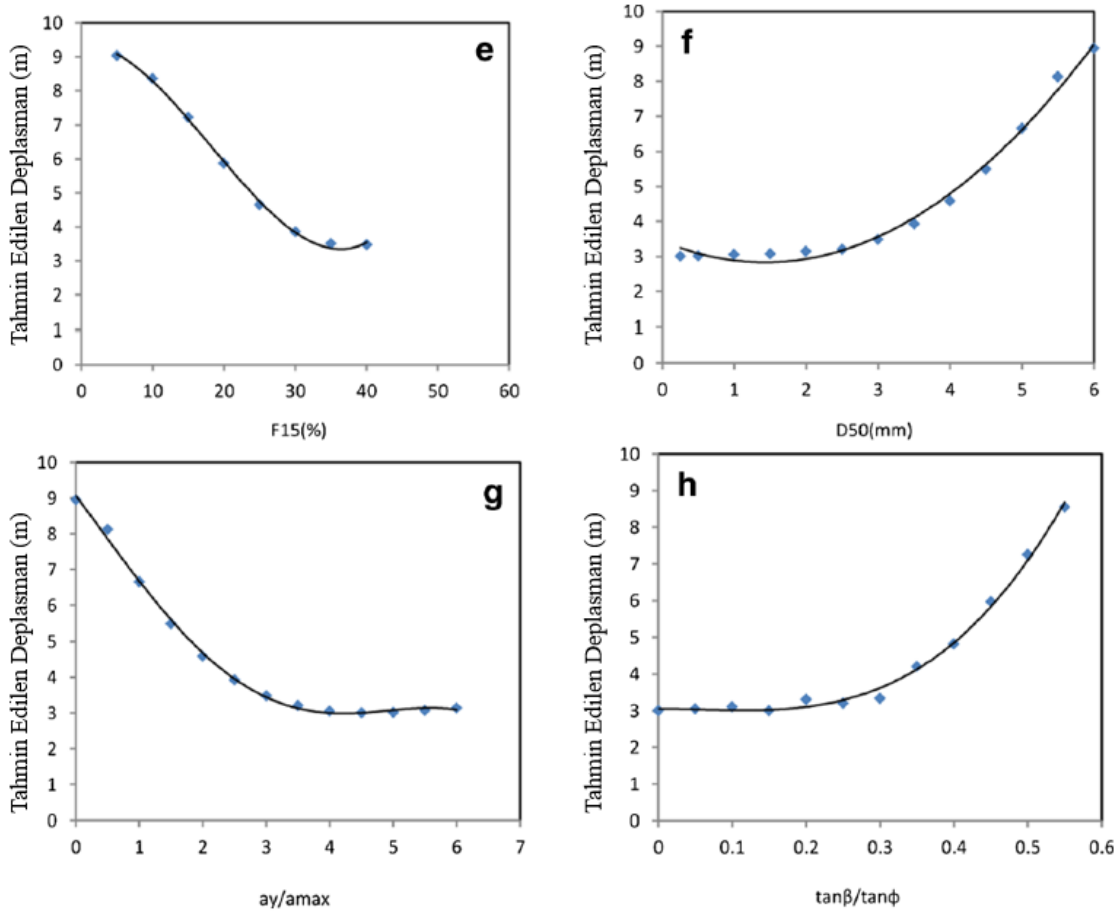
Burada, Y değerleri birbirlerine (Y_1-Y_{13}) ve X (deprem, topoğrafya özellikleri) değerlerine bağlı olarak değişen değerler almaktadır.

Araştırmacılar belirlenen parametrelerin yanal deplasmanlar üzerindeki etkisini anlayabilmek için her bir parametreyi sabit tutarak ve diğer parametreleri değiştirerek analizler yapmıştır. Çalışmanın sonucunda Şekil 2.15 ve 2.16 a-h'deki grafikler elde edilmiştir [63].



Şekil 2.15 Genetik algoritmalı GMDH'nin parametrik analizi (a-d)

Şekil 2.15d'de görülebildiği gibi z_{cr} parametresinin yanal deplasman üzerindeki etkisi diğer parametrelerden farklıdır. Yanal deplasman değeri, maksimum bir değere ulaşılana kadar z_{cr}'deki artışla artar ve bu maksimum noktadan sonra, artan z_{cr}, yanal deplasman miktarında azalmaya neden olur. Buradan en kritik sıvılaştırılabilen alt tabakanın konumunun, yanal yayılma yer değiştirmesini etkileyen önemli bir faktör olduğu sonucuna varılmıştır.



Şekil 2.16 Genetik algoritmalı GMDH'nin parametrik analizi (e-h)

2.3.2.15 Durante ve Rathje (2021) Yöntemi

Sıvılaşma kaynaklı yanal yayılmanın tahmini için araştırmacılar tarafından geliştirilen model, bir regresyon modelinden ziyade bir sınıflandırma modeli olarak ele değerlendirilebilir. Yeni Zelanda Deprem Dizisinde (NZGD) önemli hasara neden olan sıvılaşma kaynaklı yanal yayılmaların incelendiği literatürdeki ender çalışmalardan biri olan çalışmada, Yeni Zelanda Geoteknik Veri Tabanında (NZGD, 2013) oldukça fazla sayıda yer alan CPT verisi kullanılmış [72]. Bağımsız değişkenler nehre uzaklık (L), yeraltı suyu derinliği (GWT), topografik eğim (S), en yüksek yer ivmesi (PGA), yükseklik, eşdeğer temiz kum ucu direnci ($qc_{1,Ncs}$), zemin davranış tipi indeksi (I_c) olarak seçilmiştir. Analizler iki ana gruba ayrılmıştır: Birincisi sıvılaşmaya bağlı yanal yayılmaların gözlenip gözlemlenmeyeceğini tahmin etmek, ikincisi ise yanal yayılmanın gözlemleneceği noktalarda (0.3-0.5 m-0,5-1.0 m ve >1.0 m). Çalışmanın olumlu yanı girdi parametrelerinin azlığına rağmen elde edilen sonuçların oldukça iyi olmasıyken, net bir yanal yer değiştirmenin hesaplanamaması ise olumsuz yanıdır [73].

2.3.3 Maksimum Olabilirliğe Dayanan Yöntemler

Maksimum olabilirlik tahmini; gözlenmiş verilerden bir olasılık dağılımının parametrelerini tahmin etmek için kullanılan bir istatistiksel yöntem olup rassal bir olayın gerçekleşme nedeni olarak o olayın, gerçekleşme olasılığı en yüksek olan olay olması esasına dayanmaktadır. Parametre değerleri, model tarafından açıklanan işlemin gerçekte gözlemlenen verileri üretme olasılığını maksimize edecek şekilde bulunur (Fisher, 1922). Bu yöntem en popüler tahmin yöntemi olup literatürde sıkça yer bulmaktadır [49].

2.3.3.1 Al Bawwab (2005) Yöntemi

Youd vd. (2002) veri setine yeni depremlerin eklenmesi ile toplam 526 adet veriden oluşan yeni bir veri seti oluşturulmuştur. Derlenen veri seti üç ayrı başlık altında incelenmiştir: Yüzey eğiminin olmadığı durum, serbest yüzeyin olmadığı durum ve her ikisinin de olduğu durum. Oluşturulan bu yeni veri seti maksimum olabilirlik yöntemi ile analiz edilmiştir. Yapılan analizler sonucunda 85.5 R^2 değeri elde edilmiştir [55].

2.3.3.2 Hasançebi (2011) Yöntemi

Al Bawwab (2005) ile aynı veri setinin kullanan araştırmacı literatürdeki diğer çalışmaların aksine veri setinde yer alan Japonya'ya ait deprem verilerini yeniden değerlendirmiştir [49]. Yeniden değerlendirilen bu veri setinde maksimum olabilirlik yöntemi uygulayan araştırmacı Al Bawwab'ın yaklaşımına benzer olarak saha koşullarını dört farklı kategoride incelemiştir: Yalnızca topoğrafik eğimin olduğu durum, yalnızca serbest yüzeyin olduğu durum, hem topoğrafik eğimin hem de serbest yüzeyin olduğu durum ve her ikisinin de mevcut olmadığı durum.

Yapılan analizler neticesinde en iyi sonucun topoğrafik eğim ve serbest yüzeyin olmadığı durumda elde edildiği, en büyük hata oranının ise yalnızca serbest yüzeyin olduğu durumda elde edildiği görülmüştür. Araştırmacı önerilen çözüm yönteminin veri setinin neredeyse %90lık kısmında iyi sonuç verdiğini ortaya koymuştur [49].

Bu çalışma kapsamında incelenen yapay zekaya dayanan yöntemlere ait özet bilgi (kullanılan yöntem, parametreler, veri seti, veri adedi, verinin kaynağı, yöntemde doğrulama kullanılma durumu ve eğitim ve teste ait R2 değerleri) Tablo 2.3'te görülebilmektedir [74]. Tablo 2.4'te ise bahsi geçen yöntemlerde kullanılan veri setlerinin içerdiği depremler görülebilmektedir.

Tablo 2.3 Sıvılaşma kaynaklı yanal yayılma tahmininde yapay zekaya dayanan yöntemlerin özeti

Referans	Yöntem	Parametreler	Veri Seti	Veri Sayısı	Veri Kaynağı	Doğrulama*	R2 x 100 (Eğitim)	R2 x 100 (Test)
Wang ve Rahman (1999) [64]	Sinir Ağı	M, R, S, W, T_{15}, F_{15}	Bartlett ve Youd (1992)	467	SPT	Yapılmadı	85.6 (SY)	82.1 (SY)
							71.1 (HE)	60.2 (HE)
Baziar ve Ghorbani (2005) [65]	Yapay Sinir Ağları	M, R, T_{15}, F_{15}, $D50_{15}$, S, W	Youd vd. (2002)	484	SPT	Yapılmadı *	95	85
Javadi vd. (2006) [58]	Genetik Programlama	M, R, F_{15}, T_{15}, W, $D50_{15}$	Youd vd. (2002)	484	SPT	Yapıldı	92.1 (SY)	85.3 (SY)
							90.8 (HE)	91.8 (HE)
Garcia vd. (2008) [66]	Sinir Ağı ve Bulanık Sistem	M_w, R*, A, S, W, L, T15, F_{15}, $D50_{15}$	Youd vd. (2002)	484	SPT	Yapılmadı	99.5	97
Siyahi vd. (2008) [67]	Sinir Ağı	ML, σ_0, σ'_0, N, a/g, τ_{ort}/σ_0, F, D_{50}	Tokimatsu ve Yoshimi (1983)	175	SPT	Yapılmadı *	93.74**	95.87**
Önder (2010) [59]	Yapay Sinir Ağları	ML, R, a/g, σ_0, σ'_0, N, τ_{ort}/σ_0, F, D_{50}	Önder (2010)	175	SPT	Yapılmadı	0.99	-
Baziar ve Azizkandi (2013) [60]	Yapay Sinir Ağları ve Genetik Programlama	M, R, W, S, T_{15}, F_{15}, $D50_{15}$	Baziar ve Azizkandi (2013)	525	SPT	Yapılmadı	91.02	84.3
Goh ve Zhang (2014) [57]	Çok Değişkenli Uyarlanabilir Regresyon Eğrileri (MARS)	M_w, R, logR*, logW, logS, log T_{15}, log (100-F_{15}), log($D50_{15}$+0.1)	Youd vd. (2002)	484	SPT	Yapılmadı	93.68 (SY)	85.59 (SY)
							90.47 (HE)	89.39 (HE)
Jirdehi vd. (2014) [68]	Grup Veri İşleme Yöntemi (GMDH) Tipi Sinir Ağı	M_w, a_{max}/g, S, W, LSI, z_{cr}, ay/amax, $tan\beta/tan\varphi\prime$	Youd vd. (2002) Al Bawwab (2005)	250	SPT	Yapılmadı	99.0 (SY)	98.0 (SY)
							98.0 (HE)	99.0 (HE)
Kaya (2016) [61]	Çoklu Doğrusal Regresyon (MLR), Çok Katmanlı Algılayıcı (MLP), Uyarlanabilir Nöro-bulanık Girişim Sistemi (ANFIS)	logM, logPGA, logR, $log\,T_{15}$, log(100-F_{15}), log $D50_{15}$, logS, logW	Kaya (2016) ***	488	SPT	Yapıldı	88 (SY)	77 (SY)
							73 (HE)	85 (HE)
Avval ve Derakhshani (2018) [69]	Makine Öğrenmesi (Model ağaç yaklaşımı)	M_w, T_{15}, F_{15}, D_{50}, R	Youd vd. (2002)	484	SPT	Yapılmadı	95****	-
		R0/R, T/D50, W, S, F_{15}				Yapılmadı	90****	
Karalı (2019) [70]	Yapay Sinir Ağları	M_w, a_{max}, TS, IL, LS, LSI*, β(%),$a_{y\,a_{max}}$, H, S, R, T_{15}, F_{15}, $D50_{15}$, W, z_{cr}, $tan\phi'/tan\theta'$, γs	Hasançebi (2011)	197	SPT	Yapıldı	81.25	90.59
Pirhadi vd. (2019) [71]	Yapay Sinir Ağları	M_w, W, T_{15}, F_{15}, $D50_{15}$, CAV5	Pirhadi vd. (2019)***	163	SPT	Yapıldı	92.0	95.0
Farrokhi vd. (2020) [63]	Genetik Algoritma GDMH-tipi Sinir Ağı	M_w, a_{max}, W, $D50_{15}$, z_{cr}, $a_{y\,a_{max}}$, $tan\beta/tan\varphi\prime_{eqyv,liq}$	Farrokhi vd. (2019)***	526	SPT	Yapıldı	91.6	90.3
Durante ve Rathje (2021) [73]	Makine Öğrenmesi (Rassal Orman)	L, GWT, S, PGA, Elevation, q...	Durante ve Rathje (2021)	7300	CPT	Yapıldı	89.0	71.0

+ Burada doğrulama ile kastedilen, eğitim ve test aşaması dışında bir veri kümesinin oluşturulması veya eğitim aşamasında k-ortalama gibi bir çapraz doğrulama algoritmasının kullanılmasıdır.

* Çalışmada doğrulama terimi kullanılmaktadır ve bahsedilen doğrulama terimi eğitim ve testten ayrı bir adım değil, test aşamasının kendisidir. "Yapılmadı" olarak işaretlenmelerinin nedeni budur.

** R^2 değeri yerine yüzde hatası ile hesaplanarak bulunan doğruluk oranını göstermektedir.

*** Youd vd. (2002)'ye ek oluşturulan veri setleri.

**** Bahsedilen değer R^2 değeri değil, korelasyon katsayısıdır.

Tablo 2.4 Analiz yöntemlerinde kullanılan depremler

Deprem	Referans														
	Wang ve Rahman (1999)	Baziar ve Ghorbani 2005)	Javadi vd. (2006)	Garcia (2008)	Siyahi vd. (2008)	Önder (2010)	Baziar ve Azizkandi (2013)	Jirhedi vd. (2014)	Goh ve Zhang (2014)	Kaya (2016)	Avval ve Derakhshani (2018)	Karalı (2019)	Farrokhi vd. (2020)	Pirhadi vd. (2019)	Durante ve Rathje (2021)
1981, Mina Owaki					+										
1906, San Francisco	+	+	+	+			+	+	+	+	+		+	+	
1923, Kanto					+							+			
1944, Tohnankai					+										
1948, Fukui					+							+			
1957, San Francisco					+										
1964, Alaska	+	+	+	+	+		+	+	+	+	+	+	+	+	
1964, Niigata	+	+	+	+	+		+	+	+	+	+	+	+	+	
1971, San Fernando	+	+	+	+	+		+	+	+	+	+	+	+	+	
1976, Guatemala					+			+					+		
1977, Arjantin								+				+	+		
1978, Miyaginen-Oki					+										
1979, Imperial Valley	+	+	+	+	+		+	+	+	+	+		+	+	
1980, Chibaken-Chubu					+										
1983, Nihonkai-Chubu	+	+	+	+			+	+	+	+	+	+	+	+	
1983, Borah Peak	+		+				+	+	+	+	+		+	+	
1987, Superstition Hills	+	+	+	+			+	+	+	+	+		+	+	
1989, Loma Prieta			+		+		+	+	+	+	+	+	+	+	
1990, Manjil					+										
1990, Luzon					+			+					+		
1992, Erzincan					+										
1993, Hokkaido Nansei												+			
1994, Northridge								+					+		
1995, Hyogo-Ken Nanbu			+				+	+	+	+	+	+	+	+	
1999, Chi Chi							+	+				+	+		
1999, Kocaeli					+		+	+		+			+		
2003, San Simeon								+					+		
2003, Tokachi Oki								+					+		
2010, Darfield															
2011, Christchurch															+
Ambraseys tarafından raporlanan depremler (Ambraseys, 1988)		+	+				+		+	+	+			+	

3
YAPAY SİNİR AĞLARI

Günümüz dünyasında bilgisayar teknolojileri ve bu teknolojinin insanlık üzerindeki etkisi tartışılmaz bir boyuttadır. Evimizdeki çamaşır makinelerinden, elimizdeki cep telefonlarına kadar birçok elektronik alet bilgisayar sistemleri ile çalışmaktadır. Askeri teknolojilerden sağlık alanına kadar birçok alanda bu teknolojiler vazgeçilmez hale gelmiştir.

Geçmişte karmaşık hesaplamalar yapmak ve elektronik veri transferi için kullanılan bilgisayarlar günümüzde olaylar arasında ilişki kurup, öğrenip ve karar verebilmektedir. Yapay zekâ olarak anılan bu teknoloji ilk defa 1950'li yıllarda ortaya çıkmış olup günümüze kadar güncelliğini korumuş ve birçok disiplinden araştırmacının ilgi odağında olmuştur.

Bir bilgisayar sisteminin akıllı canlılara özgü olan algılama, öğrenme, fikir yürütme, çıkarımda bulunma ve sorun çözme gibi bilişsel fonksiyonları gerçekleştirmesi olarak tanımlanabilen yapay zekâ bilimi Uzman Sistemler, Makine Öğrenmesi ve Yapay Sinir Ağları, Genetik Algoritmalar, Bulanık Önermeler Mantığı ve Zeki Etmenler olmak üzere 5 alt başlıkta incelenebilir [75].

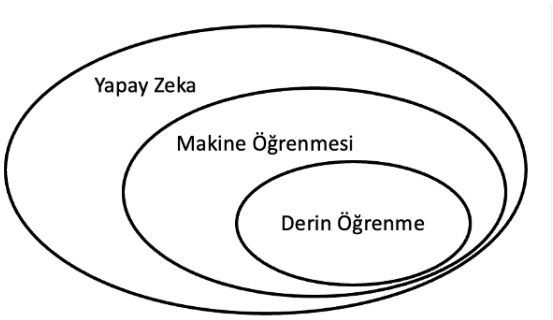
Bu tez çalışması kapsamında makine öğrenmesi ve yapay sinir ağları kullanılarak sıvılaşma kaynaklı yanal yayılma miktarları tahmin edilmeye çalışılacaktır.

3.1 Makine Öğrenmesi ve Yapay Sinir Ağları (YSA)

Şekil 3.1'de görülebildiği gibi yapay zeka, makine öğrenmesi ve derin öğrenme kapsayıcı bir şemsiye gibidir [76].

Makine öğrenmesi, bilgisayarın bir olay ile ilgili bilgileri ve tecrübeleri öğrenerek gelecekte oluşacak benzeri olaylar hakkında kararlar verebilmesi ve problemlere çözümle üretebilmesidir [75]. Girdi ve kuralların verilerek çıktıların üretilmesi beklenen klasik programlamadan farklı olarak girdi ve çıktıların verildiği ve bunlar arasındaki ilişkinin çözülerek yeni verilere uyarlanmasına dayanan makine öğrenmesi uygulamalarında sistemler elle programlanmak yerine eğitilirler [76]).

Klasik makine öğrenmesi modellerine göre, modelin derinliğini belirleyen katmanlardan oluşan derin öğrenme modelleri gerek günümüz dünyasında toplanan



Şekil 3.1 Yapay zekâ, makine öğrenmesi ve derin öğrenme arasındaki ilişki

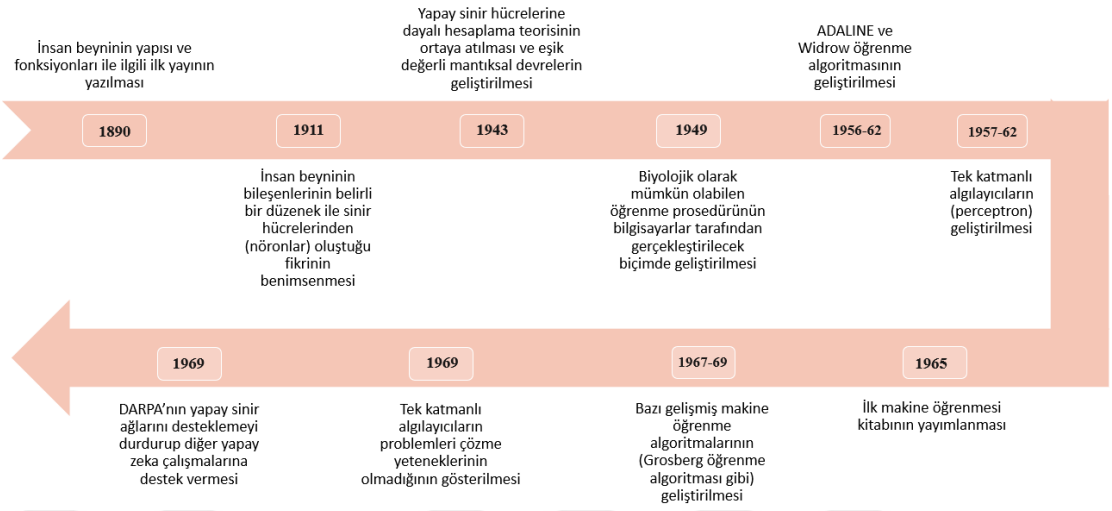
verinin miktarındaki kümülatif, eksponansiyel artış gerekse üretilen güçlü makinelerin varlığı neticesinde karmaşık problemlerin çözümünde önemli bir rol oynamaktadır. Sinir ağı olarak isimlendirilen bu katmanlı yapı, birbirini takip eden katmanlar ile öğrenme işlemini gerçekleştirebilmektedir [76]. Model derinliğini belirleyen katmanlar öğrenme işleminin önemli bir parçasıdır.

Geliştirilme sürecinde her ne kadar insan beyninden ilham alınılsa da insan beyninin çalışma prensibi ile derin öğrenme modellerinin çalışma prensipleri arasında doğrudan bir benzerlik tespit edilememiştir [76].

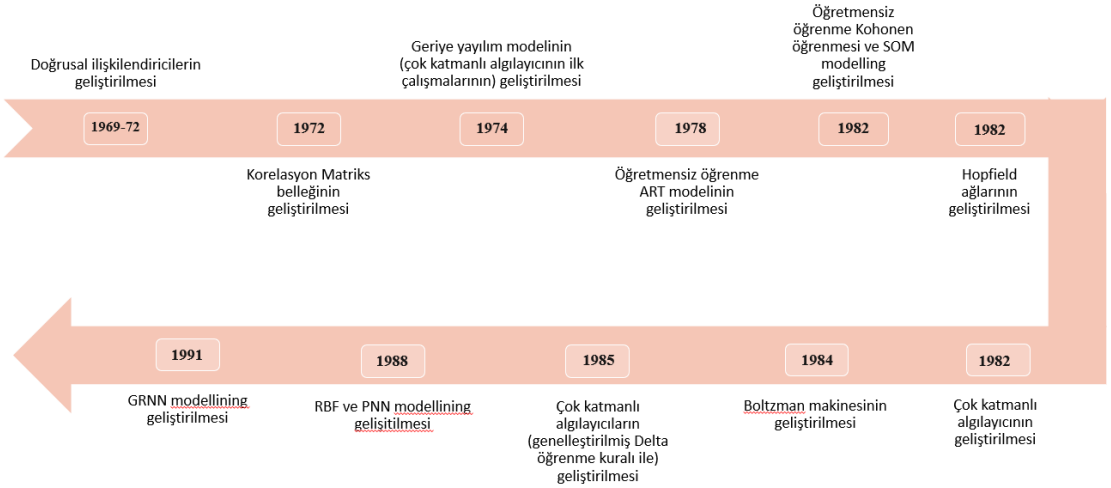
3.2 Yapay Sinir Ağlarının Tarihçesi

Yapay sinir ağlarının tarihi gelişimi 1970 öncesi ve sonrası olarak iki tarih aralığında incelenebilir. Warren McCulloch ve Walter Pitts tarafından 1943 yılında ilk yapay sinir ağı modeli oluşturulmuş ve eşik değerli mantıksal devreler geliştirilmiştir. 1949 yılında Donald Hebb, kendi adı ile anılan “Hebbian öğrenme” öğrenme kuralını geliştirmiştir. Bu kuram “birlikte tetiklenen nöronlar, birbirlerine bağlanırlar” şeklinde özetlenebilmektedir. Hebb’e göre; bir sinir hücresi, başka bir sinir hücresinden girdi alıyorsa ve her ikisi de aktifse, bu iki nöron arasındaki ağırlık artacaktır. 1956 yılında yapay zekâ kavramının ortaya çıkması nedeniyle araştırmacıların ilgisi yapay sinir ağları ve makine öğrenmesinden yapay zekaya yönelmiştir. 1965 yılında makine öğrenmesi ile ilgili ilk kitap yayımlanmış olsa da 60’lı yıllarında sonlarına doğru yapay sinir ağları hakkındaki çalışmalar durma noktasına gelmiştir. 1980 yıllara kadar duraklamanın devam etmesinin ardından 1982’de Hopfield ağlarının geliştirilmesi ile çözülmesi güç problemlere çözüm üretilebileceği gösterilmiştir. Problem çözme yeteneği olmayan tek katmanlı algılayıcılar yerine 1982 yılında çok katmanlı algılayıcılar geliştirilmiştir. Çok katmanlı algılayıcıların XOR problemini çözmesi, 1986 yılında Rumelhart’ın Yapay Sinir Ağları’nın gelişiminde çok önemli bir rol oynayan çok katmanlı algılayıcıların geri yayılmalı bir algoritma geliştirmesi ile makine öğrenmesi ve yapay sinir ağları günümüze değin popülerliğini koruyan bir

uygulama olmuştur. Yapay sinir ağları alanında yapılan bazı çalışmalar kronolojik olarak Şekil 3.2 ve 3.3'te görülebilir [75].



Şekil 3.2 1970 öncesi yapay sinir ağları çalışmaları



Şekil 3.3 1970 sonrası yapay sinir ağları çalışmaları

3.3 Yapay Sinir Ağlarının Yapısı

Yapay sinir ağları tasarlanırken canlılardaki sinir sistemi baz alınmıştır. Tıpkı canlıların sinir sisteminin en küçük yapı birimi olan nöron gibi, yapay nöronlar da yapay sinir ağlarının en küçük yapı taşını oluşturur. Şekil 3.3'te gösterilmiş olan yapay sinir hücresinin temel yapısında x'ler girdileri, Y ise çıktıyı göstermekte olup her bir girdi kendi ağırlığıyla çarpılarak bir sapma değeriyle toplanır ve bu toplam transfer veya aktivasyon fonksiyonuna aktarılarak çıktı değeri oluşturulur [77].

Yukarıda bahsi geçen bir yapay sinir ağı hücresinin bölümleri aşağıdaki gibi özetlenebilir:

- Girdi: Her bir nörona gelen bilgiye verilen isimdir. Bir dış ortamdan elde edilebileceği gibi başka bir nörondan da elde dilebilmektedir.
- Ağırlık: Nöronlara gelen girdilerin, çarpılarak çıktı üzerinde etkinliğinin hesaplanmasını sağlamaktadır. Değerleri negatif, sıfır veya pozitif olmakla birlikte sıfır değerli ağırlıklar, çıktı üzerinde herhangi bir etkiye sahip değildir.
- Toplama fonksiyonu: Yapay sinir hücresine ulaşan ağırlıkların hücre girdileri ile çarpılarak hücreye gelen net değeri hesaplar. Toplama fonksiyonundan elde edilen değer, belirlenen aktivasyon fonksiyonundan geçirilerek sonraki elemana aktarılır.
- Aktivasyon fonksiyonu: Yapay sinir hücresinin nihai çıktı değerini belirlemek için çeşitli ağırlıkların ve girdilerin çarpımını toplayarak hesaplanmasını sağlar. Bir aktivasyon fonksiyonunun türevlenebilir olması, alt ve üst sınırla sahip olması, doğrusal olmaması ve orjin noktasında kendine yakınsaması beklenir. Uygulamalarda kendine en çok yer bulan aktivasyon fonksiyonlarından bazıları Doğrusal, Sigmoid, Tanh ve ReLU'dur. Bu fonksiyonların grafikleri Şekil 3.4'te gösterilmiştir.
  - Doğrusal: Doğrusal aktivasyon fonksiyonu, girdi ile orantılı bir çıktı sinyali oluşturur. Doğrusal fonksiyonların türevlenemiyor olması, bu aktivasyon fonksiyonunun başlıca dezavantajlarındandır. Doğrusal aktivasyon fonksiyonunun eşitliği aşağıda gösterilmiştir:

$$f(x) = \begin{cases} 0 & \text{for} \quad x < 0 \\ x & \text{for} \quad x \geq 0 \end{cases} \tag{3.1}$$

  - Sigmoid: Sigmoid aktivasyon fonksiyonu, çıktı olarak 0 ile 1 arasında bir değer almakta olup girdi ne kadar büyükse çıktı değeri 1'e, girdi ne kadar küçükse çıktı değeri 0'a o kadar yakın olur. Sigmoid aktivasyon fonksiyonunun eşitliği aşağıda gösterilmiştir:

$$\phi(v) = \frac{1}{1 + \exp(-av)} \tag{3.2}$$

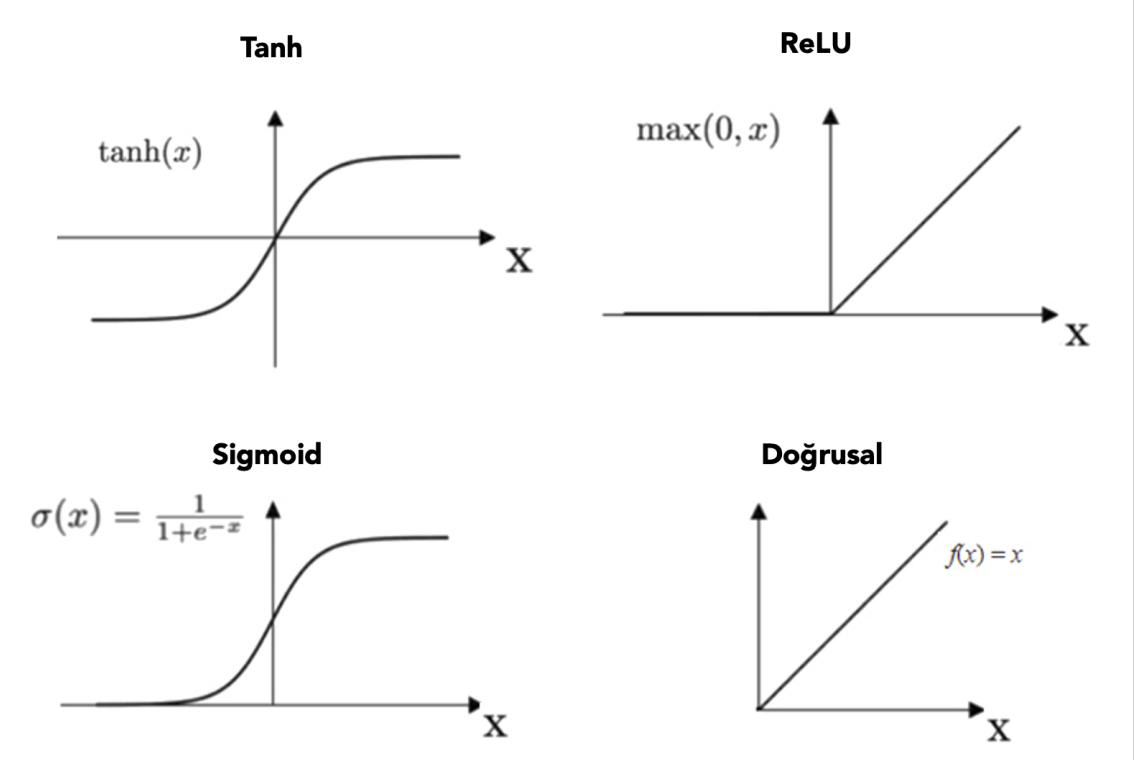
  - Tanh: Hiperbolik tanjant aktivasyon fonksiyonu, çıktı olarak –1 ile 1 arasında bir değer almakta olup sigmoid aktivasyon fonksiyonuna benzer bir şekilde girdi ne kadar büyükse çıktı değeri 1'e, girdi ne kadar küçükse çıktı değeri -1'e o kadar yakın olur. Tanh aktivasyon fonksiyonunun eşitliği

aşağıda gösterilmiştir:

$$\phi(v) = \frac{2}{(1+\exp(-2v))} - 1 \tag{3.3}$$

– ReLU: Düzeltilmiş doğrusal birim (Rectified Linear Unit) aktivasyon fonksiyonu, sıfırdan küçük girdilerin değerlerini düzeltir ve sıfıra zorlar. ReLU aktivasyon fonksiyonunun eşitliği aşağıda gösterilmiştir:

$$f(x) = \begin{cases} 0 & \text{for} \quad x < 0 \\ x & \text{for} \quad x \geq 0 \end{cases} \tag{3.4}$$

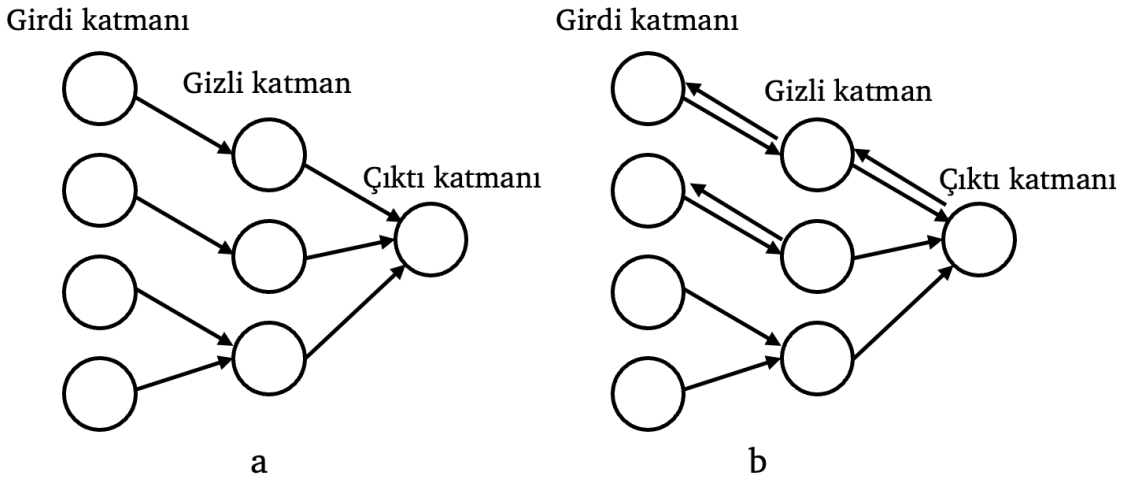


Şekil 3.4 Aktivasyon fonksiyonlarının grafikleri

Problemin doğası gereği yukarıda bahsi geçen aktivasyon fonksiyonlarının, yapıları da göz önünde bulundurularak, denenmesi ve sonuçlar üzerindeki etkilerinin gözlemlenmesi gerekebilmektedir.

Yapay sinir ağları yapılarına göre iki ana başlıkta gruplanabilir: İleri beslemeli, geri beslemeli yapay sinir ağları (Şekil 3.5). Çok katmanlı algılayıcı olarak da adlandırılan ileri beslemeli yapay sinir ağlarında bilgi ileri yönlü akar. Modelin çıktılarının modelin kendisini geri beslemesinden bahsedilmemektedir [78]. Bir katmandan elde edilen sonuç yalnızca sonraki katmana iletilir. Geri beslemeli yapay sinir ağlarında ise bir alt başlıkta detaylandırılan kayıp fonksiyonunun etkisinin direkt olarak ileri

yönlü, çıkış katmanına verilmediği, bunun yerine geriye dönül olarak ağırlıkların güncellenmesinde kullanıldığı ağ modelleridir.



Şekil 3.5 a) İleri beslemeli b) geri beslemeli yapay sinir ağları

3.4 Model Tahminlerinin Değerlendirilmesi

Bir makine öğrenmesi veya derin öğrenme modelinin tahmin gücünün ölçülebilmesi için çeşitli değerlendirme metriklerinin kullanılması gerekmektedir. Kurulan model neticesinde elde edilen sonuçlar ile gerçek değerlerin kıyaslanması kayıp fonksiyonu aracılığı ile yapılmaktadır. Kayıp fonksiyonu kurulan ağın başarısını gösterir. Regresyon analizlerinde en sık kullanılan değerlendirme metrikleri:

- Ortalama mutlak hata: Gerçek değerler ile tahmin edilen değerlerin arasındaki farkların mutlak değerlerinin ortalamasıyla hesaplanan bir hata metriğidir.

$$MAE = \frac{\sum_1^n (|\hat{y}_i - y_i|)}{n} \tag{3.5}$$

- Ortalama hatalar karesi: Gerçek değerler ile tahmin edilen değerlerin arasındaki farkların karelerinin ortalamasıyla hesaplanan bir hata metriğidir.

$$MSE = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(Y_i - \hat{Y}_i)^2 \tag{3.6}$$

- Ortalama hatalar karesinin kökü: Gerçek değerler ile tahmin edilen değerlerin arasındaki farkların karelerinin ortalamasının kareköküyle hesaplanan bir hata metriğidir.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_1^n (\hat{y}_i - y_i)^2}{n}} \tag{3.7}$$

- Belirleme katsayısı R^2: Lineer regresyon modeli ile açıklanan bağımlı değişkendeki varyansın oranını temsil eder.

$$R^2 = 1 - \frac{\sum (y_i - \hat{y})^2}{\sum (y_i - \bar{y})^2} \tag{3.8}$$

Bir makine öğrenmesi/derin öğrenme algoritmasının performansının ölçülmesinde iki önemli faktör bulunmaktadır: Küçük eğitim hatası, eğitim ve test hataları arasındaki farkın minimum olması. Bu iki faktör makine öğrenmesi/derin öğrenme problemlerinde en önemli konulardan biri olan aşırı öğrenme (aşırı uydurma) ve yetersiz öğrenmeyi (yetersiz uydurma) belirler [78].

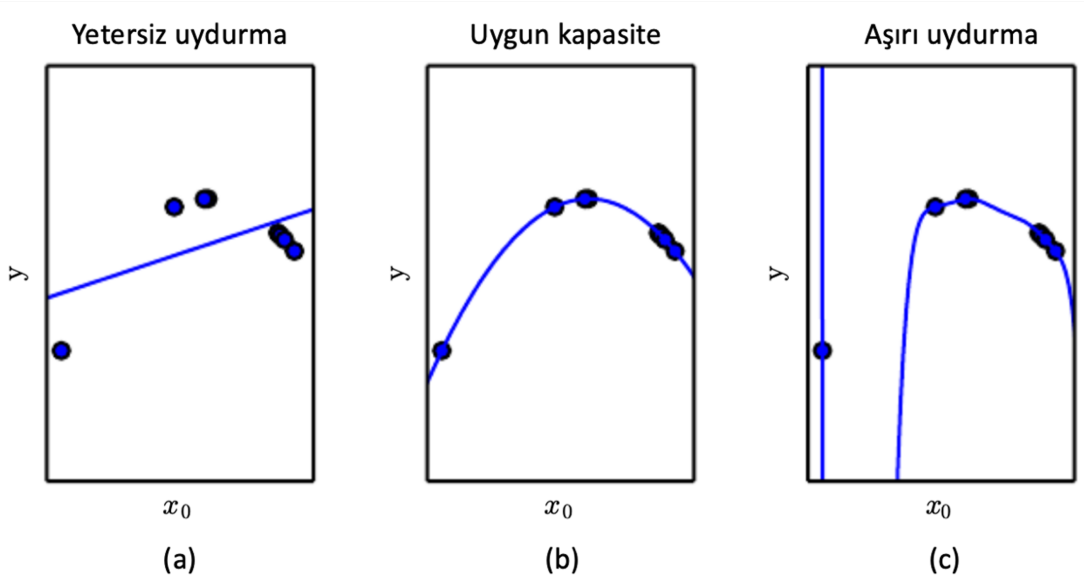
Eğitim kümesinde algoritmanın düşük performans ve yüksek hata göstermesi problemi yetersiz öğrenme olarak tanımlanmaktadır. Model, kendisine tanıtılan verilerdeki ilişkiyi anlayıp çözümleyemez. Modelin düşük kapasitede oluşu (katman sayısının/nöron sayısının azlığı, öğrenme oranının çok yüksek seçilmesi, çağ sayısının düşük seçilmesi gibi) yetersiz öğrenme problemine neden olan en önemli etkenlerdendir.

Yetersiz öğrenmenin tam tersi olan aşırı öğrenme (aşırı uydurma) durumunda ise problemin çözümü için kurulan model fazlasıyla yüksek kapasitelidir (yüksek nöron/katman sayısı, yüksek çağ seçimi gibi). Eğitim aşamasında oldukça düşük hata/yüksek doğrulukla çalışan modeller test aşamasında geldiğinde problemi genelleyemediklerinden yüksek hata/düşük doğruluk ile karşılaşır. Şekil 3.6'de yetersiz ve aşırı uydurma (öğrenme) problemlerinin temsili gösterimi görülebilmektedir.

Şekil **??**'de de görülebildiği gibi yetersiz uydurmada model problemi tam anlamıyla tanımlayamamakta iken aşırı uydurmada problem genellenememektedir. Uygun kapasite eğitim hatasının düşük, eğitim ve test hataları arasındaki farkın da minimum olduğu durumdur.

3.5 Derin Öğrenmede Eniyileme

Bir yapay sinir ağı modelinin eniyilemesinin birden çok ayağı bulunmaktadır. Eniyilemenin birden çok makine ile günler hatta aylarca sürebildiği örnekler oldukça yaygındır. Geleneksel makine öğrenmesi modelleri optimizasyon probleminin dışbükey olması amaçlanarak belirli sınırlar dahilinde tasarlanmıştır. Yapay sinir ağlarında ise makine öğrenmesi modellerindeki belirlenen bu sınırlandırmaların dışına çıkıldığından optimizasyon zorlu bir süreç haline gelmektedir. Yerel minimum



Şekil 3.6 Model kapasitesini gösterir şekiller (a) Yetersiz uydurma, (b) Uygun kapasite ve (c) Aşırı uydurma

noktaları, plato ve eyer noktalarının varlığı gibi problemler optimizasyon sürecinde karşılaşılabilen önemli zorluklar arasında yer almaktadır [78]

Oldukça önemli ancak bir o kadar da maliyetli olabilen bu süreç için bir grup optimizasyon yöntemi mevcuttur.

3.6 Derin Öğrenmede Yaygın Kullanılan Kütüphaneler

Günümüzde yapay sinir ağlarını uygulama amacıyla oluşturulmuş birçok kütüphane bulunmaktadır. Bu tür kütüphaneler standart programlama dilleriyle entegre çalışabilen ve makine öğrenmesi ile yapay sinir ağlarıyla ilgili gerekli birçok aracın tek bir yerde toparlayarak karmaşık veri analiz süreçlerini kolaylaştırmayı amaçlamaktadır [79]. Bunların arasında yer alan Keras, Tensorflow ve Pytorch gibi kütüphaneler, bu alanda en yaygın kullanılan kütüphanelerdir.

Keras, geniş çaplı bir makine öğrenme kütüphanesi olan Tensorflow'un kapsamında bulunan açık kaynak kodlu bir kütüphane olup yapay sinir ağlarına Python arayüzü sağlamaktadır. Bu kütüphane içerisinde diğer kütüphanelere kıyasla kullanım kolaylığı ve minimal kod gereksinimiyle ön plana çıkmaktadır.

4
VERİ SETİNİN OLUŞTURULMASI

Otuz yıllık geçmişe dayanan sıvılaşma kaynaklı yanal yayılmaların tahmini için geliştirilen yapay zekâ tabanlı yöntemler için çeşitli araştırmacılar tarafından çeşitli veri setleri oluşturulmaya çalışılmıştır. Bartlett ve Youd (1992) ile başlayan sıvılaşma kaynaklı yanal yayılma verilerinden oluşan veri setlerinden bazıları Tablo 4.1'de görüldüğü gibidir.

Tablo 4.1 Literatürde yer alan çalışmalarda kullanılan veri setlerindeki toplam veri adetleri

Yöntem	**Veri Adedi**
Bartlett ve Youd (1992, 1995)	448
Youd vd. (2002)	484
Al Bawwab (2005)	526
Önder (2010)	94
Hasançebi (2011)	335
Karalı (2019)	197
Bu çalışma	487

Tablo 4.1'de görülebildiği gibi sıvılaşma kaynaklı yanal yayılmaların tahmini için oluşturulan veri setlerinin en büyük problemi, yapay zekâ uygulamalarının doğruluğunda en çok etkili olan parametrelerden, veri adetlerinin düşük olmasıdır. Veri setlerindeki toplam veri adedinin düşük olmasının nedeni sıvılaşma kaynaklı yanal yayılmaların sık bir şekilde oluşmaması, oluşan yanal yayılmaların ise eksiksizce raporlanamamış olmasıdır.

Literatürde kendine yer bulmuş çalışmaların büyük çoğunluğu Youd vd. (2002)'ye dayanmakta olup, Canterbury deprem sekansına ait verileri içermemektedir. Yalnızca Durante ve Rathje (2021) 7300 noktadaki CPT verilerinden oluşan set ile sıvılaşma kaynaklı yanal yayılmaların gerçekleşip gerçekleşmeyeceği (evet/hayır) ve gerçekleşirse oluşacak yanal yayılma miktarının hangi sınıfa ait olacağını makine öğrenmesi algoritmaları ile tahmin etmeye çalışmışlardır [73].

Bu çalışma kapsamında Al Bawwab (2005) ve Hasançebi (2011)'in Youd vd. (2002)'ye dayanarak derledikleri verilere yeni ve mevcut geoteknik bilgiler için aranabilir bir havuz sağlayan çevrimiçi bir veritabanı olan Yeni Zelanda Geoteknik Veritabanı'ndan (New Zealand Geotechnical Database, NZGD) elde edilen Darfield ve Christchurch Depremlerine ait veriler eklenmiştir [49, 55]. Al Bawwab (2005) veri setinden 55

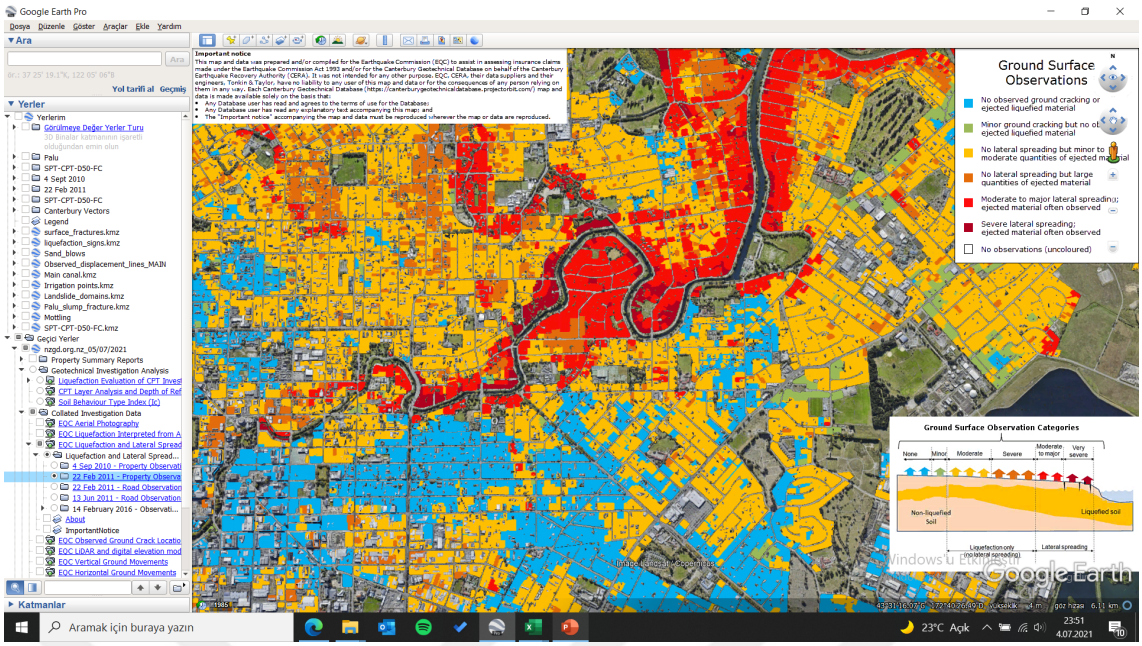
adet, Hasançebi (2011) veri setinden ise 336 adet veri alınmış olup, NZGD'ten 82 adet veri elde edilmiştir. Bunlara ek olarak 1999 Kocaeli depremi için 14 adet veri, Al Bawwab (2005) ve Hasançebi (2011) dışındaki kaynaklardan derlenmiştir [20, 80]. Derlenen veri setinden sıvılaşma kaynaklı yanal yayılma gözlem büyüklüklerinin sıfır olduğu veriler çıkartılmış olup analizler toplam 483 adet veri ile yürütülmüştür.

2010 ve 2011 yıllarında meydana gelen Darfield ve Christchurch depremlerine ait veriler Yeni Zelanda Geoteknik Veritabanı'ndan (New Zealand Geotechnical Database) derlenmiştir. Zemin profili, yeraltı su seviyesi, sıvılaşma ve yanal yayılma görülen bölgeler ve yanal hareket vektörleri, maksimum yer ivmesi vb. bilgileri içeren aşağıdaki haritalar kullanılmıştır:

- Geoteknik İnceleme Verisi: (Geotechnical Investigation Data (New Zealand Geotechnical Database, 2013a)): Veri sağlayıcılar tarafından paylaşılan arazi ve laboratuvar deney sonuçlarını içermektedir [81].
- Sıvılaşma ve Yanal Yayılma Gözlemleri (Liquefaction and Lateral Spreading (Observations, New Zealand Geotechnical Database, 2013b)): Eylül 2010, Şubat 2011 ve Haziran 2011 Depremlerinden sonra özel mülk ve yollarda gözlenen, kategorize edilmiş yüzeye çıkan malzeme miktarı ve gözlenen yanal yayılmaları içermektedir [81].
- Yüzeyde Gözlenen Yatay Hareketler (Horizontal Ground Surface Movements (New Zealand Geotechnical Database, 2012)): Önemli depremler sırasındaki hareketleri tahmin eden LiDAR setleri arasındaki yatay yer yüzeyi hareketleri içermektedir [82].
- Olaya Özgü Yeraltı Su Seviyesi Yükseklikleri (Event Specific Groundwater Surface Elevations (New Zealand Geotechnical Database, 2014)): Her bir deprem zamanında ölçülen yeraltı seviyelerini içermektedir [83].
- Sıvılaşma Değerlendirmesi için Koşullu PGA (Conditional PGA for Liquefaction Assessment (New Zealand Geotechnical Database, 2015)): Bradley Seismic Ltd. ve Canterbury Üniversitesi tarafından geleneksel sıvılaşma değerlendirmeleri için geliştirilen maksimum yer ivmelerini (PGA) içermektedir [84].

Veri setine eklenen 4 Ağustos 2010 ve 22 Şubat 2011 Yeni Zelanda depremlerine ait sıvılaşma kaynaklı yanal yayılmaların gözlendiği lokasyonlar Şekil 4.1'de görülebilmektedir [81].

Yukarıda bahsi geçen sıvılaşma ve yanal yayılma gözlemlerine ait renklendirmeler ise Şekil 4.2'de temsil edilmekte olup ve aşağıdaki anlamları ifade etmektedir [81]:

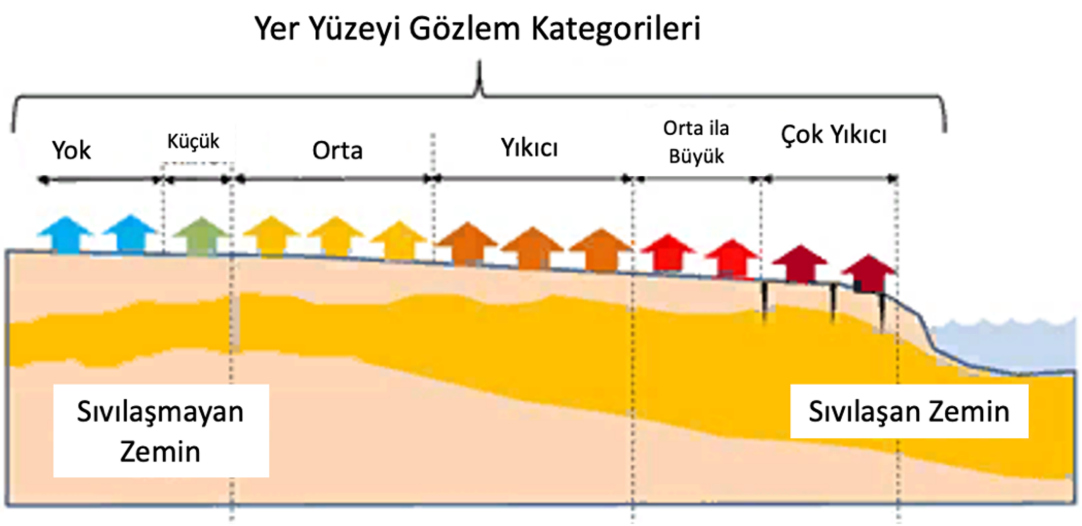


Şekil 4.1 Sıvılaşma ve yanal yayılmaların gözlendiği bölgeler

- Bordo: Şiddetli yanal yayılma: Sıklıkla yüzeye malzeme çıkmakta,
- Kırmızı: Orta ila büyük yanal yayılma: Sıklıkla yüzeye malzeme çıkmakta,
- Kahverengi: Yanal yayılma gözlenmemekte ancak büyük miktarlarda yüzeye malzeme çıkmakta,
- Turuncu: Yanal yayılma gözlenmemekte ancak orta ölçekte yüzeye malzeme çıkmakta,
- Yeşil: Yüzeyde küçük çatlaklar görülmekte ancak yüzeyde sıvılaşan malzeme görülmemekte,
- Mavi: Yanal yayılma ve yüzeye çıkan sıvılaşan malzeme görülmemekte,
- Beyaz (Renklendirilmemiş): Gözlem bulunmamakta.

New Zealand Geotechnical Database'te (2012) yer alan yatay hareketler, her bir ızgara noktasında hareketin hem yönünü hem de büyüklüğünü belirtmek için 56 m'lik bir ızgara üzerinde oklar olarak işlenmiştir. Yerdeğiştirme vektörleri 56:1 olarak ölçeklendirilmiş olup iki bitişik ızgara noktası (örneğin doğu-batı veya kuzey-güney) arasındaki bir ok belirtilen yönde 1 metrelik hareketi temsil etmektedir.

Hasançebi (2011) sıvılaşma kaynaklı yanal yayılmalar için derlediği veri setinde her bir sondaj logunun etrafına 25 metre yarıçaplı bir daire çizmiş, daire içinde kalan yerdeğiştirme vektörlerinin ortalamalarını alarak bir etiketleme yöntemi geliştirmiştir.



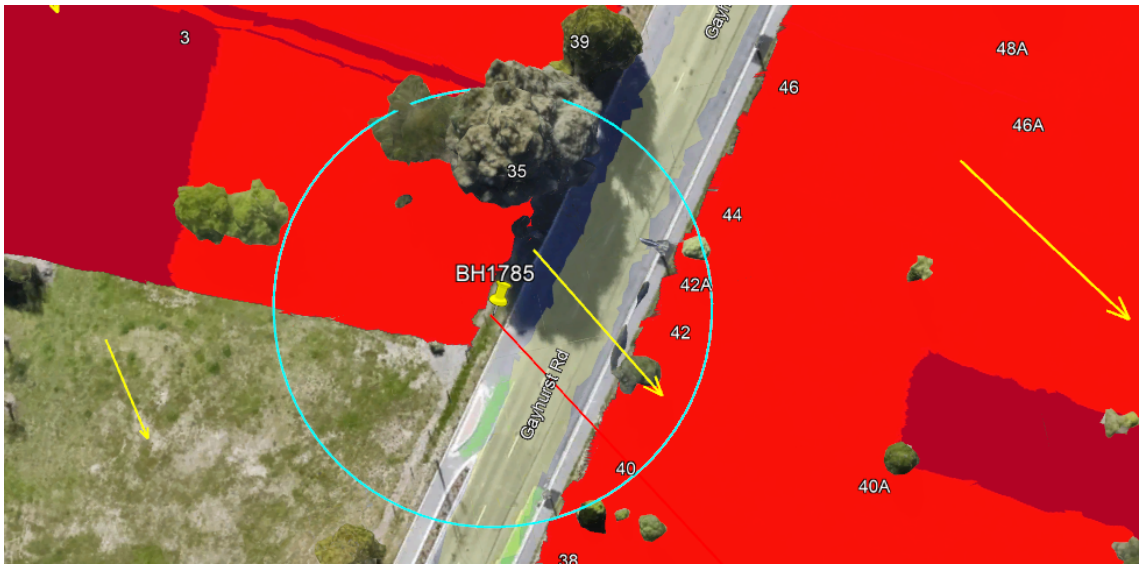
Şekil 4.2 Sıvılaşma hasar derecelerini gösterir görsel

Bu çalışma kapsamında da Hasançebi'nin (2011) yaklaşımına benzer olarak sıvılaşma kaynaklı yanal yayılmaların gözlendiği alanlarda kalan sondaj loglarının etrafına 28 metre çapında daireler çizilmiş (Şekil 4.3), her bir dairenin içinde kalan vektörlerin yön ve büyüklüklerinin ortalaması alınmıştır. Yerdeğiştirme vektörlerinin ortalaması alınırken aşağıdaki yöntem izlenmiştir:

- Çemberin içinde yalnızca bir adet yerdeğiştirme vektörünün olması durumunda gözlenen yerdeğiştirme miktarı ilgili vektörün büyüklüğü olarak alınmıştır.
- Çemberin içinde birden fazla sayıda yerdeğiştirme vektörü bulunması halinde vektörlerin yönleri düşünülerek ortalama alınmıştır. Yerdeğiştirme vektörlerinin aynı yönlü olması durumunda her bir yerdeğiştirme vektörünün büyüklükleri ile vektörlerin başlangıç noktasının sondaj loguna olan uzaklıkları çarpılarak toplanmış, elde edilen sonuç vektörlerin başlangıç noktalarının sondaj loguna olan uzaklıklarının toplamına bölünmüştür. Vektörlerin yönlerinin farklı olması durumunda ise vektörler tek bir bileşke vektör haline getirilmiştir.

Sondaj loglarının seçiminde ise aşağıdaki kriterler göz önünde bulundurulmuştur:

- Yalnızca sıvılaşma kaynaklı yanal yayılmaların gözlendiği bordo ve kırmızı ile işaretli alanlar,
- Standart Penetrasyon Testi'nin yanında ince dane içeriği ve ortalama dane çapı bilgilerine erişebilmek için laboratuvar deneylerinin de gerçekleştirilip yeterli bilgiye erişilebildiği noktalar,



Şekil 4.3 Dallington Bölgesi'nde yer alan BH-1785 numaralı sondaj logunun etrafına çizilen tampon bölge

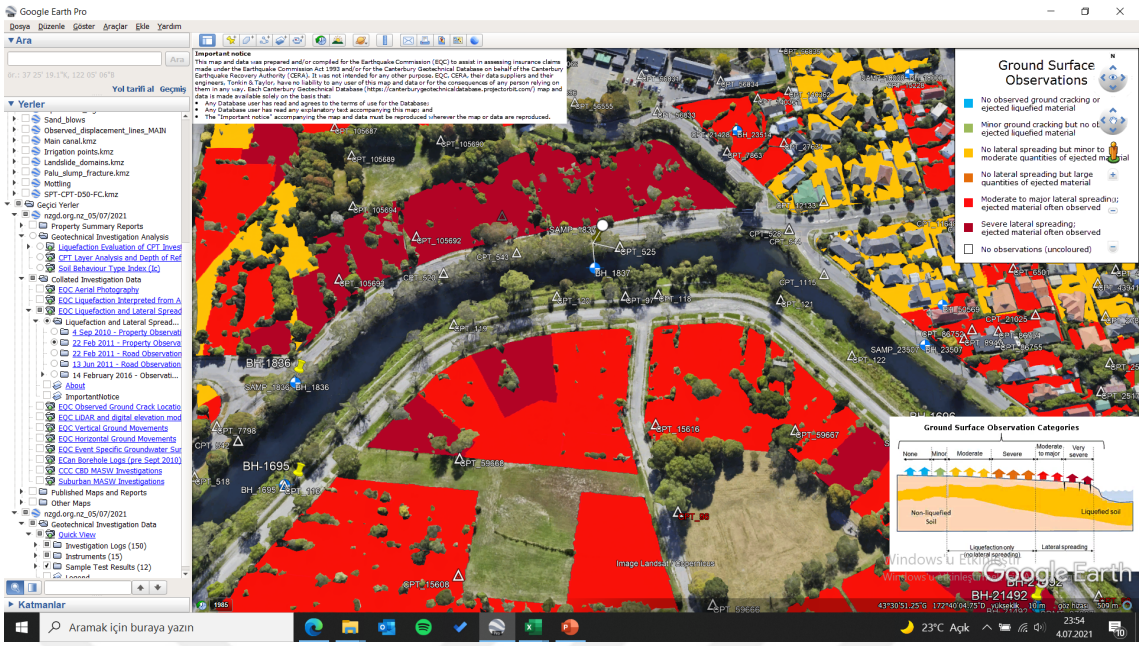
- Yüzey eğimi ve kanal serbest yüzey oranını bilgisine erişilebilen noktalar,
- Çevresinde yanal hareket miktarının LİDAR ile ölçülebildiği noktalar dikkate alınmıştır.

Şekil 4.4'de de görülebildiği gibi BH-1785 numaralı sondaj logunda Standart Penetrasyon Testi'nin yanında Koni Penetrasyon Testi ve laboratuvar deneyleri de gerçekleştirilmiştir.

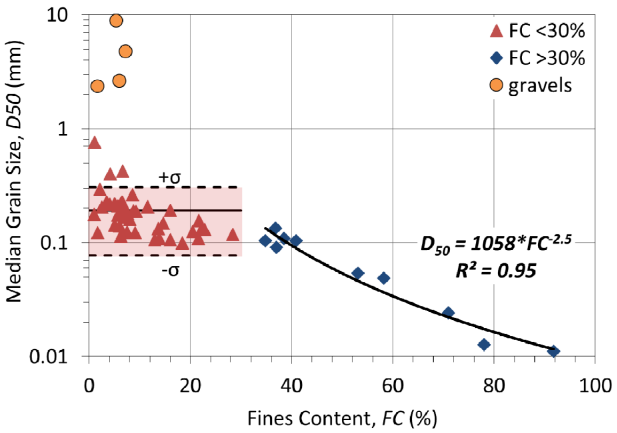
Yukarıda bahsi geçen koşulları sağlayan her bir nokta Google Earth programında işaretlenerek ayrıca dışarıya kmz uzantılı bir dosya halinde çıkartılmıştır.

Yeni Zelanda Geoteknik Veritabanı'ndan yukarıda bahsedilen içeriklerin alınmasına karşın veritabanında zeminlerin ince dane içerikleri bir sondaj logundaki her katmanda sıvılaşma analizi yapmaya yetecek kadar veri bulunmamaktadır. Bu nedenle sıvılaşma potansiyelinin hesaplanması sırasında ilgili zemin katmanı için ince dane içeriği bilgisi mevcutsa bu bilgi kullanmış, mevcut olmaması durumunda ise incelenen depremler sırasında sıvılaşmanın görüldüğü bölgelerden toplanan 1131 adet sondaj logu-laboratuvar test sonuçları incelenerek bölgedeki zemin tipleri için Tablo 4.2'deki verilere erişilmiştir.

Ortalama dane çapı bilgisi ise ince dane içeriğindeki eksik verilerde olduğu gibi bilginin sondaj logunda mevcut olması durumunda direkt olarak kullanılmış, mevcut olmadığı durumda ise Robinson (2016)'nın ince dane içeriğine (FC) bağlı olarak geliştirdiği eşitlikten faydalanılmıştır.



Şekil 4.4 BH-1837 numaralı sondaj logunda yapılan deneyler



Şekil 4.5 Christchurch zeminleri için D50 ve FC arasındaki ilişki

Şekil 4.5'te görülebileceği gibi Christchurch zeminleri için D_{50} ve FC arasında bir ilişki mevcuttur. Robinson (2016) ince dane içeriği 30'dan küçük zeminler için $D50_{15}$ değerinin ortalama 0,19 değerinin alınabileceğini, ince dane içeriğinin 30'dan büyük olduğu zeminlerde ise aşağıdaki eşitlikten faydalanılabileceğini bildirmiştir [85].

$$D_{50} = 1058 * FC^{-2,5} \tag{4.1}$$

Yeni Zelanda deprem sekansına ait yukarıda bahsi geçen bilgiler eşliğinde her bir noktanın sıvılaşma potansiyelinin hesaplanabilmesi için Şekil 4.6'te görülebilen Excel tablosu oluşturulmuştur. İlgili tabloya sondaj logundan elde edilen derinlik, SPT-N vuruş sayısı, zemin cinsi ve laboratuvar deneylerinden elde edilen ince dane içeriği ve ortalama dane çapı (D_{50}) bilgileri, depreme ait bilgiler (büyüklük, maksimum

yer ivmesi, sondaj logunun bulunduğu lokasyon bilgileri ve ölçülen yeraltı su seviyesinin girilmesi ile ilgili sondaj loguna ait tüm katmanların sıvılaşma potansiyeli değerlendirilmiştir.

Tablo 4.2 2010 Darfield ve 2011 Christchurch Depremlerinde sıvılaşan bölgelerden toplanan zeminlerin ince dane içerik bilgileri

Zemin Türü	**İnce Dane İçeriği**							
	Veri Adedi	**Ortalama**	**Standart Sapma**	**Minimum**	**Q1**	**Q2**	**Q3**	**Maksimum**
Kötü Derecelenmiş Çakıl (GP)	4	3.9	2.56	1.47	1.81	4.02	6.11	6.11
Kumlu Çakıl (GS)	2	1.59	0.44	1.28	1.44	1.59	1.75	1.9
İyi Derecelenmiş Çakıl (GS)	30	3.59	2.79	0.6	1.84	2.94	4.28	11.4
Düşük Plastisiteli Silt (ML)	330	75.63	20.98	2.01	67.08	79.83	92.91	99.68
Siltli Kum (SM)	71	27.28	14.08	3.55	20.34	28.23	38.08	53.73
Kötü Derecelenmiş Kum (SP)	490	6.79	3.82	0	3.94	6.47	8.91	18.3
İyi Derecelenmiş Kum (SW)	115	4.99	3.46	0.07	2.11	4.17	6.75	14.58

Sıvılaşma kaynaklı yanal yayılmaların tahmini için önemli bir rol oynayan yüzey eğimi ve serbest yüzey oranı ise Google Earth Pro ve Robinson (2016) yardımı ile elde edilmiştir. Yüzey eğimi, hareket vektörünün doğrultusunda Google Earth Pro programından yükseklik bilgisi alınarak elde edilmiştir. Serbest yüzey oranı ise Robinson (2016)'da yer alan detaylı kanal kesitleri incelenerek veri setine eklenmiştir.

Yukarıda özetlendiği gibi, Yeni Zelanda Geoteknik Veritabanından elde edilen veriler ile yapılan sıvılaşma analizlerinin sonucunda yapay sinir ağlarında kullanmak üzere Tablo 4.3'teki nihai veri seti oluşturulmuştur.

Bir sonraki bölümde bu veri seti yapay sinir ağları modelleri denenmiş olup olası en iyi model mimarisi araştırılmıştır.

5		Deprem	Darfield, 2010	Bölge	Burwood	Sondaj Logu	1716	R (km)	40	R0	44,8	Mw	7,1	amax (g)	0,42	CAV5		S (%)	3,4	W (%)	0	YASS (m)	0,8	Gözlem	0,3
Sub-Layer No	Soil Type	Depth	Sub-Layer Thickness (m)	FC	D50	SPT-N	γ	σ_{v0}	σ'_{v0}	α	β	CN	CE	N1,60	Δ (Boulanger & Idriss, 2014)	$(N1)_{60,cs}$ (Boulanger & Idriss, 2014)	Cσ	Kσ	MSF_{max}	MSF (Boulanger & Idriss, 2014)	$CRR_{M=7,5}$ (Boulanger & Idriss, 2014)	rd (Boulanger & Idriss, 2014)	CSR (Boulanger & Idriss, 2014)	Fs (Boulanger & Idriss, 2014)	Liq (Y/N)
1	SP	1,5	1,45	2,53	0,19	3	15,5	23,64	16,77	0,00	1,00	1,70	0,75	4	0	4	0,07	1,10	1,11	1,04	0,1	0,99	0,38	0,26	Y
2	SP	3	1,5	1,08	0,19	5	16,5	47,25	25,67	0,00	1,00	1,70	0,75	6	0	6	0,08	1,10	1,13	1,05	0,1	0,98	0,49	0,23	Y
3	SP	4,5	1,5	4,65	0,19	13	17,5	72,75	36,45	1,89	1,04	1,61	0,75	16	0	16	0,11	1,10	1,35	1,14	0,2	0,96	0,52	0,47	Y
4	SP-SW	6	1,5	3,36	0,19	12	17,5	99,00	47,99	1,55	1,03	1,41	0,75	13	0	13	0,10	1,10	1,26	1,10	0,1	0,93	0,53	0,37	Y
5	SW-SP	7,5	1,5	13,04	0,19	36	18,5	126,00	60,27	5,00	1,20	1,26	0,75	34	3	37	0,29	1,10	2,20	1,47	1,6	0,91	0,52	7,29	Y
6	SP	9	1,5	7,48	0,19	42	18,5	153,75	73,31	5,00	1,20	1,14	0,75	36	0	36	0,28	1,10	2,20	1,47	1,5	0,89	0,51	6,93	Y
7	SW	10,5	1,5	4,98	0,19	40	18,5	181,50	86,34	5,00	1,20	1,05	0,75	31	0	31	0,21	1,10	2,06	1,41	0,6	0,86	0,49	2,55	Y
8	SW	12	1,5	4,98	0,19	39	18,5	209,25	99,38	5,00	1,20	0,98	0,75	29	0	29	0,19	1,10	1,94	1,36	0,4	0,83	0,48	1,91	Y
9	SW	13,5	1,5	4,98	0,19	37	18,5	237,00	112,41	5,00	1,20	0,92	0,75	26	0	26	0,17	1,10	1,77	1,30	0,3	0,81	0,46	1,32	Y
10	SW	15	0,75	4,98	0,19	32	18,5	257,81	118,51	4,83	1,17	0,90	0,75	21	0	21	0,14	1,10	1,53	1,21	0,2	0,78	0,46	0,80	Y
11																									
12																									
13																									
14																									
15																									
16																									
17																									
18																									
19																									
20																									

Şekil 4.6 Sıvılaşma potansiyelinin değerlendirilmesi için oluşturulan tablo

Tablo 4.3 Yapay sinir ağları modelinde kullanılmak üzere derlenen nihai veri seti

Deprem	Sondaj Logu	Fay Tipi	M_w	PGA	PGV	PGV^2/PGA	lnIa	lnCAV5	R	R*	Log LSI	S	W	T_{15}	NT	FC_{15}	$D50_{15}$	z_{cr}	V_s	Gözlem	Referans
Alaska 1964	Alaska 1A	T	9,2	0,39	90,94	21,62		19,75	35	388,18	1,92	0,1	0	20	0	20,33	0,17	11,74	153	244	[49, 86]
Alaska 1964	Alaska 2	T	9,2	0,31	82,76	22,53		20,29	60	413,18	1,48	0,05	48,98	0	8,98	0	0	16,82	153	191	[49, 86]
Alaska 1964	Alaska 4	T	9,2	0,31	82,76	22,53		20,29	60	413,18	1,48	0,2	24,59	3,13	1,22	18,5	0,11	1,22	186	185	[49, 86]
Alaska 1964	Alaska 5L	T	9,2	0,39	90,94	21,62		19,75	35	388,18	1,92	0,1	0	20	0	24,17	0,2	13,34	186	244	[49, 86]
Alaska 1964	Alaska 6	T	9,2	0,31	82,76	22,53		20,29	60	413,18	1,48	0,2	24,59	4,5	3,13	11	3,66	3,13	186	185	[49, 86]
Alaska 1964	Alaska 8	T	9,2	0,31	82,76	22,53		20,29	60	413,18	1,48	0,1	16,07	6,49	4,42	26,67	1,23	4,42	186	157	[49, 86]
Alaska 1964	Alaska 10	T	9,2	0,31	82,76	22,53		20,29	60	413,18	1,48	0,1	16,07	1,52	2,75	14	0,69	10,83	186	157	[49, 86]
Alaska 1964	Alaska 14	T	9,2	0,31	82,76	22,53		20,29	60	413,18	1,48	0,1	16,07	0	0	0	0	3,05	186	157	[49, 86]
Alaska 1964	Alaska M-10	T	9,2	0,21	74,26	26,78		20,8	100	453,18	1,07	0,1	0	12,28	0	1,61	1,61	1,83	182	30	[49, 86]
Alaska 1964	Alaska M-12	T	9,2	0,21	74,26	26,78		20,8	100	453,18	1,07	0,05	0	4,34	0	3	1,82	1,52	182	30	[49, 86]
Alaska 1964	Alaska M-20	T	9,2	0,21	74,26	26,78		20,8	100	453,18	1,07	0,7	7,03	8,05	2,44	15,17	0,94	4,34	182	137	[49, 86]
Arjantin - San Juan 1977	San Juan 1	T	7,4	0,2	47,01	11,27	0,48	11,8	10	18,83	1,31	1	0	2	4,73	27,5	0,1	4,73	156	100	[41, 55, 86]
Arjantin - San Juan 1977	San Juan 1	T	7,4	0,2	47,01	11,27	0,48	11,8	10	18,83	1,31	1	0	3,02	5,8	20	0,14	12,19	154	100	[41, 55, 86]
Arjantin - San Juan 1977	San Juan 1	T	7,4	0,2	47,01	11,27	0,48	11,8	10	18,83	1,31	1	0	5,41	4,8	20	0,14	11	148	200	[41, 55, 86]
Arjantin - San Juan 1977	San Juan 6	T	7,4	0,2	47,01	11,27	0,48	11,8	10	18,83	1,31	1	0	5,41	4,8	20	0,14	7	141	100	[41, 55, 86]
Borah Peak 1983	WS 1	N	6,9	0,35	8,01	0,19	-3,68	12,03	78	81,17	-0,8	4	0	3,82	1,52	3,33	5,37	3,35	157	100	[41, 55, 86]
Borah Peak 1983	PR 2	N	6,9	0,6	32,39	1,78	-0,66	10,12	10	13,17	0,86	11	0	1,61	1,01	17,6	10,16	1,74	154	0	[41, 55, 86]
Borah Peak 1983	WS 3	N	6,9	0,6	32,39	1,78	-0,66	10,12	10	13,17	0,86	11	0	3,3	7,01	21,4	4,27	8,08	154	30	[41, 55, 86]
Borah Peak 1983	WS 4	N	6,9	0,6	32,39	1,78	-0,66	10,12	10	13,17	0,86	11	0	2,14	9,36	22,84	4,71	11,43	175	100	[41, 55, 86]
Chi Chi 1999	NT-BH-3	T	7,6	0,43	79,24	14,89	0,87	12,39	7,5	20,8	1,72	1	10	3	4	19	0,16	5,3	194	157	[41, 49]
Chi Chi 1999	NT-BH-4	T	7,6	0,43	79,24	14,89	0,87	12,39	7,5	20,8	1,72	1	10	2,8	5	34	1,59	5	194	157	[41, 49]
Chi Chi 1999	NT-BH-5	T	7,6	0,43	79,24	14,89	0,87	12,39	7,5	20,8	1,72	1	10	3,1	2,8	13,5	0,37	2,5	194	157	[41, 49]
Chi Chi 1999	NT-BH-6	T	7,6	0,43	79,24	14,89	0,87	12,39	7,5	20,8	1,72	1	10	0	1,6	0	0	1,6	194	157	[41, 49]
Chi Chi 1999	NT-BH-7	T	7,6	0,43	79,24	14,89	0,87	12,39	7,5	20,8	1,72	1	10	4,3	0,7	20	0,39	0,7	194	157	[41, 49]
Chi Chi 1999	NT-BH-12	T	7,6	0,43	79,24	14,89	0,87	12,39	7,5	20,8	1,72	1	10	1,75	4,65	35	0,12	4,65	194	157	[41, 49]
Chi Chi 1999	NT-BH-14	T	7,6	0,43	79,24	14,89	0,87	12,39	7,5	20,8	1,72	1	10	5	1,5	30	0,1	1,5	194	157	[41, 49]
Chi Chi 1999	WF-BH-3	T	7,6	0,79	139,98	25,29	1,33	11,95	1	14,3	3,35	1	10	1,7	1,3	22	0,14	1,3	186	16	[41, 49]
Chi Chi 1999	WF-BH-7	T	7,6	0,79	139,98	25,29	1,33	11,95	1	14,3	3,35	1	10	4,2	3,2	36,67	0,19	3,2	186	60	[41, 49]
Chi Chi 1999	WF-BH-10	T	7,6	0,79	139,98	25,29	1,33	11,95	1	14,3	3,35	1	10	1,6	1,4	22	0,13	4,8	186	96	[41, 49]
Chi Chi 1999	WF-BH-11	T	7,6	0,79	139,98	25,29	1,33	11,95	1	14,3	3,35	1	10	2,8	2,2	46,5	0,08	2,2	186	45	[41, 49]
Chi Chi 1999	WF-BH-12	T	7,6	0,79	139,98	25,29	1,33	11,95	1	14,3	3,35	1	10	1,5	8	40	0,1	8	186	100	[41, 49]
Chi Chi 1999	WF-BH-13	T	7,6	0,79	139,98	25,29	1,33	11,95	1	14,3	3,35	1	10	2,4	1	34	0,15	1	186	56	[41, 49]
Chi Chi 1999	YL-BH-18	T	7,6	0,19	36,91	7,31	0,87	12,39	7,5	20,8	1,72	1	10	4,2	2,7	40,67	0,09	2,7	152	296	[41, 49]
Chi Chi 1999	YL-BH-21	T	7,6	0,19	36,91	7,31	0,87	12,39	7,5	20,8	1,72	1	10	3,09	0,71	9	0,37	0,71	152	383	[41, 49]
Chi Chi 1999	YL-BH-25	T	7,6	0,19	36,91	7,31	0,87	12,39	7,5	20,8	1,72	1	10	3,4	11	13	0,03	11	152	221	[41, 49]
Chi Chi 1999	YL-BH-26	T	7,6	0,19	36,91	7,31	0,87	12,39	7,5	20,8	1,72	1	10	4,8	1,4	31	0,12	1,4	152	272	[41, 49]
Chi Chi 1999	YL-BH-28	T	7,6	0,19	36,91	7,31	0,87	12,39	7,5	20,8	1,72	1	10	7,3	4	25	0,27	4	152	158	[41, 49]
Chi Chi 1999	YL-BH-29	T	7,6	0,19	36,91	7,31	0,87	12,39	7,5	20,8	1,72	1	10	7,7	2	19,4	0,28	2	152	73	[41, 49]
Chi Chi 1999	YL-BH-30	T	7,6	0,19	36,91	7,31	0,87	12,39	7,5	20,8	1,72	1	10	3,9	3	15,67	0,26	3	152	97	[41, 49]
Chi Chi 1999	YL-BH-35	T	7,6	0,19	36,91	7,31	0,87	12,39	7,5	20,8	1,72	1	10	2,2	3,5	17	0,18	18,3	152	49	[41, 49]
Chi Chi 1999	YL-BH-43	T	7,6	0,19	36,91	7,31	0,87	12,39	7,5	20,8	1,72	1	10	3,8	9,5	17,67	0,32	16,2	152	248	[41, 49]

Table 4.3: Yapay sinir ağları modelinde kullanılmak üzere derlenen nihai veri seti (devamı)

Chi Chi 1999	YL-BH-44	T	7,6	0,19	36,91	7,31	0,87	12,39	7,5	20,8	1,72	1	10	3	2,6	21,5	0,24	2,6	152	147	[41, 49]
Chi Chi 1999	YL-BH-45	T	7,6	0,19	36,91	7,31	0,87	12,39	7,5	20,8	1,72	1	10	3,2	6,5	28	0,1	6,5	152	89	[41, 49]
Chi Chi 1999	YL-BH-46	T	7,6	0,19	36,91	7,31	0,87	12,39	7,5	20,8	1,72	1	10	7,9	1,6	28,25	0,09	8	152	99	[41, 49]
Chi Chi 1999	YL-BH-47	T	7,6	0,19	36,91	7,31	0,87	12,39	7,5	20,8	1,72	1	10	7,6	2,3	26,8	0,15	2,3	152	170	[41, 49]
Christchurch, 2011	1692	O	6,3	0,36	36,7	3,82	-0,44	7,2	7,5	8,43	0,55	0	4,7	5,25	2,25	13,45	0,19	12,75	196	50	[41, 72, 85, 87, 88]
Christchurch, 2011	1696	O	6,3	0,44	72,8	12,28	-0,58	7,31	9	9,93	0,41	0	5,8	3,15	0,6	26,13	0,13	2,25	201	95	[41, 72, 85, 87, 88]
Christchurch, 2011	1697	O	6,3	0,46	72,8	11,75	-0,58	7,31	9	9,93	0,41	0	5,3	3,5	3,15	4,83	0,19	42,375	201	46	[41, 72, 85, 87, 88]
Christchurch, 2011	1698	O	6,3	0,49	72,8	11,03	-0,58	7,31	9	9,93	0,41	0	6,7	3,55	5,39	7,59	0,19	7,9	201	77	[41, 72, 85, 87, 88]
Christchurch, 2011	1700	O	6,3	0,49	72,8	11,03	-0,58	7,31	9	9,93	0,41	2,8	2,9	2,75	1	6,8	0,19	2,25	201	40	[41, 72, 85, 87, 88]
Christchurch, 2011	1703	O	6,3	0,56	72,8	9,65	-0,58	7,31	9	9,93	0,41	0	9,5	2,7	2,4	15,24	0,19	2,4	189	46	[41, 72, 85, 87, 88]
Christchurch, 2011	1704	O	6,3	0,56	72,8	9,65	-0,55	7,29	8,7	9,63	0,43	0	17	3	2,25	42,36	0,22	3,75	189	54	[41, 72, 85, 87, 88]
Christchurch, 2011	1705	O	6,3	0,57	72,8	9,48	-0,55	7,29	8,7	9,63	0,43	0	13	1,25	1	31,85	0,42	1	189	36	[41, 72, 85, 87, 88]
Christchurch, 2011	1706	O	6,3	0,57	72,8	9,48	-0,55	7,29	8,7	9,63	0,43	2	0	6	0,5	6,4	0,24	5,25	189	64	[41, 72, 85, 87, 88]
Christchurch, 2011	1707	O	6,3	0,57	72,8	9,48	-0,55	7,29	8,7	9,63	0,43	1	0	11,9	2,25	7,92	0,19	12,8	189	80	[41, 72, 85, 87, 88]
Christchurch, 2011	1720	O	6,3	0,36	67,8	13,02	-0,47	7,22	7,8	8,73	0,52	0	2,2	3,45	0,3	3,91	0,19	0,3	201	37	[41, 72, 85, 87, 88]
Christchurch, 2011	1721	O	6,3	0,36	67,8	13,02	-0,47	7,22	7,8	8,73	0,52	0	6	11,2	1	10,7	0,19	6	201	48	[41, 72, 85, 87, 88]
Christchurch, 2011	1740	O	6,3	0,45	65,4	9,69	-0,58	7,31	9	9,93	0,41	0	1,5	6,25	2,25	55,92	0,19	3,75	155	26	[41, 72, 85, 87, 88]
Christchurch, 2011	1784	O	6,3	0,47	72,8	11,5	-0,58	7,31	9	9,93	0,41	0	4,8	2,25	3,75	8,39	0,19	6,375	196	13	[41, 72, 85, 87, 88]
Christchurch, 2011	1785	O	6,3	0,48	72,8	11,26	-0,58	7,31	9	9,93	0,41	0	1,3	5,1	0,3	16,46	0,18	3	196	50	[41, 72, 85, 87, 88]
Christchurch, 2011	1787	O	6,3	0,5	72,8	10,81	-0,58	7,31	9	9,93	0,41	0	7,8	3	2,25	6,75	0,19	3,75	196	70	[41, 72, 85, 87, 88]
Christchurch, 2011	1788	O	6,3	0,48	72,8	11,26	-0,58	7,31	9	9,93	0,41	0	6,2	1,2	3	3,73	0,19	7,8	196	40	[41, 72, 85, 87, 88]
Christchurch, 2011	1789	O	6,3	0,45	72,8	12,01	-0,58	7,31	9	9,93	0,41	0	12,86	6	3	5,36	0,23	4,2	201	64	[41, 72, 85, 87, 88]
Christchurch, 2011	1790	O	6,3	0,44	72,8	12,28	-0,58	7,31	9	9,93	0,41	0	9,3	7,5	2,25	9,09	0,19	6,75	201	100	[41, 72, 85, 87, 88]
Christchurch, 2011	1791	O	6,3	0,4	72,8	13,51	-0,51	7,25	8,2	9,13	0,48	0	10,2	2,4	3	13,53	0,19	5,4	201	60	[41, 72, 85, 87, 88]
Christchurch, 2011	1792	O	6,3	0,39	72,8	13,86	-0,51	7,25	8,2	9,13	0,48	0,67	2,12	11,15	0,1	7,36	0,23	0,1	201	25	[41, 72, 85, 87, 88]
Christchurch, 2011	1835	O	6,3	0,45	72,8	12,01	-0,51	7,25	8,2	9,13	0,48	0	5,2	4	3,2	7,13	0,31	13,8	201	100	[41, 72, 85, 87, 88]
Christchurch, 2011	1836	O	6,3	0,42	72,8	12,87	-0,51	7,25	8,2	9,13	0,48	0	4,9	1,13	2,93	8,5	0,19	79,375	201	88	[41, 72, 85, 87, 88]
Christchurch, 2011	1837	O	6,3	0,42	72,8	12,87	-0,51	7,25	8,2	9,13	0,48	0	5,1	2,45	1,8	21,96	0,14	2,875	201	38	[41, 72, 85, 87, 88]
Christchurch, 2011	1838	O	6,3	0,46	65,4	9,48	-0,46	7,21	7,7	8,63	0,53	2,7	9,2	8,5	2,25	2,17	0,19	5,375	155	38	[41, 72, 85, 87, 88]
Christchurch, 2011	1840	O	6,3	0,47	65,4	9,28	-0,36	7,13	6,7	7,63	0,64	0	7,2	14,5	1	9,29	0,19	1	155	64	[41, 72, 85, 87, 88]
Christchurch, 2011	1841	O	6,3	0,47	65,4	9,28	-0,36	7,13	6,7	7,63	0,64	2,5	6,25	7,25	1	4,2	0,19	8,2	155	65	[41, 72, 85, 87, 88]
Christchurch, 2011	1876	O	6,3	0,49	72,8	11,03	-0,58	7,31	9	9,93	0,41	2,5	7,75	4,5	3,75	1,74	0,19	5,25	196	70	[41, 72, 85, 87, 88]
Christchurch, 2011	1877	O	6,3	0,49	72,8	11,03	-0,41	7,17	7,2	8,13	0,59	1,7	4	11,5	5,25	8,4	0,19	9,75	196	43	[41, 72, 85, 87, 88]
Christchurch, 2011	1879	O	6,3	0,44	72,8	12,28	-0,41	7,17	7,2	8,13	0,59	0	8,3	8,7	0,3	18,2	0,17	4,2	196	75	[41, 72, 85, 87, 88]
Christchurch, 2011	1880	O	6,3	0,42	36,7	3,27	-0,47	7,22	7,8	8,73	0,52	0	8,7	5,25	2,25	8,77	0,19	2,25	196	40	[41, 72, 85, 87, 88]
Christchurch, 2011	4309	O	6,3	0,63	72,8	8,58	-0,55	7,29	8,7	9,63	0,43	0	4,6	3,05	0,7	8,47	0,24	0,7	189	45	[41, 72, 85, 87, 88]
Christchurch, 2011	4478	O	6,3	0,63	72,8	8,58	-0,55	7,29	8,7	9,63	0,43	0	0,87	7,55	0,7	2,57	0,19	0,7	189	36	[41, 72, 85, 87, 88]
Christchurch, 2011	4487	O	6,3	0,63	72,8	8,58	-0,55	7,29	8,7	9,63	0,43	0	2,2	3	0,7	5,99	0,29	8,25	189	0,4	[41, 72, 85, 87, 88]
Christchurch, 2011	4931	O	6,3	0,62	72,8	8,72	-0,55	7,29	8,7	9,63	0,43	0	1,7	3	1,25	5,11	0,19	2,75	189	55	[41, 72, 85, 87, 88]
Christchurch, 2011	5987	O	6,3	0,61	72,8	8,86	-0,55	7,29	8,7	9,63	0,43	0	15	6,35	0,4	5,25	0,19	2,25	189	100	[41, 72, 85, 87, 88]
Christchurch, 2011	8589	O	6,3	0,49	72,8	11,03	-0,58	7,31	9	9,93	0,41	0	0,7	5,25	3,75	6,36	0,19	8,25	201	30	[41, 72, 85, 87, 88]
Christchurch, 2011	8590	O	6,3	0,49	72,8	11,03	-0,58	7,31	9	9,93	0,41	1	0	1,5	7,25	6,8	0,19	13,25	201	10	[41, 72, 85, 87, 88]
Christchurch, 2011	13672	O	6,3	0,44	72,8	12,28	-0,39	7,16	7	7,93	0,61	0	2,1	14,5	2,25	4,87	0,19	6,825	196	36	[41, 72, 85, 87, 88]

Table 4.3: Yapay sinir ağları modelinde kullanılmak üzere derlenen nihai veri seti (devamı)

Christchurch, 2011	15471	O	6,3	0,48	72,8	11,26	-0,39	7,16	7	7,93	0,61	1	0	3,75	3,75	9,52	0,27	9,75	196	25	[41, 72, 85, 87, 88]
Christchurch, 2011	15603	O	6,3	0,46	72,8	11,75	-0,39	7,16	7	7,93	0,61	0	0,78	3	5,35	4,67	0,19	6,85	196	8	[41, 72, 85, 87, 88]
Christchurch, 2011	15604	O	6,3	0,44	72,8	12,28	-0,58	7,31	9	9,93	0,41	0	1,04	5,2	0,8	10,43	0,19	6,75	201	54	[41, 72, 85, 87, 88]
Christchurch, 2011	15692	O	6,3	0,47	72,8	11,5	-0,58	7,31	9	9,93	0,41	0	1,7	5,05	1	31,04	0,21	3,825	196	20	[41, 72, 85, 87, 88]
Christchurch, 2011	17407	O	6,3	0,43	67,8	10,9	-0,43	7,19	7,4	8,33	0,56	0	1,67	0,75	6,75	3,93	0,19	8,625	201	27	[41, 72, 85, 87, 88]
Christchurch, 2011	17997	O	6,3	0,45	67,8	10,42	-0,43	7,19	7,4	8,33	0,56	0	3,13	6	3,75	8,11	0,19	9,75	201	30	[41, 72, 85, 87, 88]
Christchurch, 2011	20946	O	6,3	0,44	67,8	10,65	-0,43	7,19	7,4	8,33	0,56	0	3,05	0,8	2,23	15,21	0,56	9,9	201	50	[41, 72, 85, 87, 88]
Christchurch, 2011	21857	O	6,3	0,32	36,7	4,29	-0,43	7,19	7,4	8,33	0,56	0	1,46	2,05	0,2	3,59	0,19	0,2	196	106	[41, 72, 85, 87, 88]
Christchurch, 2011	21867	O	6,3	0,45	72,8	12,01	-0,51	7,25	8,2	9,13	0,48	0	5,6	1,2	6,85	15,45	0,19	8,5	201	53	[41, 72, 85, 87, 88]
Christchurch, 2011	21869	O	6,3	0,45	72,8	12,01	-0,51	7,25	8,2	9,13	0,48	1,4	3,1	6,1	2,23	12,78	0,21	8,325	201	46	[41, 72, 85, 87, 88]
Christchurch, 2011	23512	O	6,3	0,46	72,8	11,75	-0,51	7,25	8,2	9,13	0,48	0	3,6	1,55	3,83	10,27	0,34	3,825	201	52	[41, 72, 85, 87, 88]
Darfield, 2010	1692	DA	7,1	0,18	39,3	8,75	-0,3	10,46	10	14,78	1,04	0	0,5	7,18	0,32	12,56	0,19	17,25	196	53	[41, 72, 85, 87, 88]
Darfield, 2010	1696	DA	7,1	0,2	44,9	10,28	-2,25	11,73	41	45,78	-0,1	0	0,07	2,6	1,15	22,24	0,14	2,25	196	110	[41, 72, 85, 87, 88]
Darfield, 2010	1704	DA	7,1	0,18	44,9	11,42	-2,21	11,7	40	44,78	-0,08	0,13	0,13	3	3,75	32,97	0,13	5,25	196	30	[41, 72, 85, 87, 88]
Darfield, 2010	1707	DA	7,1	0,19	44,9	10,82	-2,41	11,82	45	49,78	-0,17	0	0	10,5	3,75	6,96	0,19	12,75	196	40	[41, 72, 85, 87, 88]
Darfield, 2010	1716	DA	7,1	0,42	43	4,49	-2,37	11,8	44	48,78	-0,16	3,4	0	4,45	0,8	2,32	0,19	2,25	201	30	[41, 72, 85, 87, 88]
Darfield, 2010	1718	DA	7,1	0,18	43	10,47	-2,37	11,8	44	48,78	-0,16	0	3	10,45	0,8	4,49	0,19	3,75	201	90	[41, 72, 85, 87, 88]
Darfield, 2010	1719	DA	7,1	0,18	43	10,47	-2,37	11,8	44	48,78	-0,16	0	0,8	6	3	19,99	0,16	9	201	75	[41, 72, 85, 87, 88]
Darfield, 2010	1785	DA	7,1	0,2	43	9,43	-2,37	11,8	44	48,78	-0,16	1,1	10,1	6,3	0,3	17,66	0,21	1,8	201	70	[41, 72, 85, 87, 88]
Darfield, 2010	1786	DA	7,1	0,2	43	9,43	-2,37	11,8	44	48,78	-0,16	0	18	2,4	1,8	20,49	0,16	3	201	20	[41, 72, 85, 87, 88]
Darfield, 2010	1787	DA	7,1	0,2	43	9,43	-2,37	11,8	44	48,78	-0,16	0	19	1,5	3,75	4,71	0,19	3,75	201	125	[41, 72, 85, 87, 88]
Darfield, 2010	1791	DA	7,1	0,18	43	10,47	-2,37	11,8	44	48,78	-0,16	0	33	1,2	5,4	35,84	0,14	5,4	201	33	[41, 72, 85, 87, 88]
Darfield, 2010	1792	DA	7,1	0,19	43	9,92	-2,37	11,8	44	48,78	-0,16	6,2	0,8	12,05	0,2	7,3	0,23	0,2	201	40	[41, 72, 85, 87, 88]
Darfield, 2010	1805	DA	7,1	0,2	35,7	6,5	-2,25	11,73	41	45,78	-0,1	0,4	0,96	7,25	0,55	2,99	0,19	1,8	257	90	[41, 72, 85, 87, 88]
Darfield, 2010	1808	DA	7,1	0,21	35,7	6,19	-2,25	11,73	41	45,78	-0,1	0,9	6,4	4,5	2,25	6,98	0,19	3,75	257	135	[41, 72, 85, 87, 88]
Darfield, 2010	1812	DA	7,1	0,23	35,7	5,65	-2,25	11,73	41	45,78	-0,1	0,1	0	5,7	0,9	11,33	0,19	1,8	257	64	[41, 72, 85, 87, 88]
Darfield, 2010	1816	DA	7,1	0,2	35,7	6,5	-2,25	11,73	41	45,78	-0,1	0	0,5	5,45	1,3	38,94	0,1	11,25	257	180	[41, 72, 85, 87, 88]
Darfield, 2010	1818	DA	7,1	0,2	35,7	6,5	-2,25	11,73	41	45,78	-0,1	0	0,35	4,75	0,5	27,72	0,15	0,5	257	170	[41, 72, 85, 87, 88]
Darfield, 2010	1819	DA	7,1	0,2	35,7	6,5	-2,25	11,73	41	45,78	-0,1	0	0,6	6	2,25	6,75	0,19	2,25	257	95	[41, 72, 85, 87, 88]
Darfield, 2010	15050	DA	7,1	0,2	44,9	10,28	-2,33	11,77	43	47,78	-0,14	0,1	0	1,5	3,75	6,8	0,19	3,75	196	16	[41, 72, 85, 87, 88]
Darfield, 2010	1876	DA	7,1	0,2	44,9	10,28	-2,33	11,77	43	47,78	-0,14	0	6	4,5	3,75	1,74	0,19	5,25	196	64	[41, 72, 85, 87, 88]
Darfield, 2010	10391	DA	7,1	0,2	36,2	6,68	-2,23	11,72	40,5	45,28	-0,09	1	0	7,8	6	6,11	0,19	11,25	197	46	[41, 72, 85, 87, 88]
Darfield, 2010	15050	DA	7,1	0,2	44,9	10,28	-2,33	11,77	43	47,78	-0,14	0,7	0	3,75	5,25	5,94	0,19	19,125	196	15	[41, 72, 85, 87, 88]
Darfield, 2010	15643	DA	7,1	0,17	35,7	7,64	-2,25	11,73	41	45,78	-0,1	0	0,5	3	3,75	8,54	0,19	5,25	257	70	[41, 72, 85, 87, 88]
Darfield, 2010	15644	DA	7,1	0,17	35,7	7,64	-2,25	11,73	41	45,78	-0,1	0	1,25	3,63	0,12	18,01	0,27	0,12	257	36	[41, 72, 85, 87, 88]
Darfield, 2010	15710	DA	7,1	0,22	35,7	5,91	-2,25	11,73	41	45,78	-0,1	0,4	1	1,65	0,6	41,15	0,1	0,6	257	136	[41, 72, 85, 87, 88]
Darfield, 2010	16801	DA	7,1	0,23	35,7	5,65	-2,25	11,73	41	45,78	-0,1	0,1	0	2,25	3,75	33,47	0,17	3,75	257	43	[41, 72, 85, 87, 88]
Darfield, 2010	16806	DA	7,1	0,17	35,7	7,64	-2,25	11,73	41	45,78	-0,1	1	0	3,6	0,15	25,7	0,31	0,15	257	100	[41, 72, 85, 87, 88]
Darfield, 2010	21492	DA	7,1	0,21	44,9	9,79	-2,33	11,77	43	47,78	-0,14	0	2,7	4,5	2,25	7,48	0,19	3,75	196	160	[41, 72, 85, 87, 88]
Darfield, 2010	21858	DA	7,1	0,22	35,7	5,91	-2,25	11,73	41	45,78	-0,1	0	0,4	2	1,5	12,18	0,19	1,5	257	84	[41, 72, 85, 87, 88]
Darfield, 2010	21861	DA	7,1	0,2	35,7	6,5	-2,25	11,73	41	45,78	-0,1	0	0,3	3,1	2,23	7,92	0,19	2,225	257	86	[41, 72, 85, 87, 88]
Darfield, 2010	21862	DA	7,1	0,2	35,7	6,5	-2,25	11,73	41	45,78	-0,1	0	0,4	1,7	0,8	4,54	0,19	4,5	257	90	[41, 72, 85, 87, 88]
Darfield, 2010	44714	DA	7,1	0,18	35,7	7,22	-2,25	11,73	41	45,78	-0,1	0	1,64	4,5	2,25	11,77	0,25	2,25	257	58	[41, 72, 85, 87, 88]

Table 4.3: Yapay sinir ağları modelinde kullanılmak üzere derlenen nihai veri seti (devamı)

Fukui 1948	KR1	O	7,3	0,4	35,21	3,16	-0,15	11,79	16	23,19	0,84	2	1,35	0	6,2	0	0	6,2	189	59	[41, 49, 86]
Fukui 1948	KR2	O	7,3	0,4	35,21	3,16	-0,15	11,79	16	23,19	0,84	2	1,46	3,4	2,9	13,75	0,28	2,9	189	389	[41, 49, 86]
Fukui 1948	KR3	O	7,3	0,4	35,21	3,16	-0,15	11,79	16	23,19	0,84	2	1,6	3,1	3,5	4,33	0,42	7,5	189	193	[41, 49, 86]
Fukui 1948	KR6	O	7,3	0,4	34,1	2,96	-0,23	11,85	17	24,19	0,79	2	1,72	6,2	8,6	5	0,35	8,6	189	98	[41, 49, 86]
Fukui 1948	KR7	O	7,3	0,4	34,1	2,96	-0,23	11,85	17	24,19	0,79	2	1,23	6,2	3,5	5	0,35	6	189	95	[41, 49, 86]
Fukui 1948	KR8	O	7,3	0,4	34,1	2,96	-0,23	11,85	17	24,19	0,79	2	10,21	0	14,4	0	0	17	189	68	[41, 49, 86]
Fukui 1948	KR9	O	7,3	0,4	34,1	2,96	-0,23	11,85	17	24,19	0,79	2	19,81	5,5	2,2	4,83	0,37	16,5	189	63	[41, 49, 86]
Guatemala 1976	LP 1	O	7,5	0,12	50,15	21,37	0,56	12,19	10	20,84	1,4	3,5	1,03	6,71	4,4	10	1	14,86	167	0	[41, 49, 86]
Guatemala 1976	LP 2	O	7,5	0,12	50,15	21,37	0,56	12,19	10	20,84	1,4	5,24	0,78	1,52	6,73	10	1	15,32	150	0	[41, 49, 86]
Guatemala 1976	LP 3	O	7,5	0,12	50,15	21,37	0,56	12,19	10	20,84	1,4	5,24	0,76	3,05	13,5	10	1	15,01	167	0	[41, 49, 86]
Hokkaida Nansei Oki 1993	B-1	O	7,8	0,7	59,78	5,21		13,36	10	30,04	1,67	0	0	6,4	2,5	0	0,68	2,5	134	66,5	[41, 49, 86]
Hokkaida Nansei Oki 1993	B-2	O	7,8	0,7	59,78	5,21		13,36	10	30,04	1,67	0	0	3,9	2,2	0	1,79	3	134	57	[41, 49, 86]
Hokkaida Nansei Oki 1993	B-3	O	7,8	0,7	59,78	5,21		13,36	10	30,04	1,67	0	0	4,1	2,3	0	0,43	4,5	134	99,65	[41, 49, 86]
Hokkaida Nansei Oki 1993	B-Existing	O	7,8	0,7	59,78	5,21		13,36	10	30,04	1,67	0	0	8,6	1,4	0	0,37	1,4	134	71,58	[41, 49, 86]
Hokkaida Nansei Oki 1993	B-4	O	7,8	0,7	59,78	5,21		13,36	10	30,04	1,67	0	0	4,1	2,1	0	0,38	2,1	134	130,58	[41, 49, 86]
Hyogoken Nanbu 1995	AI1	O	6,9	0,6	40	2,72	0,02	9,82	10	13,17	0,86	0,1	0	1	2,5	20	1	13	189	40	[41, 49, 89]
Hyogoken Nanbu 1995	CK1	O	6,9	0,35	40	4,66	0,02	9,82	10	13,17	0,86	0	5,16	3	14	20	1	14	188	20	[41, 49, 89]
Hyogoken Nanbu 1995	LP1	O	6,9	0,54	70	9,25	0,44	9,47	5,5	8,67	1,34	0	14,34	16,5	3,5	12,38	1,3	3,5	152	130	[41, 49, 89]
Hyogoken Nanbu 1995	LP2	O	6,9	0,54	70	9,25	0,44	9,47	5,5	8,67	1,34	0	14,56	16,5	3,5	12,38	1,3	3,5	152	133	[41, 49, 89]
Hyogoken Nanbu 1995	LP3	O	6,9	0,54	70	9,25	0,44	9,47	5,5	8,67	1,34	0	9,79	16,5	3,5	12,38	1,3	3,5	152	146	[41, 49, 89]
Hyogoken Nanbu 1995	LP4	O	6,9	0,54	70	9,25	0,44	9,47	5,5	8,67	1,34	0	56,82	16,5	3,5	12,38	1,3	3,5	152	247	[41, 49, 89]
Hyogoken Nanbu 1995	LP5	O	6,9	0,54	70	9,25	0,44	9,47	5,5	8,67	1,34	0	30,2	16,5	3,5	12,38	1,3	3,5	152	282	[41, 49, 89]
Hyogoken Nanbu 1995	PI1	O	6,9	0,54	65	7,98	0,35	9,55	6,5	9,67	1,21	0	5,16	13	2,6	9,57	1,59	13	157	33	[41, 49, 89]
Hyogoken Nanbu 1995	PI2	O	6,9	0,54	65	7,98	0,35	9,55	6,5	9,67	1,21	0	9,84	13	2,6	9,57	1,59	13	157	102	[41, 49, 89]
Hyogoken Nanbu 1995	PI3	O	6,9	0,54	65	7,98	0,35	9,55	6,5	9,67	1,21	0	14,63	13	2,6	9,57	1,59	13	157	157	[41, 49, 89]
Hyogoken Nanbu 1995	PI4	O	6,9	0,54	60	6,8	0,4	9,51	6	9,17	1,27	0	9,25	13,5	3,5	13,27	0,94	3,5	164	100	[41, 49, 89]
Hyogoken Nanbu 1995	PI5	O	6,9	0,54	60	6,8	0,4	9,51	6	9,17	1,27	0	15	13,5	3,5	13,27	0,94	3,5	164	147	[41, 49, 89]
Hyogoken Nanbu 1995	PI6	O	6,9	0,54	55	5,71	0,26	9,63	7,5	10,67	1,09	0	10,4	11,5	3,5	9,27	0,55	11,5	176	88	[41, 49, 89]
Hyogoken Nanbu 1995	PI7	O	6,9	0,54	55	5,71	0,26	9,63	7,5	10,67	1,09	0	13,95	11,5	3,5	9,27	0,55	11,5	176	117	[41, 49, 89]
Hyogoken Nanbu 1995	PI8	O	6,9	0,54	55	5,71	0,26	9,63	7,5	10,67	1,09	0	18,56	11,5	3,5	9,27	0,55	11,5	176	132	[41, 49, 89]
Hyogoken Nanbu 1995	RI1	O	6,9	0,54	50	4,72	0,21	9,67	8	11,17	1,04	0	20,69	14,4	2,6	14,83	2,32	3,5	155	89	[41, 49, 89]
Hyogoken Nanbu 1995	RI2	O	6,9	0,54	50	4,72	0,21	9,67	8	11,17	1,04	0	8,45	14,4	2,6	14,83	2,32	3,5	155	40	[41, 49, 89]
Hyogoken Nanbu 1995	RI3	O	6,9	0,54	50	4,72	0,21	9,67	8	11,17	1,04	0	16,82	14,4	2,6	14,83	2,32	3,5	155	92	[41, 49, 89]
Hyogoken Nanbu 1995	RI4	O	6,9	0,54	50	4,72	0,21	9,67	8	11,17	1,04	0	14,63	14,4	2,6	14,83	2,32	3,5	155	65	[41, 49, 89]
Hyogoken Nanbu 1995	RI5	O	6,9	0,54	50	4,72	0,21	9,67	8	11,17	1,04	0	6,67	14,4	2,6	14,83	2,32	3,5	155	44	[41, 49, 89]
Hyogoken Nanbu 1995	RI6	O	6,9	0,54	50	4,72	0,21	9,67	8	11,17	1,04	0	18	14,4	2,6	14,83	2,32	3,5	155	96	[41, 49, 89]
Imperial Valley 1979		DA	6,5	0,51	22,67	1,03	-1,61	8,04	10	11,4	0,5	2	4,69	2,83	1,62	26	0,1	3,4	185	86	[55, 86, 89, 90]
Imperial Valley 1979		DA	6,5	0,51	22,67	1,03	-1,61	8,04	10	11,4	0,5	1,64	4,8	2,83	1,62	26	0,1	3,4	185	66	[55, 86, 89, 90]
Imperial Valley 1979		DA	6,5	0,51	22,67	1,03	-1,61	8,04	10	11,4	0,5	1,67	6,67	2,83	1,62	26	0,1	3,4	185	112	[55, 86, 89, 90]
Imperial Valley 1979		DA	6,5	0,51	22,67	1,03	-1,61	8,04	10	11,4	0,5	1,79	6,15	2,83	1,62	26	0,1	3,4	185	109	[55, 86, 89, 90]
Imperial Valley 1979		DA	6,5	0,51	22,67	1,03	-1,61	8,04	10	11,4	0,5	1,82	7,89	2,83	1,62	26	0,1	3,4	185	203	[55, 86, 89, 90]
Imperial Valley 1979		DA	6,5	0,51	22,67	1,03	-1,61	8,04	10	11,4	0,5	2,13	3,52	2,83	1,62	26	0,1	3,4	185	46	[55, 86, 89, 90]
Imperial Valley 1979		DA	6,5	0,51	22,67	1,03	-1,61	8,04	10	11,4	0,5	2,04	3,68	2,83	1,62	26	0,1	3,4	185	46	[55, 86, 89, 90]

Table 4.3: Yapay sinir ağları modelinde kullanılmak üzere derlenen nihai veri seti (devamı)

Imperial Valley 1979		DA	6,5	0,51	22,67	1,03	-1,61	8,04	10	11,4	0,5	1,96	6,35	2,83	1,62	26	0,1	3,4	185	140	[55, 86, 89, 90]
Imperial Valley 1979		DA	6,5	0,51	22,67	1,03	-1,61	8,04	10	11,4	0,5	1,85	8,05	2,83	1,62	26	0,1	3,4	185	211	[55, 86, 89, 90]
Imperial Valley 1979		DA	6,5	0,51	22,67	1,03	-1,61	8,04	10	11,4	0,5	1,69	6,45	2,83	1,62	26	0,1	3,4	185	152	[55, 86, 89, 90]
Imperial Valley 1979		DA	6,5	0,51	22,67	1,03	-1,61	8,04	10	11,4	0,5	1,41	8,57	2,83	1,62	26	0,1	3,4	185	262	[55, 86, 89, 90]
Imperial Valley 1979		DA	6,5	0,51	22,67	1,03	-1,61	8,04	10	11,4	0,5	1,3	6,15	3,97	1,52	14	0,12	3,05	125	150	[55, 86, 89, 90]
Imperial Valley 1979		DA	6,5	0,51	22,67	1,03	-1,61	8,04	10	11,4	0,5	1,43	9,16	3,97	1,52	14	0,12	3,05	125	381	[55, 86, 89, 90]
Imperial Valley 1979		DA	6,5	0,51	22,67	1,03	-1,61	8,04	10	11,4	0,5	2,17	9,6	3,97	1,52	14	0,12	3,05	125	399	[55, 86, 89, 90]
Imperial Valley 1979		DA	6,5	0,51	22,67	1,03	-1,61	8,04	10	11,4	0,5	1,85	6,78	3,97	1,52	14	0,12	3,05	125	229	[55, 86, 89, 90]
Imperial Valley 1979		DA	6,5	0,51	22,67	1,03	-1,61	8,04	10	11,4	0,5	2,7	9,38	3,97	1,52	14	0,12	3,05	125	424	[55, 86, 89, 90]
Imperial Valley 1979		DA	6,5	0,51	22,67	1,03	-1,61	8,04	10	11,4	0,5	2,44	6,56	3,97	1,52	14	0,12	3,05	125	201	[55, 86, 89, 90]
Imperial Valley 1979		DA	6,5	0,51	22,67	1,03	-1,61	8,04	10	11,4	0,5	5,26	6,56	3,97	1,52	14	0,12	3,05	125	147	[55, 86, 89, 90]
Imperial Valley 1979		DA	6,5	0,51	22,67	1,03	-1,61	8,04	10	11,4	0,5	4,17	8,05	2,58	1,52	31,65	0,08	4,2	177	2	[55, 86, 89, 90]
Imperial Valley 1979		DA	6,5	0,51	22,67	1,03	-1,61	8,04	10	11,4	0,5	5,26	6,78	4,62	1,52	14	0,12	3,05	149	71	[55, 86, 89, 90]
Imperial Valley 1979		DA	6,5	0,51	22,67	1,03	-1,61	8,04	10	11,4	0,5	4,35	9,84	4,62	1,52	14	0,12	3,05	149	262	[55, 86, 89, 90]
Imperial Valley 1979		DA	6,5	0,51	22,67	1,03	-1,61	8,04	10	11,4	0,5	5	7,02	4,62	1,52	14	0,12	3,05	149	142	[55, 86, 89, 90]
Imperial Valley 1979	71	DA	6,5	0,51	22,67	1,03	-1,61	8,04	10	11,4	0,5	2,78	10,08	4,62	1,52	14	0,12	3,05	149	320	[55, 86, 89, 90]
Imperial Valley 1979	260	DA	6,5	0,21	22,67	2,5	-1,61	8,04	10	11,4	0,5	0,56	0	1,15	1,85	19,13	0,12	5	188	0	[55, 86, 89, 90]
Imperial Valley 1979	261	DA	6,5	0,21	22,67	2,5	-1,61	8,04	10	11,4	0,5	0,56	10,66	2	0	35	0,17	1,6	156	0	[55, 86, 89, 90]
Kanto 1923	K-11	T	7,9	0,2	22,14	2,5		15,9	100	124,6	-0,1	0,7	0	2,83	2	25	0,1	4,03		150	[49, 86]
Kanto 1923	K-2	T	7,9	0,25	25,06	2,56		15,68	80	104,6	0,08	0,7	0	10,08	0,9	8	0,3	12,73		300	[49, 86]
Kanto 1923	K-3	T	7,9	0,25	25,06	2,56		15,68	80	104,6	0,08	0,7	0	6	1,73	8	0,3	12,73		300	[49, 86]
Kanto 1923	K-4	T	7,9	0,25	25,06	2,56		15,68	80	104,6	0,08	0,7	0	3,33	1,4	8	0,3	3,73		300	[49, 86]
Kanto 1923	K-5	T	7,9	0,25	25,06	2,56		15,68	80	104,6	0,08	0,7	0	6,33	1,4	8	0,3	9,73		300	[49, 86]
Kanto 1923	K-6	T	7,9	0,25	25,06	2,56		15,68	80	104,6	0,08	0,7	0	7,13	1,6	8	0,3	4,73		300	[49, 86]
Kanto 1923	K-7	T	7,9	0,25	25,06	2,56		15,68	80	104,6	0,08	0,4	0	4,23	0,5	5,33	0,28	10,73		300	[49, 86]
Kanto 1923	K-8	T	7,9	0,25	25,06	2,56		15,68	80	104,6	0,08	0,4	0	2,93	0,8	11,67	0,28	0,8		300	[49, 86]
Kanto 1923	K-9	T	7,9	0,25	25,06	2,56		15,68	80	104,6	0,08	0,4	0	7,93	0,8	44,75	0,3	4,73		300	[49, 86]
Kanto 1923	K-10	T	7,9	0,25	25,06	2,56		15,68	80	104,6	0,08	0,4	0	6	2,73	50	0,3	6,73		300	[49, 86]
Kanto 1923	K-12	T	7,9	0,2	22,14	2,5		15,9	100	124,6	-0,1	0,7	0	3,73	1	7,2	0,25	1		150	[49, 86]
Kanto 1923	K-13	T	7,9	0,2	22,14	2,5		15,9	100	124,6	-0,1	0,7	0	2,4	1,63	3	0,15	4,03		150	[49, 86]
Kocaeli 1999	SH-4	DA	7,4	0,41	57,3	8,17	-1,44	12,58	29,1	37,93	0,45	4	0	7,25	0,5	6,02	5,15	1,39		130	[20, 41, 91]
Kocaeli 1999	SH-7	DA	7,4	0,41	57,3	8,17	-1,44	12,58	29,1	37,93	0,45	2	0	12,6	1,25	8,12	0,25	11		70	[20, 41, 91]
Kocaeli 1999	SH-9	DA	7,4	0,41	57,3	8,17	-1,44	12,58	29,1	37,93	0,45	2	0	0,98	2,57	16	1,9	11,64		20	[20, 41, 91]
Kocaeli 1999	SH-11	DA	7,4	0,41	57,3	8,17	-1,44	12,58	29,1	37,93	0,45	1,2	0	8,92	1,2	12,65	2,07	3,93		70	[20, 41, 91]
Kocaeli 1999	PS-2	DA	7,4	0,4	77	15,11	1,94	7,63	0,5	9,33	3,73	10	8	3,8	1,1	23,36	1,14	7,98	190	240	[20, 41, 91]
Kocaeli 1999	PS-3	DA	7,4	0,4	77	15,11	1,94	7,63	0,5	9,33	3,73	1	6	7,9	1,03	30,24	0,1	1,38	190	10	[20, 41, 91]
Kocaeli 1999	PS-4	DA	7,4	0,4	77	15,11	1,94	7,63	0,5	9,33	3,73	1	8	3,5	1,2	11	7,7	6,15	190	180	[20, 41, 91]
Kocaeli 1999	SF5	DA	7,4	0,4	77	15,11	1,94	7,63	0,5	9,33	3,73	0	7	2,78	0,9	42,98	0,64	6,05	93	30	[20, 41, 91]
Kocaeli 1999	SF6	DA	7,4	0,4	77	15,11	1,94	7,63	0,5	9,33	3,73	0	15	1,4	0,8	52	0,07	6,95	93	120	[20, 41, 91]
Kocaeli 1999	DN1	DA	7,4	0,4	77	15,11	1,94	7,63	0,5	9,33	3,73	17	20	4,74	1,7	21,12	0,08	8,73	210	90	[20, 41, 91]
Kocaeli 1999	DN2	DA	7,4	0,4	77	15,11	1,94	7,63	0,5	9,33	3,73	17	5	2,7	2,5	12,06	3,31	3,49	210	0	[20, 41, 91]
Kocaeli 1999	YH1	DA	7,4	0,3	57,3	11,16	1,79	7,63	35	43,83	0,3	0	20	5	2,08	12,25	0,25	2,08	180	20	[20, 41, 91]
Kocaeli 1999	YH2	DA	7,4	0,3	57,3	11,16	1,79	7,63	35	43,83	0,3	0	13	6,3	0,9	19,06	0,22	1,55	180	15	[20, 41, 91]

Table 4.3: Yapay sinir ağları modelinde kullanılmak üzere derlenen nihai veri seti (devamı)

Kocaeli 1999	YH3	DA	7,4	0,3	57,3	11,16	1,79	7,63	35	43,83	0,3	0	8	3,02	0,8	14,01	0,22	7,35	180	5	[20, 41, 91]
Kocaeli 1999	A2	DA	7,4	0,3	47,01	7,51	-0,04	11,64	10	18,83	1,31	0,3	0	1,2	6,35	35	0,03	6,95	200	14	[41, 55, 91, 92]
Kocaeli 1999	A4	DA	7,4	0,6	47,01	3,76	-0,04	11,64	10	18,83	1,31	0,3	0	0,3	3,9	35	0,02	4,05	200	11	[41, 55, 91, 92]
Loma Prieta 1989	EB-3	T-O	7	0,25	19,19	1,5	-1,18	11,1	27,2	31,09	0,14	0	32,69	0,95	1,55	4	1,15	1,55		25	[42, 49]
Loma Prieta 1989	RC-B1	T-O	7	0,25	19,19	1,5	-1,18	11,1	27,2	31,09	0,14	0	4,91	0	5,65	0	0	14,9		7	[42, 49]
Loma Prieta 1989	VC-B10	T-O	7	0,25	19,19	1,5	-1,18	11,1	27,2	31,09	0,14	0	29,93	0,71	2,83	4	1,15	3,59		28	[42, 49]
Luzon 1990	PR 1	DA	7,6	0,2	53,34	14,51	0,12	12,42	10	23,3	1,49	0,5	50	14,37	1,78	17,14	0,18	9,23	146	500	[55]
Luzon 1990	PR 2	DA	7,6	0,2	53,34	14,51	0,12	12,42	10	23,3	1,49	0,5	1,05	10,78	1,92	18,75	0,16	4,23	147	200	[55]
Luzon 1990	PR 3	DA	7,6	0,2	53,34	14,51	0,12	12,42	10	23,3	1,49	0,5	1,54	12,32	1,92	18,75	0,16	2,69	15	150	[55]
Luzon 1990	PR 11	DA	7,6	0,2	53,34	14,51	0,12	12,42	10	23,3	1,49	0,5	12,5	7,6	5,5	15	0,2	10,38	148	400	[55]
Nihonkai Chubu 1983	N-1-77	T	7,7	0,25	35	5		13,84	27	43,33	0,78	0,56	0	4	2	5	0,35	2	186	43,07	[36, 49]
Nihonkai Chubu 1983	N-2-78	T	7,7	0,25	35	5		13,84	27	43,33	0,78	1,59	0	6,71	7	5	0,35	13	179	182,42	[36, 49]
Nihonkai Chubu 1983	N-2-79	T	7,7	0,25	35	5		13,84	27	43,33	0,78	1,59	0	5,16	2,84	2,86	0,35	9,97	173	189,12	[36, 49]
Nihonkai Chubu 1983	N-2-80	T	7,7	0,25	35	5		13,84	27	43,33	0,78	1,78	0	3,45	1,5	2,5	0,35	8,66	180	263,55	[36, 49]
Nihonkai Chubu 1983	N-2-81	T	7,7	0,25	35	5		13,84	27	43,33	0,78	3,83	0	0	4	0	0	6,97		218,83	[36, 49]
Nihonkai Chubu 1983	N-3-82	T	7,7	0,25	35	5		13,84	27	43,33	0,78	3,83	0	2,3	1,7	0	0,35	1,7	178	269,45	[36, 49]
Nihonkai Chubu 1983	N-3-83	T	7,7	0,25	35	5		13,84	27	43,33	0,78	5,9	0	3,25	2,84	3,75	0,35	17	179	57,47	[36, 49]
Nihonkai Chubu 1983	N-4-87	T	7,7	0,25	35	5		13,84	27	43,33	0,78	1,14	0	1	1,4	5	0,35	18	188	79,72	[36, 49]
Nihonkai Chubu 1983	N-4-88	T	7,7	0,25	35	5		13,84	27	43,33	0,78	0,2	0	5,39	2,9	5	0,35	16	175	52,08	[36, 49]
Nihonkai Chubu 1983	N-4-8	T	7,7	0,25	35	5		13,84	27	43,33	0,78	1,14	0	3,2	4	5	0,35	19		43,28	[36, 49]
Nihonkai Chubu 1983	N-5-89	T	7,7	0,25	35	5		13,84	27	43,33	0,78	1,14	0	2,01	1,6	2,5	0,35	18		140,06	[36, 49]
Nihonkai Chubu 1983	N-5-90	T	7,7	0,25	35	5		13,84	27	43,33	0,78	1,14	0	5,4	1,6	4,17	0,35	1,6		78	[36, 49]
Nihonkai Chubu 1983	N-6-91	T	7,7	0,25	35	5		13,84	27	43,33	0,78	0,59	0	7,87	2,2	3,57	0,35	3	182	171,61	[36, 49]
Nihonkai Chubu 1983	N-6-92	T	7,7	0,25	35	5		13,84	27	43,33	0,78	0,59	0	5,25	2,6	3,33	0,35	2,6		118,11	[36, 49]
Nihonkai Chubu 1983	N-6-93	T	7,7	0,25	35	5		13,84	27	43,33	0,78	0,95	0	1	15,43	5	0,35	18	184	31,8	[36, 49]
Nihonkai Chubu 1983	N-7-94	T	7,7	0,25	35	5		13,84	27	43,33	0,78	0,61	0	3	2	5	0,35	3	179	64,76	[36, 49]
Nihonkai Chubu 1983	N-7-95	T	7,7	0,25	35	5		13,84	27	43,33	0,78	0,95	0	1	16	5	0,35	18		163,16	[36, 49]
Nihonkai Chubu 1983	31	T	7,7	0,25	35	5		13,84	27	43,33	0,78	1,14	0	1,6	2	5	0,35	2	188	9,2	[36, 49]
Nihonkai Chubu 1983	32	T	7,7	0,25	35	5		13,84	27	43,33	0,78	1,14	0	0	2	0	0	5,1		13,9	[36, 49]
Nihonkai Chubu 1983	62	T	7,7	0,25	35	5		13,84	27	43,33	0,78	0,95	0	1,4	1,2	5	0,35	1,2		76,57	[36, 49]
Nihonkai Chubu 1983	64	T	7,7	0,25	35	5		13,84	27	43,33	0,78	0,95	0	4,8	1,2	5	0,35	1,2		22,43	[36, 49]
Nihonkai Chubu 1983	75	T	7,7	0,25	35	5		13,84	27	43,33	0,78	0,2	0	6,3	0,7	0	0,35	0,7		23,2	[36, 49]
Nihonkai Chubu 1983	91	T	7,7	0,25	35	5		13,84	27	43,33	0,78	2	0	1,45	4	5	0,35	7		33,19	[36, 49]
Nihonkai Chubu 1983	S-2-99	T	7,7	0,25	35	5		13,84	27	43,33	0,78	2	0	1,44	5	5	0,35	9,76		248,32	[36, 49]
Nihonkai Chubu 1983	S-4-101	T	7,7	0,25	35	5		13,84	27	43,33	0,78	2	0	2	4,6	3,33	0,35	4,5		197,32	[36, 49]
Nihonkai Chubu 1983	S-7-105	T	7,7	0,25	35	5		13,84	27	43,33	0,78	2	0	7,17	2	4	0,35	7		135,99	[36, 49]
Nihonkai Chubu 1983	S-7-106	T	7,7	0,25	35	5		13,84	27	43,33	0,78	2	0	3,51	0,7	3,33	0,35	1,4		99,34	[36, 49]
Nihonkai Chubu 1983	S-7-107	T	7,7	0,25	35	5		13,84	27	43,33	0,78	2	0	3,91	0,7	3,75	0,35	0,7		56,26	[36, 49]
Nihonkai Chubu 1983	S-8-108	T	7,7	0,25	35	5		13,84	27	43,33	0,78	2	0	8,07	0,6	3,57	0,35	0,6		38,74	[36, 49]
Nihonkai Chubu 1983	S-9-109	T	7,7	0,25	35	5		13,84	27	43,33	0,78	2	0	4,96	4,3	5	0,35	9,5		132,39	[36, 49]
Nihonkai Chubu 1983	S-11-92	T	7,7	0,25	35	5		13,84	27	43,33	0,78	2	0	3,65	2,6	3,57	0,35	2,6		103,26	[36, 49]
Nihonkai Chubu 1983	S-12-96	T	7,7	0,25	35	5		13,84	27	43,33	0,78	2	0	0,86	2	1,67	0,35	2		171,12	[36, 49]
Nihonkai Chubu 1983	S-12-97	T	7,7	0,25	35	5		13,84	27	43,33	0,78	2	0	1,3	0,7	2,5	0,35	3		220,39	[36, 49]

Table 4.3: Yapay sinir ağları modelinde kullanılmak üzere derlenen nihai veri seti (devamı)

Nihonkai Chubu 1983	S-12-98	T	7,7	0,25	35	5		13,84	27	43,33	0,78	0,2	0	1,91	8,6	5	0,35	8,6		39,57	[36, 49]
Niigata 1964	08-Sep	T	7,5	0,19	30	4,83	0,82	12,82	21	31,84	0,8	1,06	0	10,3	1,3	5,27	0,33	11	173,6	115,3	[36, 49, 93]
Niigata 1964	0-1	T	7,5	0,19	30	4,83	0,82	12,82	21	31,84	0,8	0	0	8,07	1,98	10,75	0,15	1,98	173,6	351,31	[36, 49, 93]
Niigata 1964	03-Feb	T	7,5	0,19	30	4,83	0,82	12,82	21	31,84	0,8	0	0,14	2	8,73	30	0,16	8,73	173,6	92,83	[36, 49, 93]
Niigata 1964	03-Jun	T	7,5	0,19	30	4,83	0,82	12,82	21	31,84	0,8	0	0	6,8	1,2	9,71	0,21	1,2	173,6	429,21	[36, 49, 93]
Niigata 1964	03-Jul	T	7,5	0,19	30	4,83	0,82	12,82	21	31,84	0,8	1,19	0	15,1	0,9	6,4	0,38	3,73	173,6	82,67	[36, 49, 93]
Niigata 1964	03-Aug	T	7,5	0,19	30	4,83	0,82	12,82	21	31,84	0,8	0	0	11	4,73	12	0,3	6,73	173,6	246,37	[36, 49, 93]
Niigata 1964	04-Jan	T	7,5	0,19	30	4,83	0,82	12,82	21	31,84	0,8	0	0	7,8	0	8	0,15	1,7	173,6	63,95	[36, 49, 93]
Niigata 1964	05-Mar	T	7,5	0,19	30	4,83	0,82	12,82	21	31,84	0,8	2,79	0,94	7,13	0,6	16,5	0,17	0,6	173,6	63	[36, 49, 93]
Niigata 1964	05-Jun	T	7,5	0,19	30	4,83	0,82	12,82	21	31,84	0,8	1,75	0,15	0	5,73	0	0	11,73	173,6	48,36	[36, 49, 93]
Niigata 1964	05-Jul	T	7,5	0,19	30	4,83	0,82	12,82	21	31,84	0,8	0,98	0,14	3	2,73	5	0,35	4,73	173,6	18	[36, 49, 93]
Niigata 1964	05-Aug	T	7,5	0,19	30	4,83	0,82	12,82	21	31,84	0,8	0,75	0	2,2	1,4	21	0,65	4,5	173,6	75,6	[36, 49, 93]
Niigata 1964	05-Oct	T	7,5	0,19	30	4,83	0,82	12,82	21	31,84	0,8	1,75	0,08	2	5,73	5	0,35	7,73	173,6	91,08	[36, 49, 93]
Niigata 1964	May-15	T	7,5	0,19	30	4,83	0,82	12,82	21	31,84	0,8	1,19	0,11	7	3,23	12	0,15	3,23	173,6	98	[36, 49, 93]
Niigata 1964	May-17	T	7,5	0,19	30	4,83	0,82	12,82	21	31,84	0,8	0	0,13	0	7,73	0	0	7,73	173,6	143	[36, 49, 93]
Niigata 1964	May-18	T	7,5	0,19	30	4,83	0,82	12,82	21	31,84	0,8	0	0,15	3,73	0	19,5	0,18	0,86	173,6	170	[36, 49, 93]
Niigata 1964	May-21	T	7,5	0,19	30	4,83	0,82	12,82	21	31,84	0,8	0	0,08	6,7	0	6,43	0,31	0,3	173,6	39	[36, 49, 93]
Niigata 1964	May-22	T	7,5	0,19	30	4,83	0,82	12,82	21	31,84	0,8	0	0,15	1	2,73	8	0,15	4,73	173,6	160	[36, 49, 93]
Niigata 1964	May-23	T	7,5	0,19	30	4,83	0,82	12,82	21	31,84	0,8	1,19	0,24	1	2,23	5	0,35	2,23	173,6	53,48	[36, 49, 93]
Niigata 1964	May-37	T	7,5	0,19	30	4,83	0,82	12,82	21	31,84	0,8	0	0,19	0,8	4,1	8	0,15	4,1	173,6	40,64	[36, 49, 93]
Niigata 1964	May-39	T	7,5	0,19	30	4,83	0,82	12,82	21	31,84	0,8	0,53	0,16	1,3	10,5	3,5	0,48	12,1	173,6	152,98	[36, 49, 93]
Niigata 1964	5-40 1	T	7,5	0,19	30	4,83	0,82	12,82	21	31,84	0,8	0,84	0,08	9,6	2	5	0,68	11,9	173,6	120,89	[36, 49, 93]
Niigata 1964	5-40 2	T	7,5	0,19	30	4,83	0,82	12,82	21	31,84	0,8	0,84	0,08	9,6	2	5	0,68	11,9	173,6	96,3	[36, 49, 93]
Niigata 1964	May-42	T	7,5	0,19	30	4,83	0,82	12,82	21	31,84	0,8	0	0	4,8	2	4	0,43	5,7	173,6	88,56	[36, 49, 93]
Niigata 1964	May-43	T	7,5	0,19	30	4,83	0,82	12,82	21	31,84	0,8	0,53	0,15	1,85	5,2	22,5	1,08	15,5	173,6	51,98	[36, 49, 93]
Niigata 1964	06-Jun	T	7,5	0,19	30	4,83	0,82	12,82	21	31,84	0,8	0	1,29	12,4	0,9	4,31	0,37	8	173,6	488,68	[36, 49, 93]
Niigata 1964	06-Aug	T	7,5	0,19	30	4,83	0,82	12,82	21	31,84	0,8	1,06	3,4	5	0,5	11,4	0,37	0,5	173,6	198,57	[36, 49, 93]
Niigata 1964	06-Oct	T	7,5	0,19	30	4,83	0,82	12,82	21	31,84	0,8	0	0,16	2,2	0,9	6,5	0,95	0,9	173,6	42	[36, 49, 93]
Niigata 1964	6-12	T	7,5	0,19	30	4,83	0,82	12,82	21	31,84	0,8	0	0	6,85	1,05	5	0,04	11	173,6	74	[36, 49, 93]
Niigata 1964	Jun-16	T	7,5	0,19	30	4,83	0,82	12,82	21	31,84	0,8	0,38	0	1	2	8	0,15	2	173,6	237	[36, 49, 93]
Niigata 1964	Jun-17	T	7,5	0,19	30	4,83	0,82	12,82	21	31,84	0,8	0	0,2	3,5	3,5	16	0,15	4	173,6	38,64	[36, 49, 93]
Niigata 1964	Jun-19	T	7,5	0,19	30	4,83	0,82	12,82	21	31,84	0,8	0	0,11	0,4	1,7	5	0,35	1,7	173,6	54,62	[36, 49, 93]
Niigata 1964	6-20	T	7,5	0,19	30	4,83	0,82	12,82	21	31,84	0,8	0	0,25	1,55	1,25	15	0,1	1,25	173,6	51	[36, 49, 93]
Niigata 1964	07-Jan	T	7,5	0,19	30	4,83	0,82	12,82	21	31,84	0,8	0	0,14	1,2	0	11,5	0,13	0,5	173,6	58,55	[36, 49, 93]
Niigata 1964	7-2	T	7,5	0,19	30	4,83	0,82	12,82	21	31,84	0,8	0	0	1,4	5,1	5	0,35	5,1	173,6	80,19	[36, 49, 93]
Niigata 1964	07-Mar	T	7,5	0,19	30	4,83	0,82	12,82	21	31,84	0,8	0,26	0	12,5	2,2	4,9	0,43	2,2	173,6	653	[36, 49, 93]
Niigata 1964	07-May	T	7,5	0,19	30	4,83	0,82	12,82	21	31,84	0,8	0,12	0,62	9,7	1,6	8	0,34	2,5	173,6	410	[36, 49, 93]
Niigata 1964	07-Aug	T	7,5	0,19	30	4,83	0,82	12,82	21	31,84	0,8	0	0	1	6,5	2	0,6	11,5	173,6	300	[36, 49, 93]
Niigata 1964	08-Jan	T	7,5	0,19	30	4,83	0,82	12,82	21	31,84	0,8	0	0	5,8	5,2	11,5	0,13	8	173,6	287	[36, 49, 93]
Niigata 1964	8-2	T	7,5	0,19	30	4,83	0,82	12,82	21	31,84	0,8	0	0	9,3	0,7	8	0,15	6	173,6	206	[36, 49, 93]
Niigata 1964	08-Mar	T	7,5	0,19	30	4,83	0,82	12,82	21	31,84	0,8	0	0	8,3	2,3	5,38	0,33	2,3	173,6	282,62	[36, 49, 93]
Niigata 1964	08-Apr	T	7,5	0,19	30	4,83	0,82	12,82	21	31,84	0,8	0	0	5,9	1,9	6,8	0,23	6	173,6	376,58	[36, 49, 93]
Niigata 1964	08-May	T	7,5	0,19	30	4,83	0,82	12,82	21	31,84	0,8	0	0	3,6	0,3	0	0,01	2	173,6	153,05	[36, 49, 93]

Table 4.3: Yapay sinir ağları modelinde kullanılmak üzere derlenen nihai veri seti (devamı)

Niigata 1964	8-7	T	7,5	0,19	30	4,83	0,82	12,82	21	31,84	0,8	0	0	13,9	0,3	6,69	0,22	5	173,6	113	[36, 49, 93]
Niigata 1964	08-Aug	T	7,5	0,19	30	4,83	0,82	12,82	21	31,84	0,8	0	0,07	10,7	1,1	5,2	0,4	11	173,6	210,61	[36, 49, 93]
Niigata 1964	08-Oct	T	7,5	0,19	30	4,83	0,82	12,82	21	31,84	0,8	1,13	0	2,2	7	6	0,6	7,8	173,6	86,28	[36, 49, 93]
Niigata 1964	08-Dec	T	7,5	0,19	30	4,83	0,82	12,82	21	31,84	0,8	0	0	9,1	0,5	5,38	0,33	6	173,6	134,57	[36, 49, 93]
Niigata 1964	Aug-13	T	7,5	0,19	30	4,83	0,82	12,82	21	31,84	0,8	0,38	0,08	9,5	0,3	7,55	0,35	6	173,6	125,16	[36, 49, 93]
Niigata 1964	Aug-19	T	7,5	0,19	30	4,83	0,82	12,82	21	31,84	0,8	0,38	0,06	10	3	6,5	0,25	7	173,6	114,73	[36, 49, 93]
Niigata 1964	Aug-30	T	7,5	0,19	30	4,83	0,82	12,82	21	31,84	0,8	0,38	0	1,75	1,25	5,5	0,48	1,25	173,6	72,92	[36, 49, 93]
Niigata 1964	Aug-35	T	7,5	0,19	30	4,83	0,82	12,82	21	31,84	0,8	1,06	0	4,4	2,6	8	0,15	2,6	173,6	145,55	[36, 49, 93]
Niigata 1964	Aug-37	T	7,5	0,19	30	4,83	0,82	12,82	21	31,84	0,8	0	0	5,4	2,6	12	0,29	4,3	173,6	210,78	[36, 49, 93]
Niigata 1964	Aug-43	T	7,5	0,19	30	4,83	0,82	12,82	21	31,84	0,8	0	0	0	11	0	0	12	173,6	35	[36, 49, 93]
Niigata 1964	09-Jan	T	7,5	0,19	30	4,83	0,82	12,82	21	31,84	0,8	0	0,11	3,19	0,86	5	0,35	0,86	173,6	78,84	[36, 49, 93]
Niigata 1964	10-Mar	T	7,5	0,19	30	4,83	0,82	12,82	21	31,84	0,8	0	0	2	1,5	8	0,15	1,5	173,6	77	[36, 49, 93]
Niigata 1964	11-Mar	T	7,5	0,19	30	4,83	0,82	12,82	21	31,84	0,8	1,06	0,21	3,5	0	8	0,15	4,5	173,6	130,98	[36, 49, 93]
Niigata 1964	14-Mar	T	7,5	0,19	30	4,83	0,82	12,82	21	31,84	0,8	0	0	1,7	1,1	0	0,01	1,5	173,6	48	[36, 49, 93]
Niigata 1964	72-2	T	7,5	0,19	30	4,83	0,82	12,82	21	31,84	0,8	0	0	6,92	0,48	5,5	1,06	0,48	173,6	153	[36, 49, 93]
Niigata 1964	78-2	T	7,5	0,19	30	4,83	0,82	12,82	21	31,84	0,8	10	0	0	11,1	0	0	13	173,6	148	[36, 49, 93]
Niigata 1964	F10-3	T	7,5	0,19	30	4,83	0,82	12,82	21	31,84	0,8	2,66	0,32	0	9,5	0	0	9,5	176	21	[36, 49, 93]
Niigata 1964	F10-4	T	7,5	0,19	30	4,83	0,82	12,82	21	31,84	0,8	3,03	0,21	6,8	7,8	12,8	0,3	18,5	176	21	[36, 49, 93]
Niigata 1964	F10-8	T	7,5	0,19	30	4,83	0,82	12,82	21	31,84	0,8	2,66	0,26	11,87	2,03	7,92	0,35	13	176	139,86	[36, 49, 93]
Niigata 1964	F10-9	T	7,5	0,19	30	4,83	0,82	12,82	21	31,84	0,8	0	0	7	2,5	12	0,18	0,8	176	75,84	[36, 49, 93]
Niigata 1964	F10-11	T	7,5	0,19	30	4,83	0,82	12,82	21	31,84	0,8	0	0,06	9,6	0,6	8	0,15	3,5	176	83	[36, 49, 93]
Niigata 1964	F10-12	T	7,5	0,19	30	4,83	0,82	12,82	21	31,84	0,8	0	0	11,4	0,55	10,1	0,34	0,55	176	89,13	[36, 49, 93]
Niigata 1964	F10-13	T	7,5	0,19	30	4,83	0,82	12,82	21	31,84	0,8	0	0	10,11	0,8	6,2	0,27	3,89	176	156,94	[36, 49, 93]
Niigata 1964	F10-14	T	7,5	0,19	30	4,83	0,82	12,82	21	31,84	0,8	0,38	0,11	3,69	3,01	8	0,15	5	176	113	[36, 49, 93]
Niigata 1964	F10-15	T	7,5	0,19	30	4,83	0,82	12,82	21	31,84	0,8	0	0	8,95	1,1	4	0,48	1,1	176	187,12	[36, 49, 93]
Niigata 1964	F10-16	T	7,5	0,19	30	4,83	0,82	12,82	21	31,84	0,8	0	0	11,95	1,45	5,17	0,39	1,85	176	116	[36, 49, 93]
Niigata 1964	F10-19	T	7,5	0,19	30	4,83	0,82	12,82	21	31,84	0,8	0	0	8,7	0,9	5,33	0,33	0,9	176	177,37	[36, 49, 93]
Niigata 1964	F10-20	T	7,5	0,19	30	4,83	0,82	12,82	21	31,84	0,8	0	0,16	8,7	1	5,67	0,31	1	176	177,37	[36, 49, 93]
Niigata 1964	F10-21	T	7,5	0,19	30	4,83	0,82	12,82	21	31,84	0,8	0	0,16	5,7	0,9	6,5	0,25	0,9	176	177,37	[36, 49, 93]
Niigata 1964	F10-22	T	7,5	0,19	30	4,83	0,82	12,82	21	31,84	0,8	0	0,16	5,1	0,9	5,2	0,4	0,8	176	177,37	[36, 49, 93]
Niigata 1964	F10-23	T	7,5	0,19	30	4,83	0,82	12,82	21	31,84	0,8	0	0,16	7,45	0,8	5,38	0,64	0,8	176	177,37	[36, 49, 93]
Niigata 1964	F10-24	T	7,5	0,19	30	4,83	0,82	12,82	21	31,84	0,8	1,13	1,05	7,75	0,45	5,71	0,39	10,4	176	189,07	[36, 49, 93]
Niigata 1964	F10-25	T	7,5	0,19	30	4,83	0,82	12,82	21	31,84	0,8	1,13	1,05	8,9	1,1	2,33	0,64	3	176	189,07	[36, 49, 93]
Niigata 1964	F10-26	T	7,5	0,19	30	4,83	0,82	12,82	21	31,84	0,8	1,13	1,05	9,1	1,7	4,78	0,41	1,7	176	189,07	[36, 49, 93]
Niigata 1964	F11-1	T	7,5	0,19	30	4,83	0,82	12,82	21	31,84	0,8	0	0	3,6	1,6	19	0,24	2	176	21	[36, 49, 93]
Niigata 1964	F11-2	T	7,5	0,19	30	4,83	0,82	12,82	21	31,84	0,8	0,38	0,98	5,4	3	7	0,22	9,6	176	68,59	[36, 49, 93]
Niigata 1964	F11-3	T	7,5	0,19	30	4,83	0,82	12,82	21	31,84	0,8	0,38	0,98	4,79	4	8	0,15	9,1	176	68,59	[36, 49, 93]
Niigata 1964	F11-4	T	7,5	0,19	30	4,83	0,82	12,82	21	31,84	0,8	0,38	0,98	4,6	4,5	7	0,22	4,5	176	68,59	[36, 49, 93]
Niigata 1964	F11-7	T	7,5	0,19	30	4,83	0,82	12,82	21	31,84	0,8	1,06	5,17	11,7	0,6	14,08	0,33	1,5	176	152,13	[36, 49, 93]
Niigata 1964	F11-8 1	T	7,5	0,19	30	4,83	0,82	12,82	21	31,84	0,8	0,84	2	4,4	2	12,8	0,3	7,1	176	103	[36, 49, 93]
Niigata 1964	F11-8 2	T	7,5	0,19	30	4,83	0,82	12,82	21	31,84	0,8	0,84	2	4,4	2	12,8	0,3	7,1	176	183,98	[36, 49, 93]
Niigata 1964	F11-12	T	7,5	0,19	30	4,83	0,82	12,82	21	31,84	0,8	1,06	2,8	10,6	3,6	6	0,6	3,6	176	43	[36, 49, 93]
Niigata 1964	F11-15	T	7,5	0,19	30	4,83	0,82	12,82	21	31,84	0,8	0	0	11,57	1,93	5	0,35	1,93	176	112	[36, 49, 93]

Table 4.3: Yapay sinir ağları modelinde kullanılmak üzere derlenen nihai veri seti (devamı)

Niigata 1964	F11-16	T	7,5	0,19	30	4,83	0,82	12,82	21	31,84	0,8	0	0	4,5	0,5	5	0,35	1,5	176	112	[36, 49, 93]
Niigata 1964	F11-19	T	7,5	0,19	30	4,83	0,82	12,82	21	31,84	0,8	0	0	7,4	2	6,43	0,41	9	176	63,95	[36, 49, 93]
Niigata 1964	F11-21	T	7,5	0,19	30	4,83	0,82	12,82	21	31,84	0,8	0	0	6,75	0	8,33	0,32	0,1	176	15	[36, 49, 93]
Niigata 1964	F12-1	T	7,5	0,19	30	4,83	0,82	12,82	21	31,84	0,8	0	0,28	7,4	0	8,83	0,23	0,01	176	22	[36, 49, 93]
Niigata 1964	G9-1	T	7,5	0,19	30	4,83	0,82	12,82	21	31,84	0,8	0	0	6,6	1,1	5	0,35	5,5	169	96,66	[36, 49, 93]
Niigata 1964	G9-11	T	7,5	0,19	30	4,83	0,82	12,82	21	31,84	0,8	0	0	7,4	1,25	12,14	0,17	5	169	172,97	[36, 49, 93]
Niigata 1964	G9-12	T	7,5	0,19	30	4,83	0,82	12,82	21	31,84	0,8	0	0	4,9	0	9,4	0,14	0,5	169	168,53	[36, 49, 93]
Niigata 1964	G9-13	T	7,5	0,19	30	4,83	0,82	12,82	21	31,84	0,8	0	0	5,7	2,3	8	0,15	2,3	169	157,63	[36, 49, 93]
Niigata 1964	G9-14	T	7,5	0,19	30	4,83	0,82	12,82	21	31,84	0,8	0	0	8,5	1,5	11,25	0,19	6	169	131	[36, 49, 93]
Niigata 1964	G9-15	T	7,5	0,19	30	4,83	0,82	12,82	21	31,84	0,8	0	0	6,4	1,4	8	0,15	8	169	187,78	[36, 49, 93]
Niigata 1964	G9-16 1	T	7,5	0,19	30	4,83	0,82	12,82	21	31,84	0,8	2,14	1,52	6,5	1,7	9,83	0,33	1,7	169	61	[36, 49, 93]
Niigata 1964	G9-16 2	T	7,5	0,19	30	4,83	0,82	12,82	21	31,84	0,8	2,14	0,97	6,5	1,7	9,83	0,33	1,7	169	150	[36, 49, 93]
Niigata 1964	G9-16 3	T	7,5	0,19	30	4,83	0,82	12,82	21	31,84	0,8	2,14	1,04	6,5	1,7	9,83	0,33	1,7	169	91	[36, 49, 93]
Niigata 1964	G9-24	T	7,5	0,19	30	4,83	0,82	12,82	21	31,84	0,8	0	0	5,28	0,3	18,33	0,22	1,01	169	121	[36, 49, 93]
Niigata 1964	G9-25	T	7,5	0,19	30	4,83	0,82	12,82	21	31,84	0,8	0	0	7,38	0,25	11,13	0,33	0,25	169	121	[36, 49, 93]
Niigata 1964	G9-26	T	7,5	0,19	30	4,83	0,82	12,82	21	31,84	0,8	0	0,08	1,5	3,3	5	0,35	3,3	169	39	[36, 49, 93]
Niigata 1964	G9-32	T	7,5	0,19	30	4,83	0,82	12,82	21	31,84	0,8	0	0	2,18	0,9	12,67	0,08	2,35	169	32,98	[36, 49, 93]
Niigata 1964	G9-33	T	7,5	0,19	30	4,83	0,82	12,82	21	31,84	0,8	0	0,14	2,85	1,65	5	0,35	1,65	169	65	[36, 49, 93]
Niigata 1964	G10-2	T	7,5	0,19	30	4,83	0,82	12,82	21	31,84	0,8	0	0	12,6	0,4	5,75	0,3	0,4	169	180,99	[36, 49, 93]
Niigata 1964	G10-20	T	7,5	0,19	30	4,83	0,82	12,82	21	31,84	0,8	0	0,07	0	8,2	0	0	1,7	169	33	[36, 49, 93]
Niigata 1964	G10-26	T	7,5	0,19	30	4,83	0,82	12,82	21	31,84	0,8	0,53	0,16	9,93	1,4	16,67	0,28	3,12	169	47,04	[36, 49, 93]
Niigata 1964	G10-27	T	7,5	0,19	30	4,83	0,82	12,82	21	31,84	0,8	0,53	0,15	10,8	0,7	28,33	3,33	14,9	169	50,34	[36, 49, 93]
Niigata 1964	G10-28	T	7,5	0,19	30	4,83	0,82	12,82	21	31,84	0,8	1,06	1,31	7,45	0	12	0,31	5	169	35,64	[36, 49, 93]
Niigata 1964	G10-29	T	7,5	0,19	30	4,83	0,82	12,82	21	31,84	0,8	0,53	0,07	6,3	1,8	5	0,35	4	169	37,19	[36, 49, 93]
Niigata 1964	G10-30	T	7,5	0,19	30	4,83	0,82	12,82	21	31,84	0,8	0,43	0,08	7,5	2,5	5	0,35	2,5	169	57,03	[36, 49, 93]
Niigata 1964	G10-31	T	7,5	0,19	30	4,83	0,82	12,82	21	31,84	0,8	0,53	0,07	7,3	4,2	5,86	0,29	4,2	169	16	[36, 49, 93]
Niigata 1964	G10-33	T	7,5	0,19	30	4,83	0,82	12,82	21	31,84	0,8	0,84	0,09	6,7	1,8	5	0,35	11,2	169	248,09	[36, 49, 93]
Niigata 1964	G10-34	T	7,5	0,19	30	4,83	0,82	12,82	21	31,84	0,8	0	0,08	5,6	2	5	0,35	2	169	165,81	[36, 49, 93]
Niigata 1964	G10-35	T	7,5	0,19	30	4,83	0,82	12,82	21	31,84	0,8	0	0	9,5	2	4,1	0,43	2	169	121,37	[36, 49, 93]
Niigata 1964	G10-36	T	7,5	0,19	30	4,83	0,82	12,82	21	31,84	0,8	0	0	9,65	2	5	0,35	2	169	121,37	[36, 49, 93]
Niigata 1964	G10-47	T	7,5	0,19	30	4,83	0,82	12,82	21	31,84	0,8	0,53	0,68	9,25	2,7	8,22	0,26	4	169	274,81	[36, 49, 93]
Niigata 1964	G10-48	T	7,5	0,19	30	4,83	0,82	12,82	21	31,84	0,8	0	0,78	7,4	2,5	15	0,3	4,5	169	440,28	[36, 49, 93]
Niigata 1964	G10-49 1	T	7,5	0,19	30	4,83	0,82	12,82	21	31,84	0,8	0	10,64	7,45	0,9	7,6	0,24	2,75	169	322,39	[36, 49, 93]
Niigata 1964	G10-49 2	T	7,5	0,19	30	4,83	0,82	12,82	21	31,84	0,8	0	10,64	7,45	0,9	7,6	0,24	2,75	169	81,26	[36, 49, 93]
Niigata 1964	G10-50 1	T	7,5	0,19	30	4,83	0,82	12,82	21	31,84	0,8	0	11,95	9,96	0,9	13,7	0,25	3,3	169	361,52	[36, 49, 93]
Niigata 1964	G10-50 2	T	7,5	0,19	30	4,83	0,82	12,82	21	31,84	0,8	0	11,95	9,96	0,9	13,7	0,25	3,3	169	80,88	[36, 49, 93]
Niigata 1964	G10-51	T	7,5	0,19	30	4,83	0,82	12,82	21	31,84	0,8	0	19,72	3,59	2,7	7,4	0,19	3,74	169	371,54	[36, 49, 93]
Niigata 1964	G10-52 1	T	7,5	0,19	30	4,83	0,82	12,82	21	31,84	0,8	0	0,7	9,2	0,9	3,33	0,49	3,5	169	180	[36, 49, 93]
Niigata 1964	G10-52 2	T	7,5	0,19	30	4,83	0,82	12,82	21	31,84	0,8	0	0,7	9,2	0,9	3,33	0,49	3,5	169	235,39	[36, 49, 93]
Niigata 1964	G10-53 1	T	7,5	0,19	30	4,83	0,82	12,82	21	31,84	0,8	0	1,08	16	0,9	5	0,35	4,8	169	606	[36, 49, 93]
Niigata 1964	G10-53 2	T	7,5	0,19	30	4,83	0,82	12,82	21	31,84	0,8	0	1,08	16	0,9	5	0,35	4,8	169	281,38	[36, 49, 93]
Niigata 1964	G10-54 1	T	7,5	0,19	30	4,83	0,82	12,82	21	31,84	0,8	0	0,6	10,4	0,9	5	0,36	2,1	169	326,42	[36, 49, 93]
Niigata 1964	G10-54 2	T	7,5	0,19	30	4,83	0,82	12,82	21	31,84	0,8	0	0,6	10,4	0,9	5	0,36	2,1	169	219,99	[36, 49, 93]

Table 4.3: Yapay sinir ağları modelinde kullanılmak üzere derlenen nihai veri seti (devamı)

Niigata 1964	G10-55	T	7,5	0,19	30	4,83	0,82	12,82	21	31,84	0,8	0	0,85	11,9	0,9	6	0,28	1,2	169	380,98	[36, 49, 93]
Niigata 1964	G10-56	T	7,5	0,19	30	4,83	0,82	12,82	21	31,84	0,8	0	1,08	10,6	0,9	5,55	0,31	2	169	616,5	[36, 49, 93]
Niigata 1964	G10-57	T	7,5	0,19	30	4,83	0,82	12,82	21	31,84	0,8	0	0,92	13,1	0,9	5	0,35	2,5	169	472,95	[36, 49, 93]
Niigata 1964	G10-58	T	7,5	0,19	30	4,83	0,82	12,82	21	31,84	0,8	0	1,72	7	2	5,43	0,32	2	169	512,37	[36, 49, 93]
Niigata 1964	G10-59	T	7,5	0,19	30	4,83	0,82	12,82	21	31,84	0,8	0	1,79	2	2	5	0,35	2	169	230,25	[36, 49, 93]
Niigata 1964	G10-60	T	7,5	0,19	30	4,83	0,82	12,82	21	31,84	0,8	1,13	0	8,5	1	5,6	0,64	2,5	169	230,25	[36, 49, 93]
Niigata 1964	G10-61	T	7,5	0,19	30	4,83	0,82	12,82	21	31,84	0,8	1,13	0	8	1	5,5	0,71	3	169	230,25	[36, 49, 93]
Niigata 1964	G10-62	T	7,5	0,19	30	4,83	0,82	12,82	21	31,84	0,8	1,13	0	8,4	1,1	5	0,35	3,5	169	230,25	[36, 49, 93]
Niigata 1964	G10-69	T	7,5	0,19	30	4,83	0,82	12,82	21	31,84	0,8	0	0	4,5	4,5	23,5	0,16	4,5	169	165,58	[36, 49, 93]
Niigata 1964	G10-70	T	7,5	0,19	30	4,83	0,82	12,82	21	31,84	0,8	0	0	7,28	4,72	7,67	0,45	4,72	169	57,41	[36, 49, 93]
Niigata 1964	G10-77	T	7,5	0,19	30	4,83	0,82	12,82	21	31,84	0,8	1,06	0	0,7	0,8	5	0,35	0,8	169	86	[36, 49, 93]
Niigata 1964	G10-82	T	7,5	0,19	30	4,83	0,82	12,82	21	31,84	0,8	1,13	0	2,4	1,4	6	1,13	1,4	169	6	[36, 49, 93]
Niigata 1964	G10-83	T	7,5	0,19	30	4,83	0,82	12,82	21	31,84	0,8	0,38	0	0,9	0,5	10	0,15	1,1	169	75	[36, 49, 93]
Niigata 1964	G11-1	T	7,5	0,19	30	4,83	0,82	12,82	21	31,84	0,8	0	0	3,7	0,95	9	0,43	3,5	169	93	[36, 49, 93]
Niigata 1964	G11-2	T	7,5	0,19	30	4,83	0,82	12,82	21	31,84	0,8	0	0	2,15	1,35	10	0,23	1,7	169	93	[36, 49, 93]
Niigata 1964	G11-6	T	7,5	0,19	30	4,83	0,82	12,82	21	31,84	0,8	0	0	0,7	3,3	5	0,35	3,3	173,6	124,05	[36, 49, 93]
Niigata 1964	G11-7	T	7,5	0,19	30	4,83	0,82	12,82	21	31,84	0,8	0	0	1,08	0,32	2,5	0,18	0,32	173,6	97	[36, 49, 93]
Niigata 1964	G11-13	T	7,5	0,19	30	4,83	0,82	12,82	21	31,84	0,8	0	0	2,3	0,4	4	0,08	1,4	173,6	62,47	[36, 49, 93]
Niigata 1964	H10-1a	T	7,5	0,19	30	4,83	0,82	12,82	21	31,84	0,8	0	0	3,95	1,65	5	0,35	3,9	179	162,37	[36, 49, 93]
Niigata 1964	H10-2a	T	7,5	0,19	30	4,83	0,82	12,82	21	31,84	0,8	0	0	7,55	1,4	5,2	0,4	1,4	179	162,37	[36, 49, 93]
Niigata 1964	H10-6	T	7,5	0,19	30	4,83	0,82	12,82	21	31,84	0,8	0	0	12,8	0,2	5,33	0,43	1,4	179	145	[36, 49, 93]
Niigata 1964	H10-7	T	7,5	0,19	30	4,83	0,82	12,82	21	31,84	0,8	0	0	9,95	0,45	5,22	0,41	3	179	145	[36, 49, 93]
Niigata 1964	H10-9	T	7,5	0,19	30	4,83	0,82	12,82	21	31,84	0,8	0	0	11,45	0,9	7	0,22	0,9	179	107,42	[36, 49, 93]
Niigata 1964	H10-10	T	7,5	0,19	30	4,83	0,82	12,82	21	31,84	0,8	0	0	13,3	0,7	5	0,35	2,6	179	107,42	[36, 49, 93]
Niigata 1964	H10-11	T	7,5	0,19	30	4,83	0,82	12,82	21	31,84	0,8	0	0	8,85	0,65	2	0,35	0,65	179	107,42	[36, 49, 93]
Niigata 1964	H10-12	T	7,5	0,19	30	4,83	0,82	12,82	21	31,84	0,8	0	0	12,35	1,15	5	0,18	2,6	179	107,42	[36, 49, 93]
Niigata 1964	H10-13	T	7,5	0,19	30	4,83	0,82	12,82	21	31,84	0,8	0	0	9,5	1,2	7,8	0,31	1,2	179	107,42	[36, 49, 93]
Niigata 1964	H10-39	T	7,5	0,19	30	4,83	0,82	12,82	21	31,84	0,8	0	0	6,5	2,5	6,83	0,39	2,8	179	229,3	[36, 49, 93]
Niigata 1964	H10-40	T	7,5	0,19	30	4,83	0,82	12,82	21	31,84	0,8	0	0	3,8	3,3	5,75	0,3	3,3	179	255,24	[36, 49, 93]
Niigata 1964	H10-41	T	7,5	0,19	30	4,83	0,82	12,82	21	31,84	0,8	0	0	6	5	5	0,35	10	179	427	[36, 49, 93]
Niigata 1964	H10-42	T	7,5	0,19	30	4,83	0,82	12,82	21	31,84	0,8	0	0	4,4	2,1	5,75	0,3	2,1	179	271,11	[36, 49, 93]
Niigata 1964	H10-43	T	7,5	0,19	30	4,83	0,82	12,82	21	31,84	0,8	0	0	4,8	2,9	6,8	0,23	2,9	179	271,11	[36, 49, 93]
Niigata 1964	H10-44	T	7,5	0,19	30	4,83	0,82	12,82	21	31,84	0,8	0	0	3,65	3,1	5,5	0,48	1,7	179	130,33	[36, 49, 93]
Niigata 1964	H10-45	T	7,5	0,19	30	4,83	0,82	12,82	21	31,84	0,8	0	0	4,85	2,45	5,6	0,31	8	179	103,15	[36, 49, 93]
Niigata 1964	H10-46	T	7,5	0,19	30	4,83	0,82	12,82	21	31,84	0,8	0	0	4	3	11	0,28	3	179	54	[36, 49, 93]
Niigata 1964	H10-47	T	7,5	0,19	30	4,83	0,82	12,82	21	31,84	0,8	0,84	0	2,8	4,2	5	0,35	7	179	65	[36, 49, 93]
Niigata 1964	I8-5	T	7,5	0,19	30	4,83	0,82	12,82	21	31,84	0,8	0	0	2,6	0,4	5	0,35	0,4	173,6	52,55	[36, 49, 93]
Niigata 1964	I8-6	T	7,5	0,19	30	4,83	0,82	12,82	21	31,84	0,8	0	0	2,5	0,5	5	0,35	0,5	173,6	18	[36, 49, 93]
Niigata 1964	I8-10	T	7,5	0,19	30	4,83	0,82	12,82	21	31,84	0,8	4,18	0,22	3,55	2,45	5	0,35	2,45	173,6	56	[36, 49, 93]
Niigata 1964	I8-12	T	7,5	0,19	30	4,83	0,82	12,82	21	31,84	0,8	3,84	0,56	0	10	0	0	10	173,6	47	[36, 49, 93]
Niigata 1964	I8-13	T	7,5	0,19	30	4,83	0,82	12,82	21	31,84	0,8	9,08	1,9	2	0	10	0,23	0,65	173,6	48	[36, 49, 93]
Niigata 1964	I8-14	T	7,5	0,19	30	4,83	0,82	12,82	21	31,84	0,8	9,08	0,61	4,95	0	5	0,35	0,1	173,6	39	[36, 49, 93]
Niigata 1964	I9-4	T	7,5	0,19	30	4,83	0,82	12,82	21	31,84	0,8	0,9	0	3	0	10,33	0,13	1,2	173,6	111,07	[36, 49, 93]

Table 4.3: Yapay sinir ağları modelinde kullanılmak üzere derlenen nihai veri seti (devamı)

Niigata 1964	I9-5	T	7,5	0,19	30	4,83	0,82	12,82	21	31,84	0,8	0	0	1,05	0	8	0,15	3,25	173,6	249	[36, 49, 93]
Niigata 1964	I9-6	T	7,5	0,19	30	4,83	0,82	12,82	21	31,84	0,8	0	0	4,4	0	8	0,41	1,2	173,6	157,4	[36, 49, 93]
Niigata 1964	I9-7	T	7,5	0,19	30	4,83	0,82	12,82	21	31,84	0,8	0	0	6,5	0,3	7,43	0,43	6,5	173,6	254,9	[36, 49, 93]
Niigata 1964	I9-8	T	7,5	0,19	30	4,83	0,82	12,82	21	31,84	0,8	0	0	6,2	0,6	5,67	0,52	0,6	173,6	60,68	[36, 49, 93]
Niigata 1964	I9-11	T	7,5	0,19	30	4,83	0,82	12,82	21	31,84	0,8	0	0	0,65	6,35	5	0,35	6,35	173,6	51,14	[36, 49, 93]
Niigata 1964	I9-12	T	7,5	0,19	30	4,83	0,82	12,82	21	31,84	0,8	0	0	0,65	8,35	5	0,35	8,35	173,6	74,94	[36, 49, 93]
Niigata 1964	J7-8a	T	7,5	0,19	30	4,83	0,82	12,82	21	31,84	0,8	1,06	0	7,18	0,12	5,67	0,36	2	173,6	300,15	[36, 49, 93]
Niigata 1964	J7-8b	T	7,5	0,19	30	4,83	0,82	12,82	21	31,84	0,8	1,06	0	7,4	0,6	12	0,54	3	173,6	300,15	[36, 49, 93]
Niigata 1964	J8-1	T	7,5	0,19	30	4,83	0,82	12,82	21	31,84	0,8	0,59	0	0,92	2,08	5	0,35	2,08	173,6	168,89	[36, 49, 93]
Niigata 1964	J8-2 1	T	7,5	0,19	30	4,83	0,82	12,82	21	31,84	0,8	0	0,2	6	0	5,5	0,48	2	173,6	531,49	[36, 49, 93]
Niigata 1964	J8-2 2	T	7,5	0,19	30	4,83	0,82	12,82	21	31,84	0,8	0	0,2	6,5	0	5,4	0,45	2	173,6	386	[36, 49, 93]
Niigata 1964	J8-3	T	7,5	0,19	30	4,83	0,82	12,82	21	31,84	0,8	0	0	4,03	2,97	5,5	0,48	4,2	173,6	220	[36, 49, 93]
Niigata 1964	J8-4	T	7,5	0,19	30	4,83	0,82	12,82	21	31,84	0,8	0	0	4,95	0,35	13,8	0,36	1,8	173,6	177	[36, 49, 93]
Niigata 1964	J9-1	T	7,5	0,19	30	4,83	0,82	12,82	21	31,84	0,8	0	0	3	2	8	0,15	3	173,6	187,6	[36, 49, 93]
Niigata 1964	K8-1	T	7,5	0,19	30	4,83	0,82	12,82	21	31,84	0,8	0	0	3,03	1,87	5,75	0,54	1,87	173,6	352	[36, 49, 93]
Niigata 1964	K8-2	T	7,5	0,19	30	4,83	0,82	12,82	21	31,84	0,8	0	0	1,75	3,25	6	0,6	3,25	173,6	139,37	[36, 49, 93]
Niigata 1964	K8-7	T	7,5	0,19	30	4,83	0,82	12,82	21	31,84	0,8	0	0	3,23	1,87	5,33	0,43	1,87	173,6	69	[36, 49, 93]
Niigata 1964	K8-8	T	7,5	0,19	30	4,83	0,82	12,82	21	31,84	0,8	0	0	1,75	3,25	6	0,6	3,25	173,6	69	[36, 49, 93]
Niigata 1964	K8-9	T	7,5	0,19	30	4,83	0,82	12,82	21	31,84	0,8	0	0	4,48	2,52	6,4	0,32	2,52	173,6	69	[36, 49, 93]
Niigata 1964	K9-11	T	7,5	0,19	30	4,83	0,82	12,82	21	31,84	0,8	0	0	5,1	1	3,33	0,24	4,3	173,6	76	[36, 49, 93]
Niigata 1964	QK-1 1	T	7,5	0,19	30	4,83	0,82	12,82	21	31,84	0,8	0	0,2	2,55	1,05	7	0,25	1,05	173,6	482,72	[36, 49, 93]
Niigata 1964	QK-1 2	T	7,5	0,19	30	4,83	0,82	12,82	21	31,84	0,8	0	0,2	2,55	1,05	7	0,25	1,05	173,6	386	[36, 49, 93]
Niigata 1964	QK-2 1	T	7,5	0,19	30	4,83	0,82	12,82	21	31,84	0,8	0	0,2	3,3	1,7	9,67	0,2	1,7	173,6	483	[36, 49, 93]
Niigata 1964	QK-2 2	T	7,5	0,19	30	4,83	0,82	12,82	21	31,84	0,8	0	0,39	3,3	1,7	9,67	0,2	1,7	173,6	260	[36, 49, 93]
Northridge 1994		T	6,7	0,52	27,27	1,46	-0,2	9,02	10	12,1	0,68	1	0	2,65	6,4	35	0,05	7,5	143	100	[55, 89]
Northridge 1994		T	6,7	0,52	27,27	1,46	-0,2	9,02	10	12,1	0,68	1	0	2,2	8,3	21,2	0,06	9	143	100	[55, 89]
San Fernando 1971	54	T-O	6,4	0,55	62,51	7,24	0,16	7,15	0,2	1,34	3,57	1,23	0	5,2	4,48	35	0,04	6,86	167	168	[49, 89]
San Fernando 1971	55	T-O	6,4	0,55	62,51	7,24	0,16	7,15	0,2	1,34	3,57	1,23	0	2,31	5,5	35	0,04	7,81	161	51	[49, 89]
San Fernando 1971	56	T-O	6,4	0,55	62,51	7,24	0,16	7,15	0,2	1,34	3,57	1,23	0	4,73	8,38	35	0,06	9,22	179	122	[49, 89]
San Fernando 1971	57	T-O	6,4	0,55	62,51	7,24	0,16	7,15	0,2	1,34	3,57	1,23	0	3,25	5,79	35	0,04	6,67	154	168	[49, 89]
San Fernando 1971	58	T-O	6,4	0,55	62,51	7,24	0,16	7,15	0,2	1,34	3,57	1,23	0	14,15	4,27	35	0,06	4,27	165	168	[49, 89]
San Fernando 1971	BH22	T-O	6,4	0,55	58,75	6,4	0,15	7,15	0,5	1,64	2,83	0	6,32	5	15	47	0,08	16		14,69	[49, 89]
San Fernando 1971	BH26	T-O	6,4	0,55	58,75	6,4	0,15	7,15	0,5	1,64	2,83	0	6,32	6	14	47	0,08	5		13,94	[49, 89]
San Fernando 1971	D10	T-O	6,4	0,55	58,75	6,4	0,15	7,15	0,5	1,64	2,83	0	5,11	8,5	7	47	0,08	10,5		13,81	[49, 89]
San Fernando 1971	DH6	T-O	6,4	0,55	58,75	6,4	0,15	7,15	0,5	1,64	2,83	0	20,3	7,17	12,3	47	0,08	12,3		285,72	[49, 89]
San Fernando 1971	DH7	T-O	6,4	0,55	58,75	6,4	0,15	7,15	0,5	1,64	2,83	0	5,11	8,1	9,4	47	0,08	10,5		36,5	[49, 89]
San Fernando 1971	DH8	T-O	6,4	0,55	58,75	6,4	0,15	7,15	0,5	1,64	2,83	0	19,75	5,66	14,2	47	0,08	14,5		247,94	[49, 89]
San Fernando 1971	DH9	T-O	6,4	0,55	58,75	6,4	0,15	7,15	0,5	1,64	2,83	0	13,59	3,1	11,4	47	0,08	11,4		173,98	[49, 89]
San Fernando 1971	DH11	T-O	6,4	0,55	58,75	6,4	0,15	7,15	0,5	1,64	2,83	0	5,08	10	10	47	0,08	12		38,77	[49, 89]
San Fernando 1971	DH12	T-O	6,4	0,55	58,75	6,4	0,15	7,15	0,5	1,64	2,83	0	5,11	10,2	10,3	47	0,08	10,3		37,32	[49, 89]
San Fernando 1971	DH13	T-O	6,4	0,55	58,75	6,4	0,15	7,15	0,5	1,64	2,83	0	5,11	0	7	0	0	7		14,33	[49, 89]
San Fernando 1971	DH15	T-O	6,4	0,55	58,75	6,4	0,15	7,15	0,5	1,64	2,83	0	13,59	4,67	2	47	0,08	2,7		168,22	[49, 89]
San Fernando 1971	DH16	T-O	6,4	0,55	58,75	6,4	0,15	7,15	0,5	1,64	2,83	0	19,75	8,68	9,78	47	0,08	14,5		250,27	[49, 89]

Table 4.3: Yapay sinir ağları modelinde kullanılmak üzere derlenen nihai veri seti (devamı)

San Fernando 1971	DH17	T-O	6,4	0,55	58,75	6,4	0,15	7,15	0,5	1,64	2,83	0	20,3	6,5	1,8	47	0,08	1,8		289,74	[49, 89]
San Fernando 1971	WC27A	T-O	6,4	0,55	58,75	6,4	0,15	7,15	0,5	1,64	2,83	0	19,75	7,5	10,3	47	0,08	11		32,71	[49, 89]
San Simeon 2003	2	T	6,5	0,12	22,67	4,37	-0,43	8,21	10	11,4	0,5	1	0	1	2,25	15	0,9	2,75	158	30	[55]
San Simeon 2003	3	T	6,5	0,12	22,67	4,37	-0,43	8,21	10	11,4	0,5	1	0	1	3,1	15	0,9	3,6	157	30	[55]
San Simeon 2003	4	T	6,5	0,12	22,67	4,37	-0,43	8,21	10	11,4	0,5	1	0	1	3,6	15	0,09	4,1	144	30	[55]
San Simeon 2003	7	T	6,5	0,12	22,67	4,37	-0,43	8,21	10	11,4	0,5	0,1	0	3	3,25	15	0,9	5,5	187	30	[55]
San Simeon 2003	8	T	6,5	0,12	22,67	4,37	-0,43	8,21	10	11,4	0,5	0,1	0	3,8	3,05	15	0,9	3,8	178	20	[55]
San Simeon 2003	9	T	6,5	0,12	22,67	4,37	-0,43	8,21	10	11,4	0,5	0,1	0	3,8	1,05	35	0,05	4,1	175	10	[55]
Superstition Hills 1987	110	DA	6,6	0,47	78,36	13,32	1,97	8,45	10	11,71	0,59	0,47	41,38	3,22	3,05	22	0,09	4,88	139	20	[55, 94]
Superstition Hills 1987	111	DA	6,6	0,47	78,36	13,32	1,97	8,45	10	11,71	0,59	0,47	41,38	3,22	3,05	22	0,09	4,88	139	23	[55, 94]
Superstition Hills 1987	112	DA	6,6	0,47	78,36	13,32	1,97	8,45	10	11,71	0,59	0,47	17,91	3,06	2,6	28,54	0,07	5,03	151	18	[55, 94]
Superstition Hills 1987	113	DA	6,6	0,47	78,36	13,32	1,97	8,45	10	11,71	0,59	0,47	13,11	1,6	3,1	26	0,09	3,9	164	10	[55, 94]
Superstition Hills 1987	114	DA	6,6	0,47	78,36	13,32	1,97	8,45	10	11,71	0,59	0,47	17,52	1,6	3,25	33	0,09	3,5	157	10	[55, 94]
Superstition Hills 1987	115	DA	6,6	0,47	78,36	13,32	1,97	8,45	10	11,71	0,59	0,47	7,5	0,9	3	24,56	0,08	3,2	149	0	[55, 94]
Tokachi-Oki 2003	P1	T	7,9	0,31	39,9	5,24		13,74	10	34,6	1,76	0,1	0	1	7,5	5	1	11	182	20	[55, 94]
Tokachi-Oki 2003	T1	T	7,9	0,31	39,9	5,24		13,74	10	34,6	1,76	0,1	0	1	6,5	5	1	11	187	14	[55, 94]

· DA: Doğrultu Atımlı
· N: Normal
· O: Oblik
· T: Ters

5
MODELİN OLUŞTURULMASI VE ANALİZLER

İster makine öğrenmesi ister derin öğrenme olsun bir yapay zekâ uygulaması için genel olarak aşağıdaki akış şemasını takip etmek problemin çözümü için sağlıklı bir süreç yürütülebilmesine olanak sağlamaktadır.



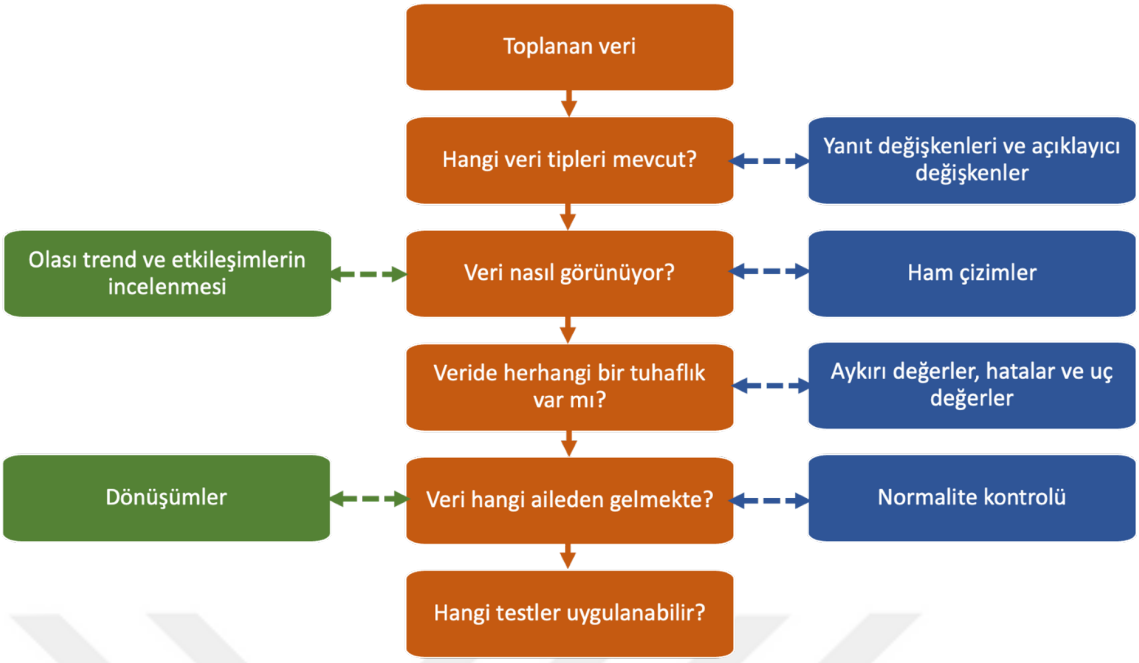
Şekil 5.1 Bir yapay zekâ uygulaması için genel akış şeması

Bu çalışma kapsamında da sıvılaşma kaynaklı yanal yayılmaların yapay sinir ağları ile modellenmesi Şekil 5.1'de belirtilen adımlar takip edilerek yapılacaktır.

5.1 Keşifçi Veri Analizi

Veri kullanılan her analizde ilk yapılması gereken en önemli adımlardan biri keşifçi veri analizi sürecini uygulamaktır. Veriye ilk bakış olarak tanımlanabilecek keşifçi veri analizi eldeki verinin türü, veri içindeki trendlerin bilgisini ve analiz sürecinde hangi yöne gidilebileceği üzerine oldukça önemli bilgilerin elde edilmesine olanak tanımaktadır [95].

Veri tiplerini belirlemekle başlayan süreç, veri içindeki değişkenlerin dağılımı, değişkenlerin birbirleri ile arasındaki ilişkinin aydınlatılması, elde edilen iç görü ile model eğitiminde kullanılacak verilerin seçilmesine kadar devam eder. Bu çalışma kapsamında da problemin çözümü için öncelikle keşifçi veri analizi ile veri setindeki değişkenler incelenmiştir. Değişkenlere ait genel bilgiler Tablo 5.1'de görülebilmektedir.



Şekil 5.2 Keşifçi veri analizi süreci

Tablo 5.1'de özet bilgileri yer alan değişkenlere ait detaylı bilgiler üç ana grup halinde incelenmiştir: Depreme ait özellikler, zemine ait özellikler ve araziye ait özellikler. Yapılan incelemenin amacı veri setini oluşturan depremlerin, değişkenlerin dağılımlarını görerek herhangi bir anomali durumunu kontrol etmektir. Bu hem veri setinin genel doğruluğu hakkında bir bilgi verirken hem de eğitim ve test için oluşturulacak olan alt veri setlerinin dağılımlarının birbirine yakın olması sağlanacaktır.

Depremlere ait özelliklerin (M_w, PGA, PGV, PGV^2/PGA, $\ln I_a$ ve CAV_5) detaylı bilgisi (en küçük değer, ortalama değer, en büyük değer ve standart sapma) Tablo 5.2'de görülebilmektedir.

Tablo 5.2'den görülebileceği üzere veri setinde yer alan depremlerin en tarihli olanı 1923 Kanto ve en günceli 2011 Christchurch depremi iken depremlerin büyüklükleri 6.3 ile 9.2 arasında değişmektedir. En büyük yer ivmesinde ise ortalama değerlerin 0.12 ile 0.7 arasında değiştiği, en düşük PGA değerinin 0.12 ile 2003 San Simeon depreminde, en yüksek PGA değerinin ise 0.79 ile 1999 Chi-Chi depreminde ölçüldüğü görülebilmektedir. Bir diğer deprem özelliği olan PGV^2/PGA'da ise ortalama değerlerin 1.38 ile 23.52 arasında değiştiği görülebilmektedir. Veri setine eklenen bir diğer değişken olan Arias şiddeti logaritmik ölçekte olduğundan değerler -3.68 ile 1.97 arasında değişmektedir. Kümülatif mutlak değerde ise bu dağılım minimum 7.13 ile 2011 Christchurch depremi ve maksimum 20.8 değeri ile 1964 Alaska depremin görülmektedir. Tablo 5.2'den de görülebileceği üzere depreme ait değişkenlerin

Tablo 5.1 Veri setinde yer alan değişkenlerin özellikleri

Değişkenin İsmi	Değişkenin Tanımı	Değişkenin İsmi	Değişkenin Tanımı
Deprem	Depremin bilgisi	FC_{15}	Düzeltmiş SPT-N vuruş sayısı 15ten küçük zemin tabakalarının ince dane içeriği
Sondaj Logu	Verinin alındığı sondaj logunun numarası	$D50_{15}$	Düzeltmiş SPT-N vuruş sayısı 15ten küçük zemin tabakalarının ortalama dane çapı
Fay Tipi	Depremin oluşum	z_{cr}	Zemin profilinde sıvılaşan en kritik zemin tabakasının derinliği
M_w	Depremin moment büyüklüğü	Log LSI	Sıvılaşma Şiddeti İndeksi
PGA	En büyük yer ivmesi	V_s	Kayma dalgası hızı
R	Sismik kaynağa uzaklık	PGV	En büyük yer hızı
R*	Youd vd. (2002) tarafından önerilen modifiye sismik kaynağa uzaklık	PGV^2/PGA	En büyük yer hızının karesinin, en büyük yer ivmesine oranı
S	Yüzey eğimi	$\ln I_a$	Arias Şiddeti
W	Serbest yüzey oranı	$\ln CAV_5$	5 cm/sn2'den küçük amplitüdlerin elimine edilmesiyle elde edilen kümülatif mutlak hız
T_{15}	Düzeltimiş SPT-N vuruş sayısı 15'ten küçük, sıvılaşan zemin tabakalarının kümülatif kalınlığı	Gözlem	Deprem neticesinde oluşan sıvılaşma kaynaklı yanal yayılma miktarı
NT	Sıvılaşmayan üst tabakanın kalınlığı		

ortalamalarının kendi içinde genel olarak benzer ölçeklerde olduğu ancak bazı depremlerde bazı değişkenlerin yüksek standart sapmaya neden oluşu eğitim ve test aşamasında yaşanabilecek olası problemlere işaret edebilmektedir.

Zemin özelliklerine (T_{15}, NT, FC_{15}, $D50_{15}$, z_{cr}, logLSI and V_s) bakılacak olursa düzeltmiş vuruş sayısı 15'ten küçük sıvılaşan tabakaların kümülatif kalınlığı olan T_{15} değerinin ortalama 0.55 ile 13.02 arasında değiştiğini, sıvılaşmayan üst tabaka kalınlığının ise ortalama 1.37 ile 8.57 arasında değiştiği görülebilmektedir. Tablo 5.3'e dikkatli bakıldığında bazı depremlere (1964 Alaska, 1999 Chi-Chi, 1948 Fukui, 1989 Loma Prieta, 1983 Nihongai-Chubu, 1964 Niigata ve 1971 San Fernando) ait T_{15} değerlerinin minimum 0 olduğu görülebilmektedir. Bu durum bu bahsi geçen verilerde sıvılaşan tabaka kalınlığının bulunmadığı anlamını taşımaktadır. Sıvılaşma kaynaklı yanal yayılmaların tahmini modellendiği için model eğitim ve test aşamasında ilgili verilerin veri setinden çıkartılması problemin tanımına daha uygun verilerle çalışabilmesine olanak sağlayabilecektir. Veri setinde yer alan FC_{15} değişkeni incelendiğinde ise minimum 0 ve maksimum 47 arasında değiştiği görülmektedir. 1971 San Fernando depremine ait 47 FC_{15} değerine sahip verinin yeniden gözden geçirilmesi gerektiği, sıvılaşma probleminin doğası gereği, düşünülebilir. Ortalama dane çapı ($D50_{15}$) incelendiğinde ise ortalama 0.11 ile 6.13 arasında değiştiği, ancak genel olarak değerlerin 1.5'ten küçük olduğu görülmektedir. Sıvılaşan en kritik tabakanın derinliği z_{cr} incelendiğinde maksimum 18.5 değerinin veri setinde yer aldığı

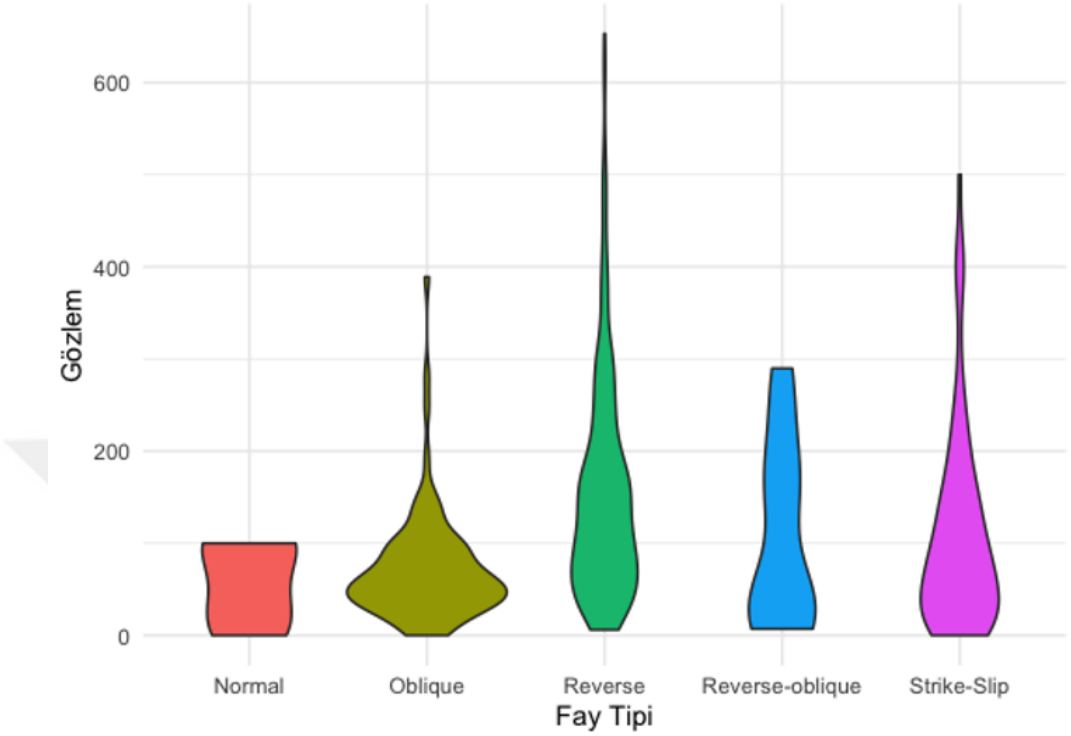
görülmektedir. Zemin tabakalarının sıvılaşma potansiyeli indekslerinde ise ortalama değerlerin birbirlerine yakın olduğu görülebilmektedir. Son olarak kayma dalgası V_s incelendiğinde ortalama 114 ile 193.6 değerlerine rastlandığı görülmektedir.

Arazi özelliklerine (R, R*, S ve W) Tablo 5.4'ten bakıldığında ise sismik kaynağa olan uzaklığı temsil eden R değerinin minimum 0.2 ile maksimum 100 ile sınırlandığı görülebilmektedir. Depremler ayrı ayrı incelendiğinde iki deprem hariç (1964 Alaska ve 1999 Kocaeli) bütün depremlerdeki R değerinin standart sapmasının düşük olduğu görülebilmektedir. Buradan sıvılaşma kaynaklı yanal yayılmaların sismik kaynaktan belirli bir uzaklıkla sınırlandığı veya yalnızca belirli bir alandan sağlıklı veriye erişilebildiği yorumu yapılabilmektedir. Youd vd. (2002)'nin önerdiği modifiye uzaklık R* incelendiğinde R'de gözlenen durumun aynısı görülebilmektedir. Yüzey eğimine bakıldığında 1983 Borah Peak depremine ait ortalama 9.25 ve maksimum 11 değerlerinin sıvılaşma kaynaklı yanal yayılma problemi kapsamı dışına taşabileceği düşünülerek bu verilerin yeniden gözden geçirilmesi gerekliliği ortaya çıkmaktadır. Arazi özelliklerinden sonuncusu olan serbest yüzey oranı W incelendiğinde minimum 0 değeri ile 1995 Hyogoken-Nanbu depremine ait maksimum 56.82 değerinin geniş bir aralıkta olduğu bilgisine erişilebilmektedir.

Bağımsız değişkenlerin ardından bağımlı değişken olan yanal deplasman miktarı gözlem değişkeni incelendiğinde, minimum 0 değeri Tablo 5.5'te görülebilmektedir. Bu nedenle bu değerlere ait verilerin yeniden değerlendirilmesi gerekliliği ortadadır. Veri seti incelendiğinde bu verilerin oldukça az sayıda oluşu algoritmaya sıfır-yerdeğiştirmeyi öğretmek için yetersiz kalabileceğinden bu verilerin veri setinden çıkartılması düşünülebilir. Tablo 5.5 incelendiğinde en büyük deplasmanların 653 cm ile 1964 Niigata depreminde gözlendiği görülebilmektedir.

Bağımlı değişkenin fay tipi üzerinden yorumu ise Şekil 5.3 üzerinden yapılabilir. Şekildeki keman grafiği (violin plot) incelendiğinde normal faylarda gözlenen/raporlanan sıvılaşma kaynaklı yanal yayılmaların 100 cm ile sınırlandığını, veri sayısındaki azlığa paralel olarak verilerde aykırı değerlerin azlığı dikdörtgene yakın şeklinden anlaşılabilmektedir. Oblik fay tipi incelendiğinde yaklaşık 150 cm'den sonra aykırı değerlerin mevcut olduğunu ancak genel olarak gözlenen deplasmanların 50 cm civarında olduğu görülebilmektedir. Ters faylanmada meydana gelen sıvılaşma kaynaklı yanal yayılmaların ise diğer fay tiplerine göre daha yüksek deplasmanlara neden olabildiği görülebilmektedir. Genel olarak 200 cm'e kadar düzgüne yakın dağılan verilerin bu değerden (özellikle 300 cm'den) sonra aykırı, uç değerlere eriştiği görülebilmektedir. Ters-oblik faylanmanın yanal yayılma miktarındaki etkisi incelendiğinde, yaklaşık 280 cm ile sınırlandığını genel dağılımın ise düzgüne yakın olduğu görülebilmektedir. Son faylanma tipi olan doğrultu atımlı faylanmada ise ters

faylanmaya benzer olarak 500 cm'ye kadar aykırı değerlere erişilebildiğini, grafiğin alt kısımlarının ise 50 cm yakınında (oblik faylanma kadar olmasa da) toplandığı görülebilmektedir.



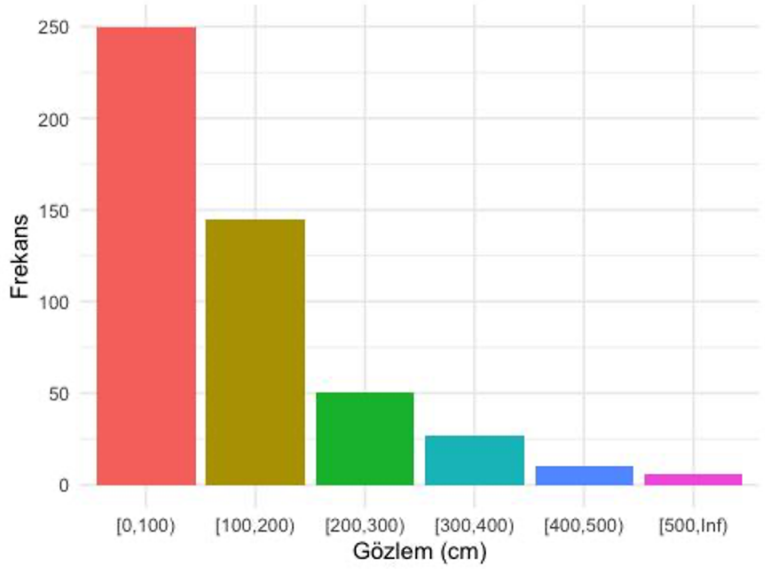
Şekil 5.3 Faylanma yanal deplasman miktarı arasındaki ilişkiyi anlatan keman grafiği (violin plot)

Bağımlı değişken olan gözlem değişkeni tüm veri setinde adet olarak incelendiğinde ise 0-100 cm arasındaki gözlem adetinin 250, 100-200 cm arasındaki gözlem adetinin 145, 200-300 cm arasındaki gözlem adetinin 50, 300-400 cm arasındaki gözlem adetinin 27, 400-500 cm arasındaki gözlem adetinin 10 ve 500 cm'den büyük gözlem adetinin ise 6 adet olduğu Şekil 5.4'daki çubuk grafiğinden görülebilmektedir.

Bir yapay zekâ modelinde bağımsız değişkenler ile bağımlı değişkenin arasındaki pozitif veya negatif yönlü korelasyon önemli olduğu kadar bağımsız değişkenlerin kendi aralarındaki korelasyon da oldukça önemlidir. Geçmiş çalışmalarda kullanılan parametrelere ek olarak bu çalışmada eklenen yeni parametrelerin yanal deplasman miktarı ile ne kadar korelasyon gösterdiği Şekil 5.5'de yer alan ısı haritasından ve Tablo 5.6'daki korelasyon değerlerinden görülebilmektedir.

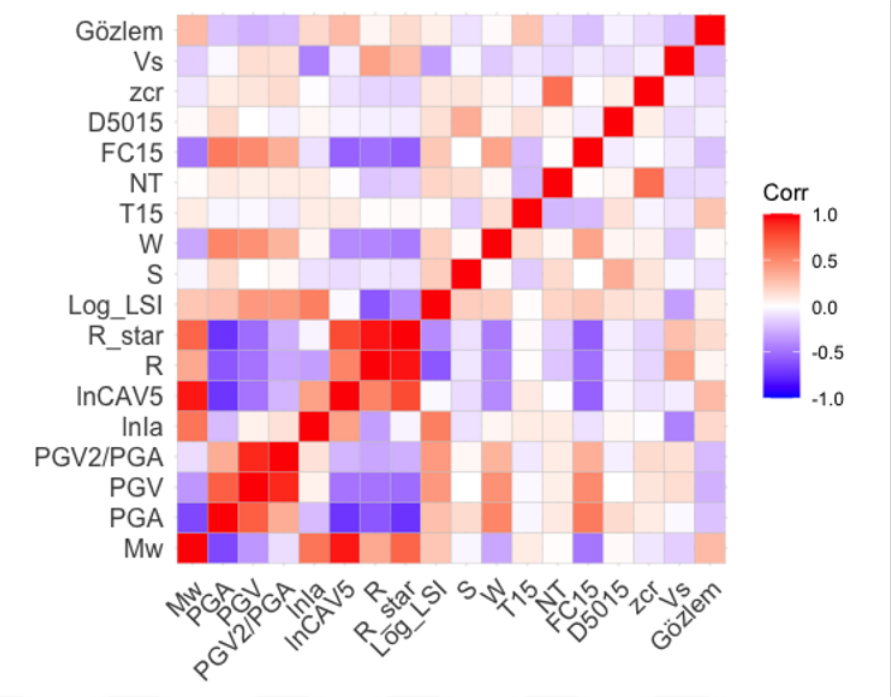
Şekil 5.5 ve Tablo 5.6'dan da görülebileceği gibi veri setinde yer alan parametrelerin yanal deplasman ile korelasyonları mutlak değerce büyükten küçüğe aşağıdaki şekildedir:

- $\ln CAV_5$: 0.26



Şekil 5.4 Tüm veri setinde yer alan gözlem değerlerinin dağılımlarını gösteren çubuk grafiği

- M_w: 0.25
- T_{15}: 0.24
- PGV: 0.23
- Vs: 0.2
- PGA: 0.19
- lnI_a : 0.17
- PGV^2/PGA: 0.17
- FC_{15}: 0.14
- R: 0.13
- NT: 0.12
- R*: 0.09
- z_{cr}: 0.08
- $D50_{15}$: 0.06
- S: 0.09
- W: 0.03
- logLSI: 0.03



Şekil 5.5 Değişkenlerin korelasyon değerlerini gösteren ısı haritası

Korelasyon değerleri incelendiğinde veri setine yeni eklenen CAV_5, PGV, V_s, I_a, PGV^2/PGA gibi değerlerin üst sıralarda olduğu, geçmiş çalışmalarda kullanılan çoğu parametrenin ise alt sıralarda yer aldığı görülebilmektedir. Bunun nedeni yeni eklenen parametrelerin gerçekten yanal yerdeğiştirme miktarı ile yüksek korelasyon göstermesi nedeni ile olabileceği gibi, mevcut M_w ile yeni eklenen parametrelerin yüksek korelasyon göstermesi, M_w değişkeninin de yanal yerdeğiştirme ile yüksek korelasyon göstermesi de olabilir. Analiz sonuçları alt başlıklarda değerlendirilecektir.

5.2 Modelin Oluşturulması

Oluşturulan veri seti ve veri setinin yapısı için gerçekleştirilen keşifçi veri analizi de düşünülerek tezin ana amaçlarından biri olan depremin hız ile ilgili bileşeninin ve ölçütlerinin sıvılaşma kaynaklı yanal yayılmalar üzerindeki etkisi incelemek olduğundan veri seti ayrıca alt iki veri setine bölünmüştür. Bunlardan ilki geçmiş çalışmalarda kullanılan değişkenler (M_w, PGA, R, R*, S, W, T_{15}, NT, FC_{15}, $D50_{15}$, z_{cr}, logLSI, V_s) kullanılarak oluşturulan Veri Seti I ve yeni eklenen parametrelerin (M_w, PGA, R, R*, S, W, T_{15}, NT, FC_{15}, $D50_{15}$, z_{cr}, logLSI, V_s, PGV, PGV^2/PGA, lnIa, $\ln CAV_5$) de dahil olduğu Veri Seti II'dir. Yukarıda da değinildiği gibi daha önceki çalışmalardaki korelasyonlarda yer almayan CAV_5, PGVi I_a, V_s ve PGV^2/PGA bu çalışmalada ilk kez dikkate alınan parametrelerdir.

Her bir depreme ait değişkenler birbirileri arasında farklı dağılımlara sahip

olduğundan eğitim ve test veri setleri oluşturulurken verilerin %90'i eğitim %10'u ise test için rastgele olacak şekilde seçilmiştir. Veri setinin büyük bir çoğunluğu 1964 Niigata depreminden oluştuğundan bu depremden gelen veriler eğitim aşamasında baskın bir rol oynamaktadır. Bu nedenle analiz sonuçları iyileşinceye kadar veri seti tekrar tekrar rastgele olacak şekilde bölünmüştür. Veri setinde yer alan Çetin vd. (2002) tarafından derlenen, 1999 Kocaeli depremine ait dört veri (SPT-SH4, SPT-SH7, SPT-SH9 ve SPT-SH11 numaralı sondaj logları) doğrulama için ayrılmıştır.

Eğitim ve test veri setlerinin bölümünden sonra veri setleri yalnızca eğitim veri setinin ortalama ve standart sapma değerleri ile normalize edilmiştir. Normalizasyon aşamasında test veri setinden hesaplanmış herhangi bir bilginin kullanılmaması gerekmektedir [76].

Modelin kurulması aşamasında makine öğrenimi uygulamaları için Google Brain ekibi tarafından geliştirilen TensorFlow ve TensorFlow'un bir arayüzü gibi çalışan, yapay sinir ağları için geliştirilen Keras kütüphanesi kullanılmıştır.

Model karmaşıklığında aşırı öğrenme/yetersiz öğrenme arasındaki denge kurulmaya çalışılmış olup oluşturulan veri seti ile problemin çözümü için en uygun model mimarisi deneme yanılma yöntemi ile bulunmuştur. Yapılan analizler sonucunda en uygun mimarinin çıkış katmanı dahil olmak üzere dört katmanlı bir mimar ile sağlandığı görülmüştür. Katmanlarda kullanılan nöron sayıları da yine problemin doğası gereği deneme yanılma yöntemi ile Tablo 5.7'deki şekilde bulunmuştur.

Aşırı öğrenme problemi ile karşılaşılmadığından hiçbir katmana regularizasyon işlemi yapılmamış veya herhangi bir ara katmana drop-out katmanı eklenmemiştir. Katmanlarda kullanılan aktivasyon fonksiyonları da yine deneme yanılma ile elde edilmiş olup analiz sonuçlarında en optimum değerlerin bütün ara katmanlarda ReLu aktivasyon katsayısının kullanılması ile elde edildiği görülmüştür. Çıkış katmanı doğrusal bir katman olduğundan bu katmanda herhangi bir aktivasyon fonksiyonu kullanılmamıştır [76].

Modelin kurulumunda optimize edici (optimizer) olarak Adam, Adamax, RMSProp, SGD kullanılmış olup, en optimum sonuçların Adam optimize edici ile elde edildiği yapılan denemeler neticesinde görülmüştür.

Ağın kurumunda ağın yaptığı hatalardan öğrenebilmesi için kullanılan kayıp fonksiyonu için sıkça kullanılan ortalama kareler hatası, hata metriği olaraksa ortalama mutlak hata kullanılmıştır. Öğrenme oranı da yine diğer parametrelerde olduğu gibi deneme yanılma yöntemi ile 0.001 ve çağ sayısı olarak (epoch) 100 değeri seçilmiştir. 100 değerinden büyük çağ değerleri kullanımında model mimarisinde

yer alan nöron sayısının da fazla olması nedeni ile aşırı öğrenme problemi ile karşılaşılmıştır.

Kurulan model mimarisi yeni eklenen parametrelerin tahmin modeli üzerindeki etkisini daha iyi modelleyebilmek amacı ile her iki veri seti için de aynı tutulmuştur.

5.3 Analiz Sonuçları

Yapılan analizler sonucunda Veri Seti I ve Veri Seti II için elde edilen sonuçların detayları Tablo 5.8'deki gibidir.

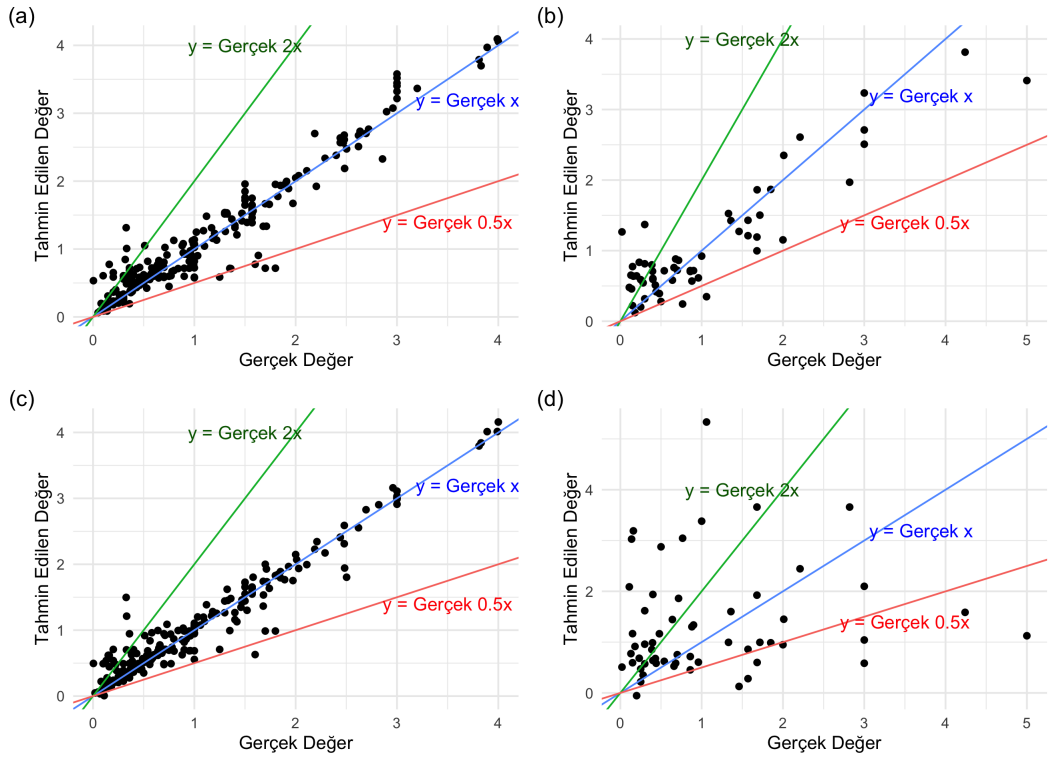
Tablo 5.8'den de görülebileceği üzere sadece geçmiş çalışmalarda kullanılan parametrelerle oluşturulan veri seti ile elde edilen sonuçlar, yeni eklenen hız bileşenlerini de içeren veri seti ile yapılan analizlere oranla daha iyi sonuç vermektedir. Bunun nedeni eklenen parametrelerin problemin çözümü için yeterli olmaması olabileceği gibi analizlerdeki optimizasyonun yeteri düzeyde iyi bir şekilde yapılamamış olması da olabilir.

Veri Seti II ile yapılan analizlerin sonucunda elde edilen değerlere bakıldığında modelin aşırı öğrenmeye yaklaştığını, eğitimdeki başarısını testte tam olarak gösteremediği görülebilmektedir.

Analizler sonucunda gerçek değerler ile modellerin tahmin ettiği değerlerin kıyaslandığı grafikler Şekil 5.6'de görülebilmektedir. Grafiklerden de anlaşılacağı üzere Veri Seti I ile kurulan modelin eğitim sonucunda (Şekil 5.6a) tahmin edilen değerler gerçek değerlere oldukça yakındır. Yalnızca 1.5 ve 3 metrelik yerdeğiştirmelerde ufak hatalar görülmekte, 0.5 metreden küçük yerdeğiştirmeler içinse tahminler 2x eğrisinin üzerinde çıkmaktadır. Aynı veri seti için test aşamasından ise (Şekil 5.6b) eğitimdekine benzer olarak 0.5 metreden küçük yerdeğiştirmeler için yapılan tahminlerin bir kısmı 2x eğrinin üzerinde yer almaktadır. Veri Seti II kullanılarak yapılan analizlerde ise eğitim aşamasının Veri Seti I'e oranla çok daha iyi olduğu görülebilmektedir (Şekil 5.6c). Tahmin değerleri genel olarak gerçek değerlere yakındır. Aynı veri setinden elde edilen test sonuçları ise (Şekil 5.6d) Veri Seti I'deki test aşamasındaki başarının yakalanamadığı, tahminlerin önemli bir kısmının 2x eğrisinin üzerinde olduğu görülebilmektedir.

5.4 Adapazarı Depremine Ait Verilerin Doğrulanması

Çetin vd. (2002) tarafından derlenen ve veri setinden doğrulama amacı ile çıkartılan SPT-SH4, SPT-SH7, SPT-SH9 ve SPT-SH11 numaralı sondaj loğlarına ait sonuçlar



Şekil 5.6 (a) Veri Seti I için eğitim, (b) Veri Seti I için test, (c) Veri Seti II için eğitim ve (d) Veri Seti II için test analiz sonuçları

Hamada vd. (1986), Youd vd. (2002) ve Kaya (2016)'nın kullanmış olduğu MLP (Multi Layer Perceptron, Çok Katmanlı Algılayıcı) yöntemi ile elde edilen sonuçlar ile karşılaştırılmıştır. Geliştirilen modellerin Adapazarı verilerini tahmin etmedeki başarısı Kaya (2016)'nın oluşturduğu tabloya, bu çalışmadan elde edilen sonuçlar eklenmesi ile Tablo 5.9'da sunulmuştur. Tablo 5.9'dan da görülebileceği gibi SH-4, SH-7 ve SH-11 numaralı sondaj logları için bu çalışma kapsamında geliştirilen modeller, diğer yöntemlere oranla daha iyi sonuç vermektedir.

Bu çalışma kapsamında geliştirilen modeller ayrı ayrı incelendiğinde ise hız ölçütleri kullanılarak geliştirilen modelin, kullanılmadan geliştirilen modele oranla daha iyi sonuç verdiği görülebilmektedir.

Bu çalışma kapsamında tatmin edici sonuçların elde edilmesi ile birlikte Bölüm 2'de yer alan yapay zekaya dayanan sıvılaşma kaynaklı yanal yayılma tahmin modellerine ait özet bilgiyi içeren tablo güncellenerek Tablo 5.10 elde edilmiştir. Tablo 5.10'da bu çalışma kapsamında geliştirilen her iki model ile de (Veri Seti I ve Veri Seti II için geliştirilen modeller) literatürdeki yapay zekaya dayalı diğer yöntemlerde elde edilen yüksek R^2 değerlerine oldukça yakın sonuçlar elde edildiği ve modellerin sıvılaşma kaynaklı yanal yayılmaların tahmini için kullanılabilecek alternatif yöntemlerden biri olabileceği görülmektedir.

Tablo 5.2 Deprem özelliklerine ait parametrelerin minimum, ortalama, maksimum ve standart sapma değerleri

	Mw			PGA		
Deprem	**Maks**	**Ort**	**Min**	**Maks**	**Ort**	**Min**
Alaska (1964)	9.20	9.20	9.20	0.39	0.30	0.21
Arjantin - San Juan (1977)	7.40	7.40	7.40	0.20	0.20	0.20
Borah Peak (1983)	6.90	6.90	6.90	0.60	0.54	0.35
Chi Chi (1999)	7.60	7.60	7.60	0.79	0.39	0.19
Christchurch (2011)	6.30	6.30	6.30	0.63	0.48	0.32
Darfield (2010)	7.10	7.10	7.10	0.42	0.20	0.17
Fukui (1948)	7.30	7.30	7.30	0.40	0.40	0.40
Guatemala (1976)	7.50	7.50	7.50	0.12	0.12	0.12
Hokkaida Nansei Oki (1993)	7.80	7.80	7.80	0.70	0.70	0.70
Hyogoken Nanbu (1995)	6.90	6.90	6.90	0.60	0.53	0.35
Imperial Valley (1979)	6.50	6.50	6.50	0.51	0.49	0.21
Kanto (1923)	7.90	7.90	7.90	0.25	0.24	0.20
Kocaeli (1999)	7.40	7.40	7.40	0.60	0.39	0.30
Loma Prieta (1989)	7.00	7.00	7.00	0.25	0.25	0.25
Luzon (1990)	7.60	7.60	7.60	0.20	0.20	0.20
Nihonkai Chubu (1983)	7.70	7.70	7.70	0.25	0.25	0.25
Niigata (1964)	7.50	7.50	7.50	0.19	0.19	0.19
Northridge (1994)	6.70	6.70	6.70	0.52	0.52	0.52
San Fernando (1971)	6.40	6.40	6.40	0.55	0.55	0.55
San Simeon (2003)	6.50	6.50	6.50	0.12	0.12	0.12
Superstition Hills (1987)	6.60	6.60	6.60	0.47	0.47	0.47
Tokachi-Oki (2003)	7.90	7.90	7.90	0.31	0.31	0.31
	PGV			**PGV2/PGA**		
Deprem	**Maks**	**Ort**	**Min**	**Maks**	**Ort**	**Min**
Alaska (1964)	90.94	81.93	74.26	26.78	23.52	21.62
Arjantin - San Juan (1977)	47.01	47.01	47.01	11.27	11.27	11.27
Borah Peak (1983)	32.39	26.30	8.01	1.78	1.38	0.19
Chi Chi (1999)	139.98	72.09	36.91	25.29	13.50	7.31
Christchurch (2011)	72.80	69.54	36.70	13.86	10.60	3.27
Darfield (2010)	44.90	39.67	35.70	11.42	8.16	4.49
Fukui (1948)	35.21	34.58	34.10	3.16	3.05	2.96
Guatemala (1976)	50.15	50.15	50.15	21.37	21.37	21.37
Hokkaida Nansei Oki (1993)	59.78	59.78	59.78	5.21	5.21	5.21
Hyogoken Nanbu (1995)	70.00	57.62	40.00	9.25	6.51	2.72
Imperial Valley (1979)	22.67	22.67	22.67	2.50	1.15	1.03
Kanto (1923)	25.06	24.33	22.14	2.56	2.55	2.50
Kocaeli (1999)	77.00	64.63	47.01	15.11	11.45	3.76
Loma Prieta (1989)	19.19	19.19	19.19	1.50	1.50	1.50
Luzon (1990)	53.34	53.34	53.34	14.51	14.51	14.51
Nihonkai Chubu (1983)	35.00	35.00	35.00	5.00	5.00	5.00
Niigata (1964)	30.00	30.00	30.00	4.83	4.83	4.83
Northridge (1994)	27.27	27.27	27.27	1.46	1.46	1.46
San Fernando (1971)	62.51	59.74	58.75	7.24	6.62	6.40
San Simeon (2003)	22.67	22.67	22.67	4.37	4.37	4.37
Superstition Hills (1987)	78.36	78.36	78.36	13.32	13.32	13.32
Tokachi-Oki (2003)	39.90	39.90	39.90	5.24	5.24	5.24
	lnIa			**lnCAV5**		
Deprem	**Maks**	**Ort**	**Min**	**Maks**	**Ort**	**Min**
Alaska (1964)	-	-	-	20.80	20.33	19.75
Arjantin - San Juan (1977)	0.48	0.48	0.48	11.80	11.80	11.80
Borah Peak (1983)	-0.66	-1.42	-3.68	12.03	10.60	10.12
Chi Chi (1999)	1.33	0.98	0.87	12.39	12.29	11.95
Christchurch (2011)	-0.36	-0.51	-0.58	7.31	7.26	7.13
Darfield (2010)	-0.30	-2.23	-2.41	11.82	11.71	10.46
Fukui (1948)	-0.15	-0.20	-0.23	11.85	11.82	11.79
Guatemala (1976)	0.56	0.56	0.56	12.19	12.19	12.19
Hokkaida Nansei Oki (1993)	-	-	-	13.36	13.36	13.36
Hyogoken Nanbu (1995)	0.44	0.29	0.02	9.82	9.60	9.47
Imperial Valley (1979)	-1.61	-1.61	-1.61	8.04	8.04	8.04
Kanto (1923)	-	-	-	15.90	15.74	15.68
Kocaeli (1999)	1.94	0.82	-1.44	12.58	9.37	7.63
Loma Prieta (1989)	-1.18	-1.18	-1.18	11.10	11.10	11.10
Luzon (1990)	0.12	0.12	0.12	12.42	12.42	12.42
Nihonkai Chubu (1983)	-	-	-	13.84	13.84	13.84
Niigata (1964)	0.82	0.82	0.82	12.82	12.82	12.82
Northridge (1994)	-0.20	-0.20	-0.20	9.02	9.02	9.02
San Fernando (1971)	0.16	0.15	0.15	7.15	7.15	7.15
San Simeon (2003)	-0.43	-0.43	-0.43	8.21	8.21	8.21
Superstition Hills (1987)	1.97	1.97	1.97	8.45	8.45	8.45
Tokachi-Oki (2003)	-	-	-	13.74	13.74	13.74

Tablo 5.3 Zemin özelliklerine ait parametrelerin minimum, ortalama, maksimum ve standart sapma değerleri

	T15			NT		
Deprem	**Maks**	**Ort**	**Min**	**Maks**	**Ort**	**Min**
Alaska (1964)	20.00	7.30	0.00	8.98	2.09	0.00
Arjantin - San Juan (1977)	5.41	3.96	2.00	5.80	5.03	4.73
Borah Peak (1983)	3.82	2.72	1.61	9.36	4.73	1.01
Chi Chi (1999)	7.90	3.70	0.00	11.00	3.39	0.70
Christchurch (2011)	14.50	5.00	0.75	7.25	2.39	0.10
Darfield (2010)	12.05	4.65	1.20	6.00	2.15	0.12
Fukui (1948)	6.20	3.49	0.00	14.40	5.90	2.20
Guatemala (1976)	6.71	3.76	1.52	13.50	8.21	4.40
Hokkaida Nansei Oki (1993)	8.60	5.42	3.90	2.50	2.10	1.40
Hyogoken Nanbu (1995)	16.50	13.02	1.00	14.00	3.57	2.50
Imperial Valley (1979)	4.62	3.33	1.15	1.85	1.52	0.00
Kanto (1923)	10.08	5.24	2.40	2.73	1.37	0.50
Kocaeli (1999)	12.60	4.52	0.30	6.35	1.80	0.50
Loma Prieta (1989)	0.95	0.55	0.00	5.65	3.34	1.55
Luzon (1990)	14.37	11.27	7.60	5.50	2.78	1.78
Nihonkai Chubu (1983)	8.07	3.36	0.00	16.00	3.37	0.60
Niigata (1964)	16.00	5.95	0.00	11.10	2.08	0.00
Northridge (1994)	2.65	2.43	2.20	8.30	7.35	6.40
San Fernando (1971)	14.15	6.35	0.00	15.00	8.57	1.80
San Simeon (2003)	3.80	2.27	1.00	3.60	2.72	1.05
Superstition Hills (1987)	3.22	2.27	0.90	3.25	3.01	2.60
Tokachi-Oki (2003)	1.00	1.00	1.00	7.50	7.00	6.50
	FC15			**D5015**		
Deprem	**Maks**	**Ort**	**Min**	**Maks**	**Ort**	**Min**
Alaska (1964)	26.67	12.22	0.00	3.66	0.95	0.00
Arjantin - San Juan (1977)	27.50	21.88	20.00	0.14	0.13	0.10
Borah Peak (1983)	22.84	16.29	3.33	10.16	6.13	4.27
Chi Chi (1999)	46.50	24.83	0.00	1.59	0.23	0.00
Christchurch (2011)	55.92	11.29	1.74	0.56	0.21	0.13
Darfield (2010)	41.15	14.80	1.74	0.31	0.19	0.10
Fukui (1948)	13.75	4.70	0.00	0.42	0.25	0.00
Guatemala (1976)	10.00	10.00	10.00	1.00	1.00	1.00
Hokkaida Nansei Oki (1993)	0.00	0.00	0.00	1.79	0.73	0.37
Hyogoken Nanbu (1995)	20.00	13.04	9.27	2.32	1.46	0.55
Imperial Valley (1979)	35.00	21.03	14.00	0.17	0.11	0.08
Kanto (1923)	50.00	15.58	3.00	0.30	0.26	0.10
Kocaeli (1999)	52.00	21.93	6.02	7.70	1.45	0.02
Loma Prieta (1989)	4.00	2.67	0.00	1.15	0.77	0.00
Luzon (1990)	18.75	17.41	15.00	0.20	0.18	0.16
Nihonkai Chubu (1983)	5.00	3.63	0.00	0.35	0.33	0.00
Niigata (1964)	30.00	7.47	0.00	3.33	0.34	0.00
Northridge (1994)	35.00	28.10	21.20	0.06	0.06	0.05
San Fernando (1971)	47.00	41.37	0.00	0.08	0.07	0.00
San Simeon (2003)	35.00	18.33	15.00	0.90	0.62	0.05
Superstition Hills (1987)	33.00	26.02	22.00	0.09	0.09	0.07
Tokachi-Oki (2003)	5.00	5.00	5.00	1.00	1.00	1.00
	zcr			**Log_LSI**		
Deprem	**Maks**	**Ort**	**Min**	**Maks**	**Ort**	**Min**
Alaska (1964)	16.82	6.57	1.22	1.92	1.45	1.07
Arjantin - San Juan (1977)	12.19	8.73	4.73	1.31	1.31	1.31
Borah Peak (1983)	11.43	6.15	1.74	0.86	0.45	-0.80
Chi Chi (1999)	18.30	4.63	0.70	3.35	2.10	1.72
Christchurch (2011)	13.80	5.64	0.10	0.64	0.48	0.41
Darfield (2010)	19.13	4.73	0.12	1.04	-0.09	-0.17
Fukui (1948)	17.00	9.24	2.90	0.84	0.81	0.79
Guatemala (1976)	15.32	15.06	14.86	1.40	1.40	1.40
Hokkaida Nansei Oki (1993)	4.50	2.70	1.40	1.67	1.67	1.67
Hyogoken Nanbu (1995)	14.00	6.95	3.50	1.34	1.15	0.86
Imperial Valley (1979)	5.00	3.27	1.60	0.50	0.50	0.50
Kanto (1923)	12.73	6.31	0.80	0.08	0.04	-0.10
Kocaeli (1999)	11.64	5.67	1.38	3.73	1.96	0.30
Loma Prieta (1989)	14.90	6.68	1.55	0.14	0.14	0.14
Luzon (1990)	10.38	6.63	2.69	1.49	1.49	1.49
Nihonkai Chubu (1983)	19.00	7.16	0.60	0.78	0.78	0.78
Niigata (1964)	18.50	3.91	0.01	0.80	0.80	0.80
Northridge (1994)	9.00	8.25	7.50	0.68	0.68	0.68
San Fernando (1971)	16.00	9.18	1.80	3.57	3.02	2.83
San Simeon (2003)	5.50	3.98	2.75	0.50	0.50	0.50
Superstition Hills (1987)	5.03	4.23	3.20	0.59	0.59	0.59
Tokachi-Oki (2003)	11.00	11.00	11.00	1.76	1.76	1.76
	Vs					
Deprem	**Maks**	**Ort**	**Min**			
Alaska (1964)	186.00	178.91	153.00			
Arjantin - San Juan (1977)	156.00	149.75	141.00			
Borah Peak (1983)	175.00	160.00	154.00			
Chi Chi (1999)	194.00	171.15	152.00			
Christchurch (2011)	201.00	193.52	155.00			
Darfield (2010)	257.00	225.88	196.00			
Fukui (1948)	189.00	189.00	189.00			
Guatemala (1976)	167.00	161.33	150.00			
Hokkaida Nansei Oki (1993)	134.00	134.00	134.00			
Hyogoken Nanbu (1995)	189.00	161.62	152.00			
Imperial Valley (1979)	188.00	161.08	125.00			
Kanto (1923)	-	-	-			
Kocaeli (1999)	210.00	176.33	93.00			
Loma Prieta (1989)	-	-	-			
Luzon (1990)	148.00	114.00	15.00			
Nihonkai Chubu (1983)	188.00	180.92	173.00			
Niigata (1964)	179.00	173.21	169.00			
Northridge (1994)	143.00	143.00	143.00			
San Fernando (1971)	179.00	165.20	154.00			
San Simeon (2003)	187.00	166.50	144.00			
Superstition Hills (1987)	164.00	149.83	139.00			
Tokachi-Oki (2003)	187.00	184.50	182.00			

Tablo 5.4 Arazi özelliklerine ait parametrelerin minimum, ortalama, maksimum ve standart sapma değerleri

	R			R*		
Deprem	**Maks**	**Ort**	**Min**	**Maks**	**Ort**	**Min**
Alaska (1964)	100.00	66.36	35.00	453.18	419.54	388.18
Arjantin - San Juan (1977)	10.00	10.00	10.00	18.83	18.83	18.83
Borah Peak (1983)	78.00	27.00	10.00	81.17	30.17	13.17
Chi Chi (1999)	7.50	6.00	1.00	20.80	19.30	14.30
Christchurch (2011)	9.00	8.28	6.70	9.93	9.21	7.63
Darfield (2010)	45.00	41.11	10.00	49.78	45.89	14.78
Fukui (1948)	17.00	16.57	16.00	24.19	23.76	23.19
Guatemala (1976)	10.00	10.00	10.00	20.84	20.84	20.84
Hokkaida Nansei Oki (1993)	10.00	10.00	10.00	30.04	30.04	30.04
Hyogoken Nanbu (1995)	10.00	7.12	5.50	13.17	10.29	8.67
Imperial Valley (1979)	10.00	10.00	10.00	11.40	11.40	11.40
Kanto (1923)	100.00	85.00	80.00	124.60	109.60	104.60
Kocaeli (1999)	35.00	15.31	0.50	43.83	24.14	9.33
Loma Prieta (1989)	27.20	27.20	27.20	31.09	31.09	31.09
Luzon (1990)	10.00	10.00	10.00	23.30	23.30	23.30
Nihonkai Chubu (1983)	27.00	27.00	27.00	43.33	43.33	43.33
Niigata (1964)	21.00	21.00	21.00	31.84	31.84	31.84
Northridge (1994)	10.00	10.00	10.00	12.10	12.10	12.10
San Fernando (1971)	0.50	0.42	0.20	1.64	1.56	1.34
San Simeon (2003)	10.00	10.00	10.00	11.40	11.40	11.40
Superstition Hills (1987)	10.00	10.00	10.00	11.71	11.71	11.71
Tokachi-Oki (2003)	10.00	10.00	10.00	34.60	34.60	34.60
	S			**W**		
Deprem	**Maks**	**Ort**	**Min**	**Maks**	**Ort**	**Min**
Alaska (1964)	0.70	0.16	0.05	48.98	13.95	0.00
Arjantin - San Juan (1977)	1.00	1.00	1.00	0.00	0.00	0.00
Borah Peak (1983)	11.00	9.25	4.00	0.00	0.00	0.00
Chi Chi (1999)	1.00	1.00	1.00	10.00	10.00	10.00
Christchurch (2011)	2.80	0.39	0.00	17.00	4.96	0.00
Darfield (2010)	6.20	0.49	0.00	33.00	3.39	0.00
Fukui (1948)	2.00	2.00	2.00	19.81	5.34	1.23
Guatemala (1976)	5.24	4.66	3.50	1.03	0.86	0.76
Hokkaida Nansei Oki (1993)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Hyogoken Nanbu (1995)	0.10	0.00	0.00	56.82	14.90	0.00
Imperial Valley (1979)	5.26	2.39	0.56	10.66	6.94	0.00
Kanto (1923)	0.70	0.60	0.40	0.00	0.00	0.00
Kocaeli (1999)	17.00	3.49	0.00	20.00	6.88	0.00
Loma Prieta (1989)	0.00	0.00	0.00	32.69	22.51	4.91
Luzon (1990)	0.50	0.50	0.50	50.00	16.27	1.05
Nihonkai Chubu (1983)	5.90	1.59	0.20	0.00	0.00	0.00
Niigata (1964)	10.00	0.50	0.00	19.72	0.60	0.00
Northridge (1994)	1.00	1.00	1.00	0.00	0.00	0.00
San Fernando (1971)	1.23	0.32	0.00	20.30	8.69	0.00
San Simeon (2003)	1.00	0.55	0.10	0.00	0.00	0.00
Superstition Hills (1987)	0.47	0.47	0.47	41.38	23.13	7.50
Tokachi-Oki (2003)	0.10	0.10	0.10	0.00	0.00	0.00

Tablo 5.5 Yerdeğiştirme miktarının depremlere göre minimum, ortalama, maksimum ve standart sapma değerleri

	Gözlem		
Deprem	**Maks**	**Ort**	**Min**
Alaska (1964)	244.00	156.09	30.00
Arjantin - San Juan (1977)	200.00	125.00	100.00
Borah Peak (1983)	100.00	57.50	0.00
Chi Chi (1999)	383.00	145.15	16.00
Christchurch (2011)	106.00	50.51	0.40
Darfield (2010)	180.00	76.69	15.00
Fukui (1948)	389.00	137.86	59.00
Guatemala (1976)	0.00	0.00	0.00
Hokkaida Nansei Oki (1993)	130.58	85.06	57.00
Hyogoken Nanbu (1995)	282.00	109.52	20.00
Imperial Valley (1979)	424.00	166.44	0.00
Kanto (1923)	300.00	262.50	150.00
Kocaeli (1999)	240.00	64.06	0.00
Loma Prieta (1989)	28.00	20.00	7.00
Luzon (1990)	500.00	312.50	150.00
Nihonkai Chubu (1983)	269.45	111.40	9.20
Niigata (1964)	653.00	160.76	6.00
Northridge (1994)	100.00	100.00	100.00
San Fernando (1971)	289.74	120.79	13.81
San Simeon (2003)	30.00	25.00	10.00
Superstition Hills (1987)	23.00	13.50	0.00
Tokachi-Oki (2003)	20.00	17.00	14.00

Tablo 5.6 Değişkenlere ait korelasyon değerleri

	Mw	PGA	R	R*	S	W	T15	NT	FC15	D5015	zcr	LogLSI	Vs	PGV	PGV2/PGA	lnIa	lnCAV5	Gözlem
Mw	1	-0,52	0,56	0,66	-0,02	-0,19	0,04	-0,1	-0,47	0,08	-0,02	0,08	-0,13	-0,16	0,16	0,55	0,96	0,25
PGA	-0,52	1	-0,44	-0,17	0,09	0,45	0,01	0,17	0,54	0,13	0,09	0,38	-0,07	0,66	0,26	-0,22	-0,58	-0,19
R	0,56	-0,44	1	0,67	-0,05	-0,22	-0,02	-0,21	-0,34	0,03	-0,05	-0,47	0,33	-0,27	0	-0,33	0,67	0,13
R*	0,66	-0,17	0,67	1	-0,06	0,08	0,05	-0,09	-0,15	0,09	0,03	-0,03	0,06	0,14	0,43	-0,05	0,67	0,09
S	-0,02	0,09	-0,05	-0,06	1	-0,03	-0,17	0,07	-0,05	0,33	0,08	0,12	-0,02	-0,03	0	-0,1	-0,08	-0,09
W	-0,19	0,45	-0,22	0,08	-0,03	1	0,08	0,12	0,37	0,04	0,07	0,24	-0,16	0,45	0,33	0,02	-0,27	0,03
T15	0,04	0,01	-0,02	0,05	-0,17	0,08	1	-0,21	-0,11	0,11	-0,04	0,05	-0,09	0,04	0,01	0,08	0,04	0,24
NT	-0,1	0,17	-0,21	-0,09	0,07	0,12	-0,21	1	0,15	-0,01	0,61	0,32	-0,11	0,09	0,02	0,07	-0,12	-0,12
FC15	-0,47	0,54	-0,34	-0,15	-0,05	0,37	-0,11	0,15	1	-0,09	0,04	0,33	-0,04	0,46	0,25	-0,08	-0,52	-0,14
D5015	0,08	0,13	0,03	0,09	0,33	0,04	0,11	-0,01	-0,09	1	0,01	0,08	-0,1	0,03	0,03	-0,01	0,04	-0,06
zcr	-0,02	0,09	-0,05	0,03	0,08	0,07	-0,04	0,61	0,04	0,01	1	0,15	-0,04	0,11	0,1	-0,03	-0,04	-0,08
LogLSI	0,08	0,38	-0,47	-0,03	0,12	0,24	0,05	0,32	0,33	0,08	0,15	1	-0,34	0,48	0,38	0,49	-0,12	0,03
Vs	-0,13	-0,07	0,33	0,06	-0,02	-0,16	-0,09	-0,11	-0,04	-0,1	-0,04	-0,34	1	0,11	0,12	-0,44	-0,05	-0,2
PGV	-0,16	0,66	-0,27	0,14	-0,03	0,45	0,04	0,09	0,46	0,03	0,11	0,48	0,11	1	0,85	0,06	-0,28	-0,23
PGV2/PGA	0,16	0,26	0	0,43	0	0,33	0,01	0,02	0,25	0,03	0,1	0,38	0,12	0,85	1	0,12	0,05	-0,17
lnIa	0,55	-0,22	-0,33	-0,05	-0,1	0,02	0,08	0,07	-0,08	-0,01	-0,03	0,49	-0,44	0,06	0,12	1	0,36	0,17
lnCAV5	0,96	-0,58	0,67	0,67	-0,08	-0,27	0,04	-0,12	-0,52	0,04	-0,04	-0,12	-0,05	-0,28	0,05	0,36	1	0,26
Gözlem	0,25	-0,19	0,13	0,09	-0,09	0,03	0,24	-0,12	-0,14	-0,06	-0,08	0,03	-0,2	-0,23	-0,17	0,17	0,26	1
	Mw	**PGA**	**R**	**R***	**S**	**W**	**T15**	**NT**	**FC15**	**D5015**	**zcr**	**LogLSI**	**Vs**	**PGV**	**PGV2/PGA**	**lnIa**	**lnCAV5**	**Gözlem**

Tablo 5.7 Model mimarisine ilişkin detaylar

Katman Numarası	**Nöron Sayısı**	**Regularizasyon**	**Drop-out**	**Aktivasyon Fonksiyonu**
1	300	Kullanılmadı	Kullanılmadı	ReLu
2	300	Kullanılmadı	Kullanılmadı	ReLu
3	300	Kullanılmadı	Kullanılmadı	ReLu
4	1	Kullanılmadı	Kullanılmadı	Kullanılmadı

Tablo 5.8 Analiz sonuçları

Veri Seti I			**Veri Seti II**		
Eğitim			**Eğitim**		
MSE	**MAE**	**R^2**	**MSE**	**MAE**	**R^2**
0.06	0.16	0.92	0.05	0.13	0.93
Test			**Test**		
MSE	**MAE**	**R^2**	**MSE**	**MAE**	**R^2**
0.22	0.35	0.8	0.36	0.45	0.72
MSE: Ortalama kareler hatası (mean squared error) MAE: Ortalama mutlak hata (mean absolute error)					

Tablo 5.9 Adapazarı Depremine ait verilerin doğrulanmasına ilişkin elde edilen sonuçlar

	SPT-SH4	SPT-SH7	SPT-SH9	SPT-SH11
Gözlem (cm)	130	70	20	70
Hamada vd. (1986, 1987)	500	320	230	300
Youd vd. (2002)	330	270	230	270
Kaya (2016)(MLP)	69	30	36	31
Bu çalışma (Veri Seti I ile oluşturulan model)	97	71	64	99
Bu çalışma (Veri Seti II ile oluşturulan model)	101	85	51	53

Tablo 5.10 Çalışmanın sonuçlarını da içeren, sıvılaşma kaynaklı yanal yayılma tahmininde yapay zekaya dayanan yöntemlerin özeti

Referans	Yöntem	Parametreler	Veri Seti	Veri Sayısı	Veri Kaynağı	Doğrulama*	R2 x 100 (Eğitim)	R2 x 100 (Test)
Wang ve Rahman (1999) [64]	Sinir Ağı	M, R, S, W, T_{15}, F_{15}	Bartlett ve Youd (1992)	467	SPT	Yapılmadı	85.6 (SY)	82.1 (SY)
							71.1 (HE)	60.2 (HE)
Baziar ve Ghorbani (2005) [65]	Yapay Sinir Ağları	M, R, T_{15}, F_{15}, $D50_{15}$, S, W	Youd vd. (2002)	484	SPT	Yapılmadı *	95	85
Javadi vd. (2006) [58]	Genetik Programlama	M, R, F_{15}, T_{15}, W, $D50_{15}$	Youd vd. (2002)	484	SPT	Yapıldı	92.1 (SY)	85.3 (SY)
							90.8 (HE)	91.8 (HE)
Garcia vd. (2008) [66]	Sinir Ağı ve Bulanık Sistem	M_w, R*, A, S, W, L, T15, F_{15}, $D50_{15}$	Youd vd. (2002)	484	SPT	Yapılmadı	99.5	97
Siyahi vd. (2008) [67]	Sinir Ağı	ML, σ_0, σ'_0, N, a/g, τ_{ort}/σ_0, F, D_{50}	Tokimatsu ve Yoshimi (1983)	175	SPT	Yapılmadı *	93.74**	95.87**
Önder (2010) [59]	Yapay Sinir Ağları	ML, R, a/g, σ_0, σ'_0, N, τ_{ort}/σ_0, F, D_{50}	Önder (2010)	175	SPT	Yapılmadı	0.99	-
Baziar ve Azizkandi (2013) [60]	Yapay Sinir Ağları ve Genetik Programlama	M, R, W, S, T_{15}, F_{15}, $D50_{15}$	Baziar ve Azizkandi (2013)	525	SPT	Yapılmadı	91.02	84.3
Goh ve Zhang (2014) [57]	Çok Değişkenli Uyarlanabilir Regresyon Eğrileri (MARS)	M_w, R, logR*, logW, logS, log T_{15}, log (100-F_{15}), log($D50_{15}$+0.1)	Youd vd. (2002)	484	SPT	Yapılmadı	93.68 (SY)	85.59 (SY)
							90.47 (HE)	89.39 (HE)
Jirdehi vd. (2014) [68]	Grup Veri İşleme Yöntemi (GMDH) Tipi Sinir Ağı	M_w, a_{max}/g, S, W, LSI, z_{cr}, ay/amax, $tan\beta/tan\varphi'$	Youd vd. (2002) Al Bawwab (2005)	250	SPT	Yapılmadı	99.0 (SY)	98.0 (SY)
							98.0 (HE)	99.0 (HE)
Kaya (2016) [61]	Çoklu Doğrusal Regresyon (MLR), Çok Katmanlı Algılayıcı (MLP), Uyarlanabilir Nöro-bulanık Girişim Sistemi (ANFIS)	logM, logPGA, logR, $logT_{15}$, log(100-F_{15}), log $D50_{15}$, logS, logW	Kaya (2016) ***	488	SPT	Yapıldı	88 (SY)	77 (SY)
							73 (HE)	85 (HE)
Avval ve Derakhshani (2018) [69]	Makine Öğrenmesi (Model ağaç yaklaşımı)	M_w, T_{15}, F_{15}, D_{50}, R	Youd vd. (2002)	484	SPT	Yapılmadı	95****	-
		R0/R, T/D50, W, S, F_{15}				Yapılmadı	90****	
Karalı (2019) [70]	Yapay Sinir Ağları	M_w, a_{max}, TS, IL, LS, LSI*, β(%),$a_{y_{a_{max}}}$, H, S, R, T_{15}, F_{15}, $D50_{15}$, W, z_{cr}, $tan\phi'/tan\theta'$, γs	Hasançebi (2011)	197	SPT	Yapıldı	81.25	90.59
Pirhadi vd. (2019) [71]	Yapay Sinir Ağları	M_w, W, T_{15}, F_{15}, $D50_{15}$, CAV5	Pirhadi vd. (2019)***	163	SPT	Yapıldı	92.0	95.0
Farrokhi vd. (2020) [63]	Genetik Algoritma GDMH-tipi Sinir Ağı	M_w, a_{max}, W, $D50_{15}$, z_{cr}, $a_{y_{a_{max}}}$, $tan\beta/tan\varphi'_{eqyv,liq}$	Farrokhi vd. (2019)***	526	SPT	Yapıldı	91.6	90.3
Durante ve Rathje (2021) [73]	Makine Öğrenmesi (Rassal Orman)	L, GWT, S, PGA, Elevation, q...	Durante ve Rathje (2021)	7300	CPT	Yapıldı	89.0	71.0
Bu çalışma	Yapay Sinir Ağları	M_w, PGA, R, R*, S, W, T_{15}, NT, FC_{15}, $D50_{15}$, z_{cr}, logLSI, V_s, PGV, PGV^2/PGA, lnI_a, ln CAV_5	Youd vd. (2002) Al Bawwab (2005) Hasançebi (2011)	487	SPT	Yapıldı#	92.0 (I)	80 (II)
							93.0 (I)	72 (II)

+ Burada doğrulama ile kastedilen, eğitim ve test aşaması dışında bir veri kümesinin oluşturulması veya eğitim aşamasında k-ortalama gibi bir çapraz doğrulama algoritmasının kullanılmasıdır.

* Çalışmada doğrulama terimi kullanılmaktadır ve bahsedilen doğrulama terimi eğitim ve testten ayrı bir adım değil, test aşamasının kendisidir. "Yapılmadı" olarak işaretlenmelerinin nedeni budur.

** R^2 değeri yerine yüzde hatası ile hesaplanarak bulunan doğruluk oranını göstermektedir.

*** Youd vd. (2002)'ye ek oluşturulan veri setleri.

**** Bahsedilen değer R^2 değeri değil, korelasyon katsayısıdır.

Doğrulama yalnızca dört adet Adapazarı verisi üzerinden yapılmıştır.

6
SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Sıvılaşma kaynaklı yanal yayılmalar geçmişten günümüze birçok depremde önemli hasarlara, can ve mal kayıplarına neden olan oldukça önemli bir konudur. Problemin çözümü için birçok araştırmacı çeşitli yöntemler kullanmış olup yakın zamanda yapılmış çalışmaların önemli bir kısmı yapay zekâ yöntemleri kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

Yapay sinir ağları modelleri problem çözmede oldukça elverişli olsalar da, veri kaynaklı çalışma prensibine dayalı olduğu için inşaat mühendisliği gibi sürekli bir veri akışının kısıtlı olduğu bir alanda kullanımları oldukça güçleştirmektedir. İnşaat mühendisliği alanında geniş kapsamlı, sağlıklı bir veri setinin oluşturulması diğer birçok alana oranla daha zorlu bir süreç olduğundan geçmiş vakalardan elde edilen verilere dayalı yöntemler için oluşturulan veri setleri oldukça önemli bir konuma sahiptir. Bu nedenle geoteknik mühendisliği ve sıvılaşma probleminin çözümünde kullanılabilecek sağlıklı veri setlerinin oluşturulmasının gerekliliği ve önemi açıktır.

Bu çalışma kapsamında sıvılaşma kaynaklı yanal yayılmaların tahmini için geliştirilen, literatürde kendine önemli bir yer bulan Youd vd. (2002) veri setini kullanan iki araştırmacının (Al Bawwab, 2005 ve Hasançebi, 2011) derlediği veri setlerine 2010-2011 yılları arasında gerçekleşen Canterbury Deprem Sekansı neticesinde Christchurc'te görülen sıvılaşma kaynaklı yanal yayılma verileri eklenerek güncel bir veri seti oluşturulmuştur [49, 55]. Oluşturulan veri setinin özelliği literatürün büyük bir çoğunluğunu kaplayan Standart Penetrasyon Testi'ne dayanan kısıtlı sayıdaki veri ile Christchurh, Yeni Zelanda'da yer alan Standart Penetrasyon Testi'ne dayanan verilerin eklenmesidir. Literatürde yer alan çalışmalar veri seti bakımından tam da bu aşamada ayrılmaktadır. Yeni Zelanda depremleri ile ilgili çalışan araştırmacılar yalnız bu bölgede yapılan Koni Penetrasyon Testi ile elde edilen verilerle kısıtlı kalmış olup, bu çalışmalar dışında kalan çalışmalarda ise Yeni Zelanda'da yer alan SPT verilerine rastlanamamaktadır.

Çalışmada incelenen bir diğer önemli husus ise literatürdeki çalışmaların büyük bir çoğunluğunda kullanılan parametrelerin dar bir pencereden bakılmış olmasıdır. Bahsi geçen bu çalışmaların büyük çoğunluğu aynı veri seti ile (büyük oranda Youd vd. (2002) kullanılmıştır) benzer değişkenler ile gerçekleştirilmiş olup yalnızca birkaç adedinde depremin hız ile ilgili bileşeni ve ölçütleri dikkate alınmıştır. Bu

çalışma kapsamında literatürde önemli bir boşluk olan depremin hız ile ilgili bileşeni ve ölçütlerinin (PGV, PGV^2/PGA, CAV_5 gibi) de yanal deplasman tahmininde oynayabileceği rol değerlendirilmiştir.

Model mimarisinin ve optimizasyonun oldukça önemli olduğu yapay sinir ağlarının kullanıldığı bu çalışma kapsamında, yalnızca geçmiş çalışmalarda kullanılan değişkenler ile üretilen veri seti (Veri Seti I) ile yapılan analizlere ek olarak, yeni eklenen depremin hız ölçüt değişkenlerinin de kullanıldığı veri seti (Veri Seti II) ile yapılan analizler gerçekleştirilmiştir. Analiz sonuçlarında Veri Seti I ile gerçekleştirilen analizlerin Veri Seti II ile gerçekleştirilen analizlere oranla, eğitim aşamasında daha düşük ancak test aşamasında daha yüksek doğrulukta sonuçlar elde edilmiştir. Veri Seti I ile yapılan analizlere oranla Veri Seti II ile yapılan analizlerde, modelin eğitim ve test aşamalarında elde edilen başarının arasındaki farkın daha fazla olması, modelin aşırı öğrenmeye yaklaştığı sonucunu çıkartmaktadır.

Yapılan analizler neticesinde elde edilen sonuçlar şu şekilde yorumlanabilir:

- Literatürde yer alan çalışmaların büyük bir çoğunluğunda kullanılan parametrelerle yapılan analizlerde (Veri Seti I) elde edilen sonuçlar, sıvılaşma kaynaklı yanal yayılma miktarının tahmini için oldukça tatmin edicidir.
- Literatürde kullanım oranı oldukça az olan veya hiç olmayan depremin hız ölçütlerinin de kullanıldığı analizlerden elde edilen sonuçların da sıvılaşma kaynaklı yanal yayılmaların tahmininde oldukça umut vaat edici olduğu görülmüştür.
- Çalışma kapsamında kullanılan model mimarisinin uygun optimizasyon yöntemleri ile iyileştirilmesi, hali hazırda iyi olan sonuçların daha da iyileşmesini sağlayabilecektir.
- Eklenen yeni parametrelerinin elde edilmesinde kullanılan yöntemlerin iyileştirilmesi de, depremin hız ölçütü ile yanal deplasmanın tahmini arasındaki ilişkiyi modellemekte daha iyi sonuçlar verebilecektir. Yeni parametrelerin eklenmesi için kullanılan eşitliklerin yalnızca belli bir aralık içinde geliştirilmiş olması da elde edilen sonuçlar üzerinde etkilidir.
- Literatürde oldukça yüksek R^2 değerlerinin elde edildiği çalışmalarda kullanılan yöntemlerin, algoritmaların problemin çözümünde bu çalışmada kullanılan model mimarisine oranla, problemin modellenmesinde daha uygun olduğu düşünülebilir. Ancak bahsi geçen bu yöntemlerin bir kısmının yalnızca belirli bir aralık ile sınırlandırılmış olması, bu çalışmadaki gibi genel bir modelin kurulduğu oranla daha yüksek doğrulukta sonuçlar vermiş olması doğaldır.

- Yapay sinir ağları gibi veri setinin bölümünden, başlangıç değerlerinin atanıp ağırlıkların güncellenmesine kadar her aşamada oldukça farklı sonuçlar verebilen bir yöntemin sıvılaşma kaynaklı yanal yayılma miktarının tahmininde oldukça iyi bir yöntem olduğu görülebilmektedir.

- Yeni eklenen parametrelerin kısıtlı bir alanda eklenebilmesi ve eklenemeyen verilerin ortalama ile doldurulması nedeni ile doğruluk oranında düşüş görülmüş olabilir. I_a ve CAV_5 gibi verilerin yalnızca belli aralıktaki deprem büyüklükleri için geliştirilmiş olması, güncel ve geliştirilmiş, sağlıklı bir veri setinin oluşturulması önünde büyük bir engel teşkil etmektedir. Ancak buna rağmen elde edilen yüksek doğrulukta sonuçlar çalışmanın geleceği açısından umut vaat etmektedir.

Bu çalışma kapsamında genel bir tahmin modeli geliştirebilmek adına veri seti bütüncül olarak değerlendirilmiştir. Veri seti diğer bazı çalışmalardaki (Hasançebi (2011), Jirhadi vd. (2014)) gibi herhangi bir alt veri seti kümelerine bölünmemiş olup model eğitim ve testinde tüm veriler kullanılmıştır [49, 68]. Bu nedenle analiz sonuçlarının diğer çalışmalara oranla daha düşük gibi görülebilmektedir. Ancak bahsedildiği gibi tüm verileri kapsayıcı genel bir modelin kurulması, problemin tanımı ve çözümü açısından oldukça önemli olduğundan elde edilen sonuçların da tatmin edici olduğu sonucuna ulaşılmaktadır.

Gelecek çalışmalarda, problemin Hasançebi (2011)'in yaklaşımına paralel olarak tüm veri seti hem yüzey eğimi hem de serbest yüzeyin olduğu durum, yalnızca yüzey eğiminin olduğu durum, yalnızca serbest yüzeyin olduğu durum ve hem yüzey eğimi hem de serbest yüzeyin olmadığı durum olarak alt başlıklarda değerlendirilmesinin tahmin modelinin sonuçları üzerinde olumlu etki sağlayacağı düşünülmektedir.

Kullanılacak optimizasyon yöntemleri ve daha uzun süreli denemeler ile sonuçların geliştirilebileceği de göz önünde bulundurulmalıdır. Gelecekte yapılacak çalışmalarda araştırmacılar bu çalışmada sunulan veri setini ve eklenen yeni verileri, parametreleri yeniden değerlendirmesi ve problemin çözümü için farklı model mimarilerinin denenmesi düşünülmektedir.

[1] T. L. Youd, “Geologic effects-liquefaction and associated ground failure,” Proceedings of the Geologic and Hydraulic Hazards Training Program, Proceedings of the Geologic and Hydraulic Hazards Training Program, Tech. Rep., 1984, pp. 210–232.

[2] T. L. Youd, “Application of MLR Procedure for Prediction of Liquefaction-Induced Lateral Spread Displacement,” *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2018, ISSN: 1090-0241. DOI: 10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0001860.

[3] T. L. Youd, “Liquefaction mechanisms and induced ground failure,” *International handbook of earthquake and engineering seismology, Academic Press*, no. 70, pp. 1159–1174, 2003.

[4] S. L. Kramer, *Geotechnical Earthquake Engineering*. New Jersey: Prentice Hall, 1996.

[5] T. D. Yönetmeliği, “Ek deprem etkisi altında binaların tasarımı İçin esaslar,” *Resmî Gazete*, Mar. 18, 2018. [Online]. Available: https://www.resmigazete.gov.tr/eskiler/2018/03/20180318M1-2-1.pdfn.

[6] T. L. Youd *et al.*, “Liquefaction Resistance of Soils: Summary Report from the 1996 NCEER and 1998 NCEER/NSF Workshops on Evaluation of Liquefaction Resistance of Soils,” EN, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, vol. 127, no. 10, pp. 817–833, 2001, Publisher: American Society of Civil Engineers, ISSN: 1090-0241. DOI: 10.1061/(ASCE)1090-0241(2001)127:10(817).

[7] H. B. Seed, I. M. Idriss, “Simplified Procedure For Evaluating Soil Liquefaction Potential,” *Journal of Soil Mechanics & Foundations Div*, 1971.

[8] M. Rouholamin, S. Bhattacharya, R. P. Orense, “Effect of initial relative density on the post-liquefaction behaviour of sand,” *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, vol. 97, pp. 25–36, 2017, ISSN: 0267-7261. DOI: https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2017.02.007.

[9] P. a. H. R. Institute, *Handbook on liquefaction Remediation on Reclaimed Land*. Taylor and Francis, 1997.

[10] S. J. Poulos, G. Castro, J. W. France, “Liquefaction Evaluation Procedure,” EN, *Journal of Geotechnical Engineering*, vol. 111, no. 6, pp. 772–792, Jun. 1985, Publisher: American Society of Civil Engineers, ISSN: 0733-9410. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9410(1985)111:6(772).

[11] M. Keramatikerman, A. Chegenizadeh, “Effect of particle shape on monotonic liquefaction: Natural and crushed sand,” *Experimental Mechanics*, vol. 57, no. 8, pp. 1341–1348, 2017.

[12] A. K. Ashmawy, B. Sukumaran, V. V. Hoang, *Evaluating the Influence of Particle Shape on Liquefaction Behavior Using Discrete Element Modeling*, en, Library Catalog: www.researchgate.net, 2003.

[13] K. Tokimatsu, Y. Yoshimi, "Empirical correlation of soil liquefaction based on SPT N-value and fines content," *Soils and Foundations*, vol. 23, no. 4, pp. 56–74, 1983.

[14] H. B. Seed, K. Tokimatsu, L. F. Harder, R. M. Chung, "The influence of SPT procedures in soil liquefaction resistance evaluations," *J. Geotech. Engrg. Div., ASCE*, vol. 12, no. 111, pp. 1425–1445, 1985, 2.

[15] C. P. Polito, "The Effects Of Non-Plastic and Plastic Fines On The Liquefaction Of Sandy Soils," Ph.D. dissertation, Faculty of the Virginia Polytechnic Institute and State University, 1999.

[16] K. Ranga Swamy, M. Akhila, N. Sankar, "Effects of fines content and plasticity on liquefaction resistance of sands," *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Geotechnical Engineering*, pp. 1–10, Jun. 2020, Publisher: ICE Publishing, ISSN: 1353-2618. DOI: 10.1680/jgeen.19.00270.

[17] T. L. Youd, "Geological effects-liquefaction and associated ground failure," United States Geological Survey, Geological and Hydrogeological Hazards Training Program, Tech. Rep., 1984, pp. 210–232.

[18] N. N. Ambraseys, "Engineering seismology: Part II," en, *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, vol. 17, no. 1, pp. 51–105, 1988, ISSN: 1096-9845. DOI: 10.1002/eqe.4290170102.

[19] Ö. Ündül, O. Gürpınar, "Çokal vadisindeki (Gelibolu) alüvyal zeminlerin sıvılaşma potansiyeli," *İstanbul Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Yerbilimleri Dergisi*, vol. 1, no. 16, pp. 67–80, 2003.

[20] K. O. Cetin *et al.*, "Liquefaction-Induced Lateral Spreading at Izmit Bay During the Kocaeli (Izmit)-Turkey Earthquake," EN, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, vol. 130, no. 12, pp. 1300–1313, Dec. 2004, Publisher: American Society of Civil Engineers, ISSN: 1090-0241. DOI: 10.1061/(ASCE)1090-0241(2004)130:12(1300).

[21] R. W. Boulanger, I. M. Idriss, "CPT AND SPT BASED LIQUEFACTION TRIGGERING PROCEDURES," Tech. Rep. UCD/CGM-14/01, 2014.

[22] S. S. C. Liao, R. V. Whitman, "Overburden Correction Factors for SPT in Sand," EN, *Journal of Geotechnical Engineering*, vol. 112, no. 3, pp. 373–377, Mar. 1986, Publisher: American Society of Civil Engineers, ISSN: 0733-9410. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9410(1986)112:3(373).

[23] P. K. Robertson, C. Wride, "Evaluating cyclic liquefaction potential using the cone penetration test," *Canadian geotechnical journal*, vol. 35, no. 3, pp. 442–459, 1998.

[24] A. F. Rauch, "EPOLLS: An Emprical Method for Predicting Surface Displacement Due to Liquefaction-Induced Lateral Spreading in Earthquakes," Ph.D. dissertation, Virginia Polytechnic Institue, 1997.

[25] O. Sivrikaya, E. Toğrol, *Arazi Deneyleri ve Geoteknik Tasarımda Kullanımları*. İstanbul: Birsen Yayınevi, 2009, ISBN: 978-975-511-527-6.

[26] H. B. Seed, I. M. Idriss, "Ground motions and soil liquefaction during earthquakes.," *Earthquake Engineering Research Institute Monograph*, 1982.

[27] I. M. Idriss, R. W. Boulanger, *Soil liquefaction during earthquakes*. Earthquake Engineering Research Institute, 2008.

[28] T. L. Youd, D. M. Perkins, "Mapping of Liquefaction Severity Index," en, *Journal of Geotechnical Engineering*, vol. 113, no. 11, pp. 1374–1392, Nov. 1987, ISSN: 0733-9410, 1944-8368. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9410(1987)113:11(1374).

[29] Z. Yilmaz, K. O. Cetin, "GIS-Based Seismic Soil Liquefaction Assessment For Sakarya City After 1999 Kocaeli-Turkey Earthquake," en, 11th ICSDEE / 3rd ICEGE Proceedings, 2004.

[30] J. D. Bray, J. Macedo, "6th Ishihara lecture: Simplified procedure for estimating liquefaction-induced building settlement," en, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, vol. 102, pp. 215–231, Nov. 2017, ISSN: 0267-7261. DOI: 10.1016/j.soildyn.2017.08.026.

[31] K. Ishihara, Y. Yoshimi, "EVALUATION OF SETTLEMENTS IN SAND DEPOSITS FOLLOWING LIQUEFACTION DURING EARTHQUAKES," *Soils and Foundations*, pp. 173–188, 1992.

[32] J. D. Bray, S. Dashti, "Liquefaction-induced building movements," en, *Bulletin of Earthquake Engineering*, vol. 12, no. 3, pp. 1129–1156, Jun. 2014, ISSN: 1573-1456. DOI: 10.1007/s10518-014-9619-8.

[33] J. D. Bray, J. Macedo, "Simplified Evaluation of Liquefaction-Induced Building Settlements," en, pp. 577–590, Jun. 2018, Publisher: American Society of Civil Engineers. DOI: 10.1061/9780784481455.054.

[34] R. D. Andrus, K. H. Stokoe II, "Liquefaction resistance of soils from shear-wave velocity," *Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering*, vol. 126, no. 11, pp. 1015–1025, 2000.

[35] R. Kayen *et al.*, "Shear-wave velocity–based probabilistic and deterministic assessment of seismic soil liquefaction potential," *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, vol. 139, no. 3, pp. 407–419, 2013.

[36] S. Midorikawa, K. Wakamatsu, "Intensity of earthquake ground motion at liquefied sites," *Soils and Foundations*, vol. 28, no. 2, pp. 73–84, 1988.

[37] R. P. Orense, "Assessment of liquefaction potential based on peak ground motion parameters," *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, vol. 25, no. 3, pp. 225–240, 2005.

[38] J. J. Bommer, J. E. Alarcon, "The prediction and use of peak ground velocity," *Journal of Earthquake Engineering*, vol. 10, no. 01, pp. 1–31, 2006.

[39] N. Makris, C. J. Black, "Evaluation of peak ground velocity as a "good" intensity measure for near-source ground motions," *Journal of Engineering Mechanics*, vol. 130, no. 9, pp. 1032–1044, 2004.

[40] M. E. Arıoğlu, Y. M. B. Arıoğlu, M. C. Girgin, "Arias şiddeti ile sıvılaşma analizi,"

[41] T. Travasarou, J. D. Bray, N. A. Abrahamson, "Empirical attenuation relationship for arias intensity," *Earthquake engineering & structural dynamics*, vol. 32, no. 7, pp. 1133–1155, 2003.

[42] S. L. Kramer, R. A. Mitchell, "Ground motion intensity measures for liquefaction hazard evaluation," *Earthquake Spectra*, vol. 22, no. 2, pp. 413–438, 2006.

[43] O. Pineda-Porras, M. Ordaz, "A new seismic intensity parameter to estimate damage in buried pipelines due to seismic wave propagation," *Journal of Earthquake Engineering*, vol. 11, no. 5, pp. 773–786, 2007.

[44] S. F. Barlett, T. L. Youd, "Emprical Analysis of Horizontal Groun Displacement Generated by Liquefaction-Induced Lateral Spread," NCEER, Tech. Rep., 1992.

[45] T. D. O'Rourke, P. A. Lane, "Liquefaction hazards and their effects on buried pipelines," National Center for Earthquake Engineering Research, Technical Report NCEER-89-0007, Tech. Rep., 1989.

[46] S. F. Barlett, T. L. Youd, "Emprical Prediction of Liquefaction-Induced Lateral Spread," *Journal of Geotechnical Engineering, ASCE*, vol. 121, no. 4, pp. 316–329, 1995.

[47] M. Hamada, I. Towhata, S. Yasuda, R. Isoyama, "Study on permanent ground displacement induced by seismic liquefaction," en, *Computers and Geotechnics*, vol. 4, no. 4, pp. 197–220, Jan. 1987, ISSN: 0266-352X. DOI: 10.1016/0266-352X(87)90001-2.

[48] T. L. Youd, C. M. Hansen, S. F. Bartlett, "Revised Multilinear Regression Equations for Prediction of Lateral Spread Displacement," EN, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, vol. 128, no. 12, pp. 1007–1017, Dec. 2002, Publisher: American Society of Civil Engineers, ISSN: 1090-0241. DOI: 10.1061/(ASCE)1090-0241(2002)128:12(1007).

[49] N. Hasançebi, "Sıvılaşmayla İlişkili Yanal Yayılma Yer Değiştirmesinin Kestirimi," Doktora Tezi, Hacettepe Üniversitesi, 2011.

[50] B. L. Kutter, S. Gajan, A. Balakrishnan, "Effects of Layer Thickness and Density on Settlement and Lateral Spreading," en, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, vol. 130, no. 6, 2004.

[51] M. D. Bunn, "Assessing Lateral Spread Hazards in Areas Prone to Great and Long-Duration Earthquakes," Ph.D. dissertation, 2014.

[52] J. P. Koester, "The Influence of Fines Type and Content on Cyclic Strength," eng, ASCE, 1994, pp. 17–33.

[53] M. Hamada, S. Yasuda, R. Isoyama, K. Emoto, "Study on Liquefaction Induced Permanent Ground Displacements," *Association for the Development of Earthquake Prediction*, 1986.

[54] J.-P. Bardet, T. Tobita, N. Mace, J. Hu, "Regional modeling of liquefaction-induced ground deformation," *Earthquake Spectra*, vol. 18, no. 1, pp. 19–46, 2002.

[55] W. M. K. Al Bawwab, "Probabilistic Assessment of Liquefaction-Induced Lateral Ground Deformations," Ph.D. dissertation, Middle East Technical University, 2005.

[56] D. T. Gillins, S. F. Bartlett, "Multilinear regression equations for predicting lateral spread displacement from soil type and cone penetration test data," *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, vol. 140, no. 4, p. 04 013 047, 2014.

[57] A. T. C. Goh, W. G. Zhang, "An improvement to MLR model for predicting liquefaction-induced lateral spread using multivariate adaptive regression splines," en, *Engineering Geology*, vol. 170, pp. 1–10, Feb. 2014, ISSN: 0013-7952. DOI: 10.1016/j.enggeo.2013.12.003.

[58] A. A. Javadi, M. Rezania, M. M. Nezhad, "Evaluation of liquefaction induced lateral displacements using genetic programming," en, *Computers and Geotechnics*, vol. 33, no. 4, pp. 222–233, Jun. 2006, ISSN: 0266-352X. DOI: 10.1016/j.compgeo.2006.05.001.

[59] N. D. Önder, "Sıvılaşma Nedeniyle Oluşan Yanal Yayılmanın Bir Yapay Sinir Ağı (YSA) Modeli ile Değerlendirilmesi," Ph.D. dissertation, Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü, 2010.

[60] M. H. Baziar, A. S. Azizkandi, "Evaluation of lateral spreading utilizing artificial neural network and genetic programming," en, *International Journal of Civil Engineering*, vol. 11, no. 2, p. 12, 2013.

[61] Z. Kaya, "Predicting Liquefaction-Induced Lateral Spreading by Using Neural Network and Neuro-Fuzzy Techniques," en, *International Journal of Geomechanics*, vol. 16, no. 4, p. 04 015 095, Aug. 2016, Publisher: American Society of Civil Engineers. DOI: 10.1061/(ASCE)GM.1943-5622.0000607.

[62] Y. J. Avval, A. Derakhshani, "New formulas for predicting liquefaction-induced lateral spreading: Model tree approach," en, *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, vol. 78, no. 5, pp. 3649–3661, Jul. 2019, ISSN: 1435-9537. DOI: 10.1007/s10064-018-1319-1.

[63] F. Farrokhi, A. Firoozfar, M. S. Maghsoudi, "Evaluation of liquefaction-induced lateral displacement using a GMDH-type neural network optimized by genetic algorithm," en, *Arabian Journal of Geosciences*, vol. 13, no. 1, p. 4, Dec. 2019, ISSN: 1866-7538. DOI: 10.1007/s12517-019-4980-1.

[64] J. Wang, M. Rahman, "A neural network model for liquefaction-induced horizontal ground displacement," *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, vol. 18, no. 8, pp. 555–568, 1999.

[65] M. Baziar, A. Ghorbani, "Evaluation of lateral spreading using artificial neural networks," *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, vol. 25, no. 1, pp. 1–9, 2005.

[66] S. Garcia, M. Romo, E. Botero, "A neurofuzzy system to analyze liquefaction-induced lateral spread," *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, vol. 28, no. 3, pp. 169–180, 2008.

[67] B. Siyahi, B. Akbas, N. D. Onder, "Evaluation of liquefaction-induced lateral spreading by a neural network (nn) model," 2008.

[68] R. A. Jirdehi, H. T. Mamoudan, H. H. Sarkaleh, "Applying gmdh-type neural network and particle warm optimization for prediction of liquefaction induced lateral displacements.," *Applications & Applied Mathematics*, vol. 9, no. 2, 2014.

[69] Y. J. Avval, A. Derakhshani, "New formulas for predicting liquefaction-induced lateral spreading: Model tree approach," *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, vol. 78, no. 5, pp. 3649–3661, 2019.

[70] S. Karalı, "Sıvılaşma Kaynaklı Zemin Deformasyonlarının Olasılıksal Yöntemlerle İncelenmesi ve Değerlendirilmesi," Ph.D. dissertation, Ege Üniversitesi, 2019.

[71] N. Pirhadi, X. Tang, Q. Yang, "New Equations to Evaluate Lateral Displacement Caused by Liquefaction Using the Response Surface Method," en, *Journal of Marine Science and Engineering*, vol. 7, no. 2, p. 35, Feb. 2019, Number: 2 Publisher: Multidisciplinary Digital Publishing Institute. DOI: 10.3390/jmse7020035.

[72] NZGD, "Conditional PGA for Liquefaction Assessment," *Map Layer CGD0300 - 11 Feb 2013, Map Layer CGD0800 – 12 June 2014, Map Layer CGD0700, Map Layer CGD5110 – 30 June 2015*, 2015.

[73] M. G. Durante, E. M. Rathje, "An exploration of the use of machine learning to predict lateral spreading," en, *Earthquake Spectra*, p. 87 552 930 211 004 613, Apr. 2021, Publisher: SAGE Publications Ltd STM, ISSN: 8755-2930. DOI: 10.1177/87552930211004613.

[74] O. Çetinkaya, "Comparison of artificial intelligence based models developed for prediction of liquefaction induced lateral spreading," in *VI. INTERNATIONAL SCIENTIFIC AND VOCATIONAL STUDIES CONGRESS – ENGINEERING PROCEEDINGS*, 2021.

[75] E. Öztemel, *Yapay Sinir Ağları*, 4th ed. Papatya Bilim, 2016, ISBN: 978-975-6797-39-6.

[76] F. Chollet, *Deep Learning with Python*. Manning, Nov. 2017, ISBN: 9781617294433.

[77] J. Jiang, P. Trundle, J. Ren, "Medical image analysis with artificial neural networks," *Computerized Medical Imaging and Graphics*, vol. 34, no. 8, pp. 617–631, 2010, ISSN: 0895-6111. DOI: https://doi.org/10.1016/j.compmedimag.2010.07.003.

[78] I. Goodfellow, Y. Bengio, A. Courville, *Deep Learning*. MIT Press, 2016, http://www.deeplearningbook.org.

[79] G. Nguyen *et al.*, "Machine learning and deep learning frameworks and libraries for large-scale data mining: A survey," *Artificial Intelligence Review*, vol. 52, no. 1, pp. 77–124, Jun. 2019, ISSN: 1573-7462. DOI: 10.1007/s10462-018-09679-z.

[80] K. O. Cetin *et al.*, "Liquefaction-induced ground deformations at Hotel Sapanca during Kocaeli (Izmit),Turkey earthquake," en, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, vol. 22, no. 9, pp. 1083–1092, Oct. 2002, ISSN: 0267-7261. DOI: 10.1016/S0267-7261(02)00134-3.

[81] NZGD, "Liquefaction and Lateral Spreading Observations," *Map Layer CGD0300 - 11 Feb 2013*, 2013.

[82] NZGD, "Horizontal Ground Movements," *Map Layer CGD0700*, 2012.

[83] NZGD, "Event Specific Groundwater Surface Elevations," *Map Layer CGD0800 - 12 June 2014*, 2014.

[84] NZGD, "Conditional PGA for Liquefaction Assessment," *Map Layer CGD5110 - 30 June 2015*, 2015.

[85] K. M. Robinson, "Liquefaction-induced lateral spreading in the 2010-2011 Canterbury earthquakes," en, 2016. DOI: 10.26021/1749.

[86] H. Si, S. Midorikawa, "New attenuation relations for peak ground acceleration and velocity considering effects of fault type and site condition," in *Proceedings of 12th World Conference on Earthquake Engineering*, 2000.

[87] B. A. Bradley, "Strong ground motion characteristics observed in the 13 June 2011 Mw6.0 Christchurch, New Zealand earthquake," en, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 6ICEGE – Earthquake Geotechincal Engineeering, vol. 91, pp. 23–38, Dec. 2016, ISSN: 0267-7261. DOI: 10.1016/j.soildyn.2016.09.006.

[88] B. Bradley, "Full article: Ground motions observed in the Darfield and Christchurch earthquakes and the importance of local site response effects," *New Zealand Journal of Geology and Geophysics*, 2012.

[89] Y. Fukushima, K. Irikura, "Attenuation characteristics of peak ground motions in the 1995 hyogo-ken nanbu earthquake," *Journal of Physics of the Earth*, vol. 45, no. 2, pp. 135–146, 1997. DOI: 10.4294/jpe1952.45.135.

[90] R. C. Wilson, *Relation of Arias intensity to magnitude and distance in California*. US Geological Survey Reston, 1993.

[91] AFAD, "1999 kocaeli depremi veriseti," 1999.

[92] R. B. Sancio, "Peer," *Geotechnical Site Investigation at Selected Lateral Spread Sites*, 1999.

[93] R. E. Kayen, J. K. Mitchell, "Assessment of liquefaction potential during earthquakes by arias intensity," *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, vol. 123, no. 12, pp. 1162–1174, 1997.

[94] M. V. Kostadinov, I. Towhata, "Assessment of liquefaction-inducing peak ground velocity and frequency of horizontal ground shaking at onset of phenomenon," en, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, vol. 22, no. 4, pp. 309–322, Jun. 2002, ISSN: 0267-7261. DOI: 10.1016/S0267-7261(02)00018-0.

[95] V. Cox, "Exploratory data analysis," in *Translating Statistics to Make Decisions : A Guide for the Non-Statistician*. Berkeley, CA: Apress, 2017, pp. 47–74, ISBN: 978-1-4842-2256-0. DOI: 10.1007/978-1-4842-2256-0_3.

Konferans Bildirisi

1. O. Çetinkaya and P. Özener, "COMPARISON OF ARTIFICIAL INTELLIGENCE BASED MODELS DEVELOPED FOR PREDICTION OF LIQUEFACTION INDUCED LATERAL SPREADING", VI. International Scientific and Vocational Studies Congress – Engineering (BILMES EN 2021), 23-26 December 2021, TURKEY