

**T.C.
İSTANBUL GEDİK ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ**



**ZEMİN SIVILAŞMASI POTANSİYELLERİNİN TAHMİNİ İÇİN MATLAB
PROGRAMINA DAYALI YAPAY SİNİR AĞLARI ALGORİTMALARININ
GELİŞTİRİLMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Muhammet Mücahit YAZICI

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

İnşaat Mühendisliği Tezli Yüksek Lisans Programı

OCAK 2022

**T.C.
İSTANBUL GEDİK ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ**



**ZEMİN SIVILAŞMASI POTANSİYELLERİNİN TAHMİNİ İÇİN MATLAB
PROGRAMINA DAYALI YAPAY SİNİR AĞLARI ALGORİTMALARININ
GELİŞTİRİLMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**Muhammet Mücahit YAZICI
(191282002)**

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

İnşaat Mühendisliği Tezli Yüksek Lisans Programı

Tez Danışmanı: Dr. Öğr. Üyesi Hasan Bozkurt NAZILLI

Eş Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Mert TOLON

OCAK 2022

**T.C.
İSTANBUL GEDİK ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ**



YÜKSEK LİSANS TEZİ

**Muhammet Mücahit YAZICI
(191282002)**

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

İnşaat Mühendisliği Tezli Yüksek Lisans Programı

**İstanbul Gedik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, İnşaat
Mühendisliğinde Yapılan Bu Tez Çalışması, Geoteknik Anabilim Dalı Yüksek
Lisans Derecesi Gereksinimlerini Sağlamaktadır.**

Tez Danışmanı: Dr. Öğr. Üyesi Hasan Bozkurt NAZILLI

Eş Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Mert TOLON

OCAK 2022



T.C.
İSTANBUL GEDİK ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ MÜDÜRLÜĞÜ

Yüksek Lisans Tez Onay Belgesi

Enstitümüz, İnşaat Mühendisliği Tezli Yüksek Lisans Programı 191282002 numaralı öğrencisi Muhammet Mücahit YAZICI'nın "Zemin Sıvılaşması Potansiyellerinin Tahmini İçin Matlab Programına Dayalı Yapay Sinir Ağları Algoritmalarının Geliştirilmesi" adlı tez çalışması 14/01/2022 tarihinde yapılan tez savunma sınavında aşağıdaki jüri tarafından *Oy Birliği* ile Yüksek Lisans tezi olarak *Kabul* edilmiştir.

Öğretim Üyesi Adı Soyadı

Jüri Onay Tarihi: 14/01/2022

- 1) **Tez Danışmanı:** Dr. Öğr. Üyesi Hasan Bozkurt NAZİLLİ
- 2) **Jüri Üyesi:** Dr. Öğr. Üyesi Mert TOLON
- 3) **Jüri Üyesi:** Dr. Öğr. Üyesi Redvan GHASEMLOUNİA
- 4) **Jüri Üyesi:** Dr. Öğr. Üyesi Gökhan KAZAR
- 5) **Jüri Üyesi:** Dr. Öğr. Üyesi Zehra Nil TAYLAN KUTLU

YEMİN METNİ

Yüksek Lisans tezi olarak sunduğum “Zemin Sıvılaşması Potansiyellerinin Tahmini İçin Matlab Programına Dayalı Yapay Sinir Ağları Algoritmalarının Geliştirilmesi” adlı çalışmanın, tezin proje safhasından sonuçlanmasına kadarki bütün süreçlerde bilimsel ahlak ve geleneklere aykırı düşecek bir yardıma başvurulmaksızın yazıldığını ve yararlandığım eserlerin Bibliyografya’da gösterilenlerden olduğunu, bunlara atıf yapılarak yararlanılmış olduğunu belirtir ve onurumla beyan ederim (14.01.2022).

Muhammet Mücahit YAZICI / İmza



ÖNSÖZ

Yüksek lisans eğitimimin ve sonrasında tez çalışmamın her aşamasında özveriyle yakından ilgilenen, desteğini, değerli bilgi ve tavsiyeleriyle her zaman hissettiren kıymetli hocalarım Dr. Öğr. Üyesi Mert Tolon ve Dr. Öğr. Üyesi Bozkurt NAZİLLİ'ye ayrıca değerli Mahmut ÖZCAN ve Caner KARABULUT'a en samimi teşekkürlerimi sunuyorum. Maddi ve manevi olarak hayatımın her döneminde olduğu gibi yine yanımda olan aileme, arkadaşlarıma da çok teşekkür ederim, iyi ki varsınız.

Ocak 2022

Muhammet Mücahit YAZICI

(İnşaat Mühendisi)

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖNSÖZ	v
İÇİNDEKİLER	vi
KISALTMALAR	viii
ÇİZELGE LİSTESİ	ix
ŞEKİL LİSTESİ	x
ÖZET	xii
ABSTRACT	xiii
1. GİRİŞ	1
1.1 Amaç/ Önem	2
2. LİTERATÜR TARAMASI	3
2.1 Sıvılaşma Hakkında Literatür Taraması.....	3
2.1.1 Zeminlerin sıvılaşma potansiyelleri	9
2.1.2 Sıvılaşma duyarlılığı	11
2.1.2.1 Düşey efektif gerilme ve aşırı konsolidasyon	13
2.1.2.2 Zeminin yaşı ve kökeni	14
2.1.2.3 Sismik şekil değiştirme geçmişi.....	14
2.1.2.4 Doygunluk derecesi.....	15
2.1.2.5 Sıvılaşma – deprem ilişkisi	15
2.1.2.6 Akış sıvılaşması yüzeyi ve aşırı boşluk basıncı ilişkisi	17
2.1.3 Sıvılaşmanın başlamasının değerlendirilmesi	18
2.1.4 Sıvılaşma Türleri.....	21
2.1.4.1 Akış sıvılaşması	22
2.1.4.2 Döngüsel sıvılaşma	22
2.1.5 Sıvılaşmanın Etkileri.....	23
2.1.5.1 Oturma problemi	24
2.1.5.2 Yanal zemin yayılması ve akış kayması	25
2.1.5.3 Kum kaynaması.....	26
2.1.6 Deprem tarafından zemin sıvılaşmanın tetiklenmesi	26
2.1.6.1 Çevrimsel gerilim oranı (CSR)	27
2.1.6.2 Döngüsel direnç oranı (CRR).....	28
2.1.6.3 Gerilim azaltma faktörü (rd)	29
2.1.7 Sıvılaşma güvenlik göstergeleri	30
2.1.8 Sıvılaşma tahmini için mevcut yöntemler.....	31
2.1.8.1 Sonlu elemanlar teknikleri	32
2.1.8.2 Sonlu fark teknikleri.....	33
2.1.8.3 Esnek hesaplama teknikleri.....	33
2.1.8.4 Basitleştirilmiş analitik teknikler	35
2.1.8.5 Ampirik modeller	35
2.1.9 Sıvılaşma potansiyeli değerlendirmesi için kullanılan araçlar.....	38
2.1.9.1 Sonlu elemanlar tekniği (Diana vb programlar).....	38
2.1.9.2 Sonlu farklar tekniği (Flac 3d)	39

2.1.9.3 Regresyon tekniği	43
2.1.9.4 Yumuşak bilgi işlem teknikleri	43
2.1.9.5 Yapay sinir ağı (YSA).....	43
2.1.9.6 Destek vektör makinesi (SVM).....	47
2.1.9.7 Uygunluk vektör makinesi (RVM)	48
2.1.9.8 Genetik programlama (GP)	49
2.1.10 Sıvılaşma analizlerinde kullanılan bilgisayar programları.....	50
2.2 Yapay Sinir Ağları	55
2.2.1 Yapay sinir ağlarının özellikleri.....	58
2.2.2 Yapay Sinir ağı (YSA) modelleri.....	59
2.2.2.1 Tek tabakalı algılayıcılar	59
2.2.2.1.1 Adaline modeli	59
2.2.2.2 Çok tabakalı algılayıcılar	60
2.2.2.3 İleri beslemeli YSA sistemi	60
2.2.2.4 Geri beslemeli YSA sistemi	61
2.2.3 Levenberg-Marquardt algoritması	62
2.2.4 YSA ana bileşenleri	62
2.2.4.1 Öğrenme algoritması.....	62
2.2.4.2 Aktivasyon fonksiyonu	63
2.3 İnşaat Mühendisliğinde Matlab Kullanımı.....	63
3. METODOLOJİ	70
3.1 Zemin Sıvılaşmasındaki Parametreler.....	70
3.1.1 Yapay sinir ağı algoritması için sıvılaşma parametreleri.....	75
3.2 Modelin Geliştirilmesi	77
3.3 Başarı Oranı Hesaplaması	84
3.4 Oranların Grafiklerle Karşılaştırılması	87
3.4.1 $\tau_R / \tau_{\text{Deprem}}$ değerlerinin karşılaştırılması.....	87
3.4.1.1 $\tau_R / \tau_{\text{Deprem}}$ değeri; 0 – 0,5 arasındaki gözlemlerin tahminleri.....	87
3.4.1.2 $\tau_R / \tau_{\text{Deprem}}$ değeri; 0,5 – 0,8 arasındaki gözlemlerin tahminleri....	88
3.4.1.3 $\tau_R / \tau_{\text{Deprem}}$ değeri 0,8 – 1,0 arasındaki gözlemlerin tahminleri.....	89
3.4.1.4 $\tau_R / \tau_{\text{Deprem}}$ değeri; 1,0 ve üzeri gözlemlerin tahminleri.....	90
3.4.2 Girdi parametreleri ile $\tau_R / \tau_{\text{Deprem}}$ karşılaştırılması.....	91
3.4.3 Analiz sonucu zeminin sıvılaşma durumunu değiştiriren kritik veriler	94
3.4.4 Ektest sonuç analizleri	96
4. SONUÇLAR, TARTIşMA, ÖNERİLER VE GELECEKTEKİ	
ÇALIşMALAR	97
KAYNAKLAR	101
EKLER.....	108
ÖZGEÇMİş.....	112

KISALTMALAR

AFAD	: Afet ve Acil Durum Yönetim Başkanlığı
BKS	: Bina Kullanım Sınıfı
BYS	: Bina Yükseklik Sınıfı
CPT	: Konik Penetrasyon Tesi
CRR	: Sıvılaşma Direnci
CSR	: Çevrimsel Gerilim Oranı
CVR	: Kritik Boşluk Oranı
DBYBHY	: Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik
DD	: Deprem Düzeyi
DTS	: Deprem Tasarım Sınıfı
FLS	: Akış sıvılaşma yüzeyi
FS	: Sıvılaşma Güvenlik Katsayısı
GK	: Güvenlik Katsayısı
LL	: Likit Limit
LM	: Levenberg- Marquardt algoritması
M	: Deprem magnitüdü
MATLAB	: Matrix Laboratory
MSF	: Büyüklük Ölçekleme Faktörleri
N	: SPT değeri
PL	: Plastik Limit
SPT	: Standart Penetrasyon Testi
SSL	: Kararlı Durum Çizgisi
TBDY	: Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği
V_s	: Kayma dalga hızı
YSA	: Yapay sinir ağı

ÇİZELGE LİSTESİ

	<u>Sayfa</u>
Çizelge 2.1: Seed ve Idriss tarafından önerilen formüle edilmiş Çin kriterleri	9
Çizelge 2.2: Andrews ve Martin tarafından önerilen değiştirilmiş Çin kriterleri.....	10
Çizelge 2.3: Sıvılaşmanın başlatılması için SPT tabanlı değerlendirme yöntemlerinin karşılaştırılması, bölüm I.....	20
Çizelge 2.4: Sıvılaşırma başlatma için SPT tabanlı değerlendirme yöntemlerinin karşılaştırılması, bölüm II	20
Çizelge 2.5: Kullanılan yazılımlar ve özellikleri.....	55
Çizelge 2.6: Canlı nöral sistem bileşenleri ve YSA karşılığı	57
Çizelge 3.1: Yapay Sinir Ağları Girdi ve Çıktı verileri.....	76
Çizelge 3.2: hata oranları %20 ve üzerisine ait veriler	93
Çizelge 3.3: Kritik 6 veri grubu	95
Çizelge 4.1: YSA analizi ve tahmin sonuçlarının belirli aralıklarda performansları	97

ŞEKİL LİSTESİ

	<u>Sayfa</u>
Şekil 2.1: Sıvılaşma olayı	4
Şekil 2.2: Artan boşluk suyu basıncı ile zemin temas kuvvetini kaybederek sıvılaşma durumuna geçer	5
Şekil 2.3: Sıvılaşma hasarı örnekleri	6
Şekil 2.4: CRR (CSR) to SPT-N (qc) ile sıvılaşma oluşumu	8
Şekil 2.5: Seed tarafından önerilen ince taneli sedimanların sıvılaşma duyarlılığı kriterleri	10
Şekil 2.6: Boulanger ve Idriss tarafından önerilen kum benzeri ve kil benzeri sediment davranışını ayırt etme kriterleri.....	11
Şekil 2.7: Boşluk oranı ve Efektif çevre gerilmesi grafiğın CVR çizgisi altında kalan kısım sıkı kum iken üzerinde kalan kısım gevşek kum.....	13
Şekil 2.8: Akış sıvılaşmasına duyarlı başlangıç gerilme koşulları bölgesi.....	18
Şekil 2.9: Çevrimsel hareketliliğın duyarlı alanı	18
Şekil 2.10: Potansiyel sıvılaşma bölgesi.....	19
Şekil 2.11: Akış sıvılaşması.....	22
Şekil 2.12: Sıvılaşma kaynaklı oturma hasarı.....	25
Şekil 2.13: Sıvılaşma kaynaklı kum kaynamaları.....	26
Şekil 2.14: Gerilme azaltım katsayısı (rd) derinlik ve deprem ile değısimi	30
Şekil 2.15: 1964 Niigata depremi sonrası sıvılaşma kaynaklı hasara uğrayan yapılar	31
Şekil 2.16: Yanal yayılma tahmin modeli performans değerlendirmesi	37
Şekil 2.17: FLAC3D'de temel açık hesaplama döngüsü	41
Şekil 2.18: FLAC3D'de sonlu fark ağı	42
Şekil 2.19: Bir nöron ağıının şematik diyagramı	44
Şekil 2.20: Sinir ağıları yapısı	45
Şekil 2.21: Hesaplama modelleme tekniklerinin grafiksel sınıflandırmaları	50
Şekil 2.22: Biyolojik sinir hücresi ve yapay sinir ağı	57
Şekil 2.23: Yapay sinir hücresi	58
Şekil 2.24: Tek katmanlı algılama modeli	59
Şekil 2.25: Adaline ağı modeli	60
Şekil 2.26: Çok katmanlı algılama modeli	60
Şekil 2.27: İleri beslemeli YSA	61
Şekil 2.28: Geri beslemeli ağı yapısı	61
Şekil 3.1: Türkiye Bina Deprem Yönetmeliğı (2018) İle Uyumlu Basitleştirilmiş Zemin Sıvılaşma Potansiyeli Analizi	71
Şekil 3.2: YSA modelinin oluşturulduğı MATLAB yazılımı ve versiyon bilgileri .	77
Şekil 3.3: Neural Net Fitting.....	78
Şekil 3.4: YSA uygulaması iş akışı	78
Şekil 3.5: Veri dosyalarının oluşturulması	79
Şekil 3.6: Verilerin transpozu alınması	80
Şekil 3.7: Kurulan yapay sinir ağı topolojisi	81

Şekil 3.8: Yapay sinir ağı modelinin şematik gösterimi.....	81
Şekil 3.9: YSA için kullanılan verilerin dağılımı	83
Şekil 3.10: Yapay sinir ağları MATLAB eğitim sonuçları	84
Şekil 3.11: YSA Regresyon grafikleri	85
Şekil 3.12: YSA Hata histogramı	86
Şekil 3.13: τ_R / τ_{Deprem} değeri 0 – 0,5 arasındaki gözlemlerin tahminleri	88
Şekil 3.14: τ_R / τ_{Deprem} değeri 0,5 – 0,8 arasındaki gözlemlerin tahminleri	89
Şekil 3.15: τ_R / τ_{Deprem} değeri 0,5 – 1,0 arasındaki gözlemlerin tahminleri	90
Şekil 3.16: τ_R / τ_{Deprem} değeri 1,0 ve üzeri gözlemlerin tahminleri	91
Şekil 3.17: 651 veri ile Sıvılaşma güvenlik faktörü olan arasındaki ilişki	92
Şekil 3.18: Hata Oranı %20 ve üzeri olan veriler ile Sıvılaşma güvenlik faktörü olan arasındaki ilişki	93
Şekil 3.19: Kritik veri dairesel gösterimi.....	95
Şekil 3.20: Kritik veriler ile Sıvılaşma güvenlik faktörü olan arasındaki ilişki	96
Şekil 3.21: 51 ektest verisi ile Sıvılaşma güvenlik faktörü olan arasındaki ilişki	96

ZEMİN SIVILAŞMASI POTANSİYELLERİNİN TAHMİNİ İÇİN MATLAB PROGRAMINA DAYALI YAPAY SİNİR AĞLARI ALGORİTMALARININ GELİŞTİRİLMESİ

ÖZET

Bu tez çalışması İstanbul Gedik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü'nün Geoteknik Anabilim Dalı alanında çalışmayı içermektedir ve geoteknik mühendisliği yüksek lisans derecesi gereksinimleri kapsamaktadır.

Mühendislik tarihi boyunca, yapı-temel-zemin ilişkisini ortaya koyabilmek inşaat mühendisliği problemlerinden birisidir. Bu problemler içerisinde, zeminin davranışına çözüm bulabilmek alanında uzman inşaat mühendislerine yani geoteknik mühendislerine ihtiyaç duyulmaktadır.

Zaman ilerledikçe ve sanayi geliştikçe kırsaldan kente göçün artması ve değişen ihtiyaçlar sonucunda şehir içerisinde kalan her arazi veya kullanım dönüşümü gerektiren yapı bir inşaat alanı olarak kullanılmaktadır. Bunun sonucunda arazi değerlerinde gözlenen artışlar, bireyleri mevcut alanları en iyi şekilde değerlendirmeye yönlendirmiştir. Bu artışın sonucunda yapının temel inşaatı için iyi ve güvenilir bir çalışma yapılabilmeye, geoteknik raporları oluşturulmalıdır.

Deprem esnasında veya güçlü bir titreşim sonucu kumlu zeminlerde sıvılaşma potansiyeli yüksektir. Bu tarz zeminler de sıvılaşma analiz sonuçları da Geoteknik raporlarda gösterilmelidir. Bu problemleri çözebilmek için çağına uygun, yenilikçi mühendislik yaklaşımları geliştirilmektedir.

Geoteknik mühendisliğinde yazılımı etkin bir biçimde kullandığımızda, değişen ve gelişen dünyamızda geoteknik mühendisliği alanında güncel, etkili, hızlı, çağını yakalayan ve güvenilir olanaklar elde etmekteyiz. Bir veri madenciliği yöntemi olan Yapay Sinir Ağları yaklaşımıyla, bir tahmin modelinin oluşturulması planlanmaktadır. Geoteknik mühendisliğinde uygulanan teknik ve yöntemlerin, yazılan kod ile güncelleştirilebilir olması, teknolojik gelişmelere paralellik göstermesi ve güncelliğini koruması bakımından bu tezin önemi ortaya çıkmaktadır.

Tez kapsamında birden fazla zeminler de sıvılaşma potansiyel durumunu, arazide yapılan testler sonucu ortaya çıkan gözlem değerlerinin, Matlab programında Yapay Sinir Ağları Algoritmalarıyla geliştirilen modelde en optimizasyon tahmin değerleri oluşturulup, karşılaştırılması yapılmıştır.

Bölüm 2'de Literatür taramasına yer verilmiş olup, burada zeminde sıvılaşma nasıl oluşur, depremin etkileri sıvılaşmayı tetikleyen durumlar, Matlab programı, Yapay Sinir Ağları incelenmiştir. Bölüm 3'te Metodoloji olup, MATLAB programında Yapay Sinir Ağları modeli kullanılarak geliştirilen model anlatılmıştır. 4. Bölümde Sonuçlar kısmı ile analizler ve gözlemler sonucu tez kapsamında elde edilen veriler incelenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Deprem, Zeminlerde sıvılaşma, Matlab, Yapay sinir ağları

DEVELOPMENT OF ARTIFICIAL NEURAL NETWORK ALGORITHMS BASED ON MATLAB PROGRAM FOR THE ESTIMATION OF SOIL LIQUEFACTION POTENTIALS

ABSTRACT

This thesis study includes work in the Geotechnical Department of Istanbul Gedik University Graduate Education Institute and covers geotechnical engineering graduate degree requirements.

One of the engineering problems posed by the structure-foundation-soil throughout the engineering history. Among these problems, there is a need for civil engineers, namely geotechnical engineers, who are experts in finding solutions to civil engineers of the ground.

As time progresses and industry develops, as a result of increasing migration from rural to urban and changing needs, every land or building that requires transformation in use is used as a construction site. As a result, the observed increases in land values have led individuals to make the best use of existing areas. As a result of this increase, a good and reliable study should be done for the foundation construction of the structure and geotechnical reports should be created.

During an earthquake or as a result of strong vibration, sandy soils have a high potential for liquefaction. Such soils and liquefaction analysis results should be shown in the Geotechnical reports. In order to solve these problems, innovative engineering approaches are developed.

When we use software effectively in geotechnical engineering, we obtain up-to-date, effective, fast, contemporary and reliable opportunities in the field of geotechnical engineering in our changing and developing world. It is planned to create a prediction model with the Artificial Neural Networks approach, which is a data mining method. The importance of this thesis emerges in terms of the fact that the techniques and methods applied in geotechnical engineering can be updated with the written code, they are parallel to the technological developments and they are kept up-to-date.

Within the scope of the thesis, the liquefaction potential situation in more than one soil, the observation values obtained as a result of the tests carried out in the field, the most optimization prediction values were created and compared in the model developed with Artificial Neural Networks Algorithms in the Matlab program.

In Chapter 2, a literature review is included and here, how liquefaction occurs in the ground, the effects of earthquakes, the situations that trigger liquefaction, Matlab program, Artificial Neural Networks are examined. In Chapter 3, the Methodology and the model developed using the Artificial Neural Networks model in the MATLAB program are explained. In Chapter 4, the results obtained in the thesis as a result of analyzes and observations are examined.

Keywords: *Earthquake, Liquefaction of soils, Matlab, Artificial neural networks*

1. GİRİŞ

Mühendislik tarihi boyunca, yapı-temel-zemin ilişkisini ortaya koyabilmek inşaat mühendisliği problemlerinden birisidir. Bu problemler içerisinde, zeminin davranışına çözüm bulabilmek alanında uzman inşaat mühendislerine yani geoteknik mühendislerine ihtiyaç duyulmaktadır.

Zaman ilerledikçe ve sanayi geliştikçe kırsaldan kente göçün artması ve değişen ihtiyaçlar sonucunda şehir içerisinde kalan her arazi veya kullanım dönüşümü gerektiren yapı bir inşaat alanı olarak kullanılmaktadır. Bunun sonucunda arazi değerlerinde gözlenen artışlar, bireyleri mevcut alanları en iyi şekilde değerlendirmeye yönlendirmiştir. Bu artışın sonucunda yapının temel inşaatı için iyi ve güvenilir bir çalışma yapıp, geoteknik raporları oluşturulmalıdır. Geoteknik raporlar oluşturulurken özverili bir saha çalışmasına ihtiyaç duyulmaktadır. Zeminin cinsi, yapısı, depremselliği gibi fonksiyonlar bu raporlarda nelere ihtiyaç olabileceği konusunda bizlere yardımcı olur.

Deprem esnasında veya güçlü bir titreşim sonucu kumlu zeminlerde sıvılaşma potansiyeli yüksektir. Bu tarz zeminler de sıvılaşma analiz sonuçları da Geoteknik raporlarda gösterilmelidir.

Bu problemleri çözebilmek için çağına uygun, yenilikçi mühendislik yaklaşımları geliştirilmektedir.

Günümüzde hızla gelişen bilişim dünyası çok farklı dillerde yazılım programları ortaya koymaktadır. Bu yazılım dilleri arasında Matlab programı gerek akademik birimlerce gerekse de dünyanın önde gelen kurum ve kuruluşlarınca kullanılan ve hatta desteklenen bir programdır. Matlab programının kullanım alanı olarak; makine mühendisliği, bilgisayar mühendisliği, inşaat mühendisliği vb. gibi birçok mühendislik alanlarında kullanıldığı görülmektedir (Al Bawwab, 2005).

Geoteknik mühendisliğinde yazılımı etkin bir biçimde kullandığımızda, değişen ve gelişen dünyamızda geoteknik mühendisliği alanında güncel, etkili, hızlı, çağını yakalayan ve güvenilir olanaklar elde etmekteyiz. Bir veri madenciliği yöntemi olan

Yapay Sinir Ağları yaklaşımıyla, bir tahmin modelinin oluşturulması planlanmaktadır. Geoteknik mühendisliğinde uygulanan teknik ve yöntemlerin, yazılan kod ile güncelleştirilebilir olması, teknolojik gelişmelere paralellik göstermesi ve güncelliğini koruması bakımından bu tezin önemi ortaya çıkmaktadır.

Bölüm 2’de Literatür taramasına yer verilmiş olup, burada zeminde sıvılaşma nasıl oluşur, depremin etkileri sıvılaşmayı tetikleyen durumlar, Matlab programı, Yapay Sinir Ağları incelenmiştir. Bölüm 3’te Metodoloji olup, MATLAB programında Yapay Sinir Ağları modeli kullanılarak geliştirilen model anlatılmıştır. 4. Bölümde Sonuçlar kısmı ile analizler ve gözlemler sonucu tez kapsamında elde edilen veriler incelenmiştir.

1.1 Amaç/ Önem

Bu tezin amacı ve önemi:

- Önerilen bu tez çalışması zemin koşulları bağlı olarak zeminin sıvılaşma durumunu Matlab Programı ile Yapay Sinir Ağı oluşturulup tahmin edilmesini,
- Daha etkin, hızlı, güvenilir, ekonomik ve geliştirilebilir tasarımlar ve uygulamalar için geliştirilmiş program üretmek,
- Geliştirilecek bu program ile son çıkan TBDY-2018 uyumlu olması ve meslekteki bu ihtiyacın karşılanmasını,
- Zeminlerin alınan bilgiler ile oluşturulacak bir veri tabanı ile ileride zeminler için de sıvılaşma durumuna ışık tutulması mümkündür. Bir çağdaş bilgi işleme tekniği olan Yapay Sinir Ağları yaklaşımı ile bir tahmin modeli geliştirilerek farklı zeminler de oluşan sıvılaşma potansiyelleri önceden tahmin edilebilecektir.

Bu tez kapsamında zeminlerin sıvılaşma potansiyeli hareketlerinin incelenmesi. Bu zemin hareketleri ile bunlara etki eden faktörler arasındaki ilişkinin belirlenmesi. Bu doğrultuda kazı alanlarından elde edilen aletsel ölçümler ve kazı bilgileri ile bilgisayar ortamında bir veri bankası (databank) oluşturmak. Böylelikle Yapay Sinir Ağı aracılığıyla Levenberg-Marquardt Algoritmasına dayalı tahmin modeli geliştirilerek, değişimlerini incelemek amaçlanmıştır.

2. LİTERATÜR TARAMASI

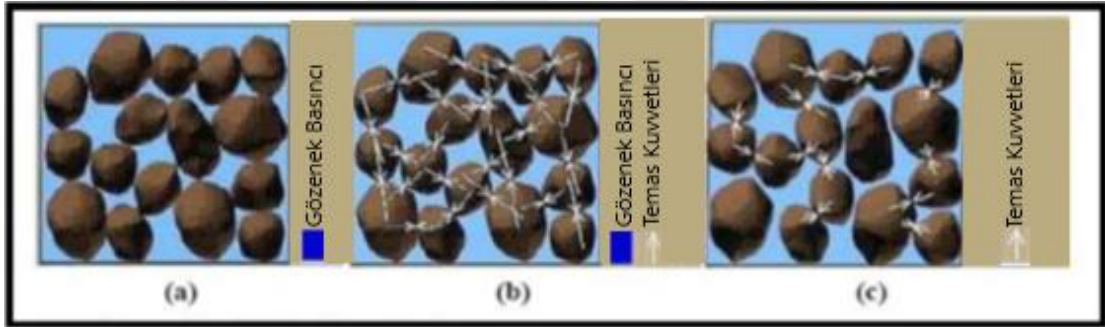
Sıvılaşma, depreme dayalı zemin mühendisliğinin en önemli ve karmaşık konusudur. Sıvılaşma kaynaklı göçme, depremler sırasında önemli bir hasar nedeni olmuştur ve olmaya devam etmektedir. Özellikle 1999 Marmara Depreminde, Sakarya merkezli olmak üzere çok sayıda sıvılaşma kaynaklı yıkım veya ağır hasar gerçekleşmiştir. Sıvılaşma hasarları, köprülerin, demiryolu setlerinin, havaalanı pistlerinin, su altı tünellerinin vb. hizmet verebilirliği üzerinde de hayati öneme sahiptir. Bu nedenle, sıvılaşma potansiyelini tahmin etmek ve hassas alanlarda sıvılaşmaya karşı önlem almak önemlidir. Temellerin ani taşıma gücü kaybı, istinat duvarlarının hareket etmesi ve aşırı yanal zemin hareketi gibi depremlerde sıvılaşmanın neden olduğu ciddi hasarların birçok örneği vardır. Bu sıvılaşma olgusunun insan yaşamı ve ekonomi üzerindeki etkisi önemli olduğundan, inşaat mühendisleri bu sorunu araştırmaya büyük ilgi duymaktadır.

2.1 Sıvılaşma Hakkında Literatür Taraması

Sıvılaşma kelimesi köken olarak latince “liquefacere” kelimesinden gelir. Sıvılaşma, hızlı boşluk suyu basıncındaki ani artış, nedeniyle zeminin kesme dayanımının topyekün olarak çok hızlı şekilde kaybını tanımlayan bir mühendislik kavramıdır (Tolon, 2013).

Bu terim ilk olarak Terzaghi ve Peck tarafından, 1948'de, çok gevşek kumların, hafif bozulmaları nedeniyle ortaya çıkan, önemli dayanım kaybını tanımlamak için kullanılmıştır (Terzaghi ve Peck, 1948). Benzer şekilde, 1953'te Mogami ve Kubo, sismik olarak tetiklenen döngüsel yükleme nedeniyle kesme mukavemeti kaybını tanımlamak için aynı terimi kullanmışlardır. Ancak, 1964 Niigata depremine kadar önemi tam olarak anlaşılammıştır. Bu deprem sırasında yapısal hasarın nedenlerinin, önemli ölçüde zeminde sıvılaşma potansiyeline sahip doymuş kumlu zeminler üzerine inşaa edilen yapıların eğilmesi ve çökmesi olduğu rapor edilmiştir (Mogami ve Kubo, 1953).

Sıvılaşma terimi, tarihsel olarak, drenajsız koşullar altında doymuş kohezyonsuz zeminlerin monotonik veya tekrarlanan yükler altında bozulmasının neden olduğu zemin deformasyonlarını içeren çeşitli olaylarla birlikte kullanılmıştır. Drenajsız yükleme koşulları altında aşırı boşluk basıncının oluşması, tüm sıvılaşma olaylarının ortak özelliğidir. Şekil 2.1a'da gösterildiği gibi, zeminde büyük bir efektif gerilme oluşuyorsa, titreşimin yoğunluğu veya özel gerilme döngüleri taneler arasındaki temas yüzeylerinde kaymaya neden olabilecek kadar büyük olmalıdır. Tane temasları arasında kaymaya neden olmak (Şekil 2.1b), temasların kararsızlığına neden olmak ve taşınan kuvvetleri aktarmak için titreşimin yoğunluğu veya belirli gerilme döngülerinin sayısı, taneler arasında stabiliteyi bozabilecek kadar büyük olmalıdır ve temas noktalarında oluşan kuvvet suya iletilmeli ve boşluk suyu basıncını arttırabilmelidir (Şekil 2.1c) (Nurhan, 2008).

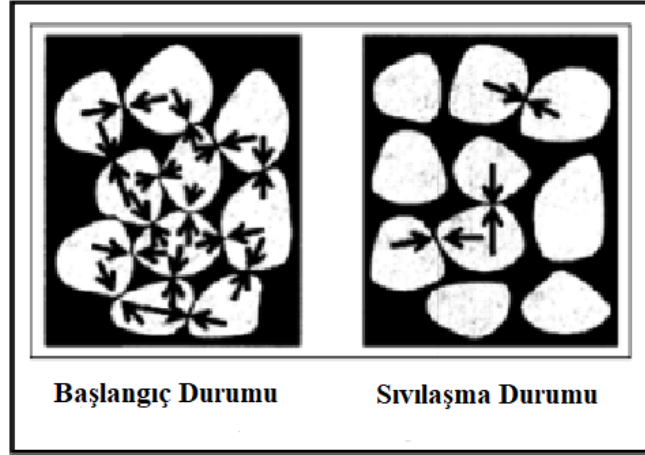


(a) sıvılaşma öncesi zemin taneleri (b) zemin taneleri arasındaki temas kuvvetleri
(c) sıvılaşma sonrası zemin taneleri

Şekil 2.1: Sıvılaşma olayı

Kaynak: (Url-1, 2011).

Sıvılaşma olayı esasen, deprem sarsıntısı veya diğer hızlı yüklemeler kaynaklı olarak zeminin mukavemetinin ve rijitliğinin ani olarak azaldığı bir olgudur. Aynı zamanda, monotonik veya dinamik yükleme koşulları altında aşırı boşluk suyu basıncının oluşması nedeniyle zeminin kesme dayanımının büyük bir yüzdesininin kayb olduğu bir olgudur. Granüler zeminlerde, ortaya çıkan aşırı boşluk suyu basıncı, zemin taneleri arasındaki temas kuvvetini yenecek kadar yüksek olduğunda sıvılaşma olayı meydana gelir (Şekil 2.2). Bu nedenle, zemin taneleri arasındaki temas kaybı sonucu efektif kayma dayanımı azalır, ani kuvvet değişiminden dolayı Zemin davranışı katıdan sıvıya dönüşür. Bu durum, zeminin zayıflamasına neden olur ve nihayetinde sıvılaşmaya yol açar. Sıvılaşma olayı, genellikle, aşırı boşluk suyu basıncının kesme sırasında dağılmadığı drenajsız yükleme koşulları ile ilişkilidir (Castro, 1969).



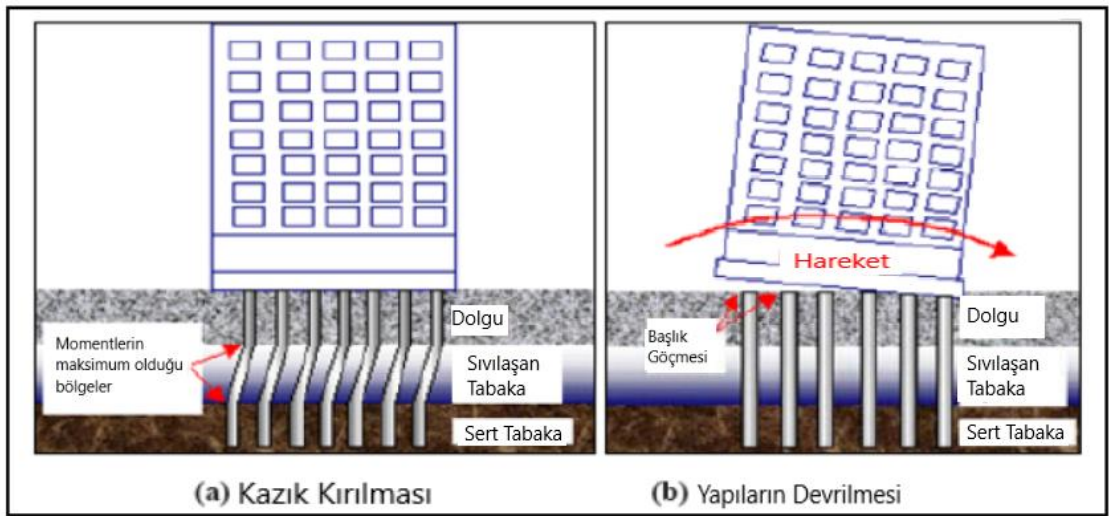
Şekil 2.2: Artan boşluk suyu basıncı ile zemin temas kuvvetini kaybederek sıvılaşma durumuna geçer

Kaynak: (Castro, 1969).

Sıvılaşma riski suya doymuş olan, sıkı olmayan kum zeminlerde, tekrarlı titreşim içeren yükler etkisinde, zeminde sıkışma ve hacim daralması ortaya çıkmaktadır. Bu durum, drenaj olmayan durumlarda, boşluk suyu basıncının yükselmesine neden olur. Tekrarlanan yükler kum Zemin tabakası içinde boşluk suyu basıncının artmasını tetiklediği zaman, zeminde oluşan toplam gerilme, boşluk suyu basıncına eşit değere çıkabilir. Böylece, kohezyonsuz kum zeminde kayma direncini kaybolur ve sanki bir sıvı gibi davranarak büyük yer hareketleri ortaya çıkar. Böylece sıvılaşma ortaya çıkmış olur. Zeminde deprem etkisi altında sıvılaşmasının etkisinin görüldüğü en bilinen örnekler; 1964 Niigata, 1920 California Calvers, 1938 Montana Fort Peck, 1948 Fukui, 1971 California San Fernando, 1964 Alaska Anchorage, 1980 Mino-Owari olarak sayılabilir. Ülkemizdeki son büyük örnek ise 1999 Marmara depremi sırasında ortaya çıkan yaygın sıvılaşmalarıdır. Zemindeki sıvılaşması kısaca, deprem kaynaklı oluşan titreşimlerin suya doymuş kohezyonsuz zeminlerde taşıma gücünün geçici olarak ortadan kalkması şeklinde tanımlanmıştır. Sıvılaşma olayı, mekanizmanın karmaşıklığı nedeniyle, tepkilerin lineer olmaması gibi, malzeme istikrarsızlıkları, deneysel ve sayısal teknik kısıtlar, malzeme modeli formülasyonu ortaya çıkması nedeniyle çok güvenilir ve gerçekçi tahmin yöntemleri geliştirilmelidir. Sıvılaşma olayının neden olduğu ölümler, yaralanmalar ve altyapı sistemlerinde meydana gelen hasarlar, bu riskli bölgelere ait sıvılaşma potansiyellerinin önceden belirlenip değerlendirilmesinde güçlü ve güvenilir yöntemlere ihtiyaç duyulmasına neden olmuştur (Tolon, 2013).

Başka bir ifadeyle sıvılaşma, “artan boşluk suyu basıncı ve azalan efektif gerilme sonucunda granüler bir malzemenin katı halden sıvı hale dönüşmesi” olarak tanımlanmaktadır (Youd ve Idriss., 2001). Aynı zamanda sıvılaşma, titreşim sırasında kum büzülürken büyük boşluk suyu basıncı oluşması nedeniyle suya doymuş gevşek kumun dayanım ve rijitlik kaybıdır (Holzer vd., 2010).

Sıvılaşma, suya doymuş zeminlerde, zemin taneleri arasındaki boşluğun tamamen suyla dolu olduğu zeminlerde oluşur. Bu boşluk suyu basıncı, zemin taneleri üzerinde, parçacıkların birbirine uyguladığı kadar bir basınç uygular. Bir depremden önce, boşluk suyu basıncı görece azdır. Bununla birlikte, sismik titreşimler, su basıncının, zemin tanelerinin birbirine göre kolayca hareket edebileceği noktaya kadar yükselmesine sebep olur. Deprem titreşimi genellikle boşluk suyu basıncında oluşan bu yükselişi tetikler, fakat patlama gibi inşaatla sırasında olabilen aktiviteler boşluk suyu basıncında yükselişe neden olabilir. Sıvılaşma yalnızca suya doymuş zeminde meydana geldiğinden, etkileri en yaygın olarak nehirler, göller, koylar ve okyanuslar gibi su kütlelerinin yakınındaki su seviyesinin altında kalan alanlarda gözlenir. Sıvılaşmanın sonucunda zeminde büyük kaymalar oluşabilir. Sıvılaşma, kum kaynamaları, yanal yayılmalar, akış kırılmaları, aşırı oturmalar, taşıma kapasitesinde göçmeler, kazık kırılmaları (Şekil 2.3a) ve yapıların devrilmesi (Şekil 2.3b) (Url-1, 2011) gibi ağır zemin hasarlarına yol açar. Akış sıvılaşması hasarları, ani oluşumu, gelişme hızları ve genellikle sıvılaşmış zeminin üzerinde hareket ettiği büyük mesafe ile sembolize edilir (Raghudeep, 2008).



Şekil 2.3: Sıvılaşma hasarı örnekleri

Kaynak: (Url-1, 2011).

Yoğun suya doymuş zeminler, drenajsız çevrimsel yükleme altında kademeli olarak yumuşama eğilimi vardır, sonraki statik yükleme sırasında sınırlı şekil değiştirmelere ulaşma durumu, çevrimsel hareketlilik olarak tanımlanır. Çevrimsel hareketliliğe maruz kalan zeminler, drenajsız koşullar altında monotonik olarak yüklendiğinde, genleşme eğilimi boşluk suyu basınçlarını azalttığından, önce yumuşar, ancak daha sonra sertleşir. Çevrimsel hareketlilik, yer değiştirmelerin büyüklüğünden bağımsız olarak rijitlikte kayda değer bir fark ortaya çıkmadığı için sıvılaşmadan ayırt edilebilir (Seed, 1979).

Bir zemin kütesinin statik dengesi için gerekli olan kesme dayanımı, sıvılaşmış durumdaki zeminin kesme mukavemetinden daha büyük olduğunda, akış sıvılaşması meydana gelebilir. Akış sıvılaşmasının aksine, çevrimsel hareketlilik, statik kayma gerilmesi, sıvılaşmış zeminin kayma mukavemetinden daha az olduğunda meydana gelir (Kramer, 1996). Suya doymuş bir kum, zemin titreşime maruz kalırsa, sıkışma ve hacminde azalma eğilimi gösterir. Drenaj yapılmıyorsa, hacimdeki azalma eğilimi zemin taneleri aralarındaki suyu sıkıştırarak boşluk suyu basıncının artmasına neden olacaktır. Efektif gerilme ilkesine göre, efektif gerilme, toplam gerilme eksi boşluk suyu basıncına (2.1) eşittir (Seed and Lee, 1966).

$$\sigma' = \sigma - u \quad (2.1)$$

Yukarıdaki 2.1 denkleminde,

σ' = efektif gerilme,

σ = toplam gerilme,

u = boşluk suyu basıncıdır.

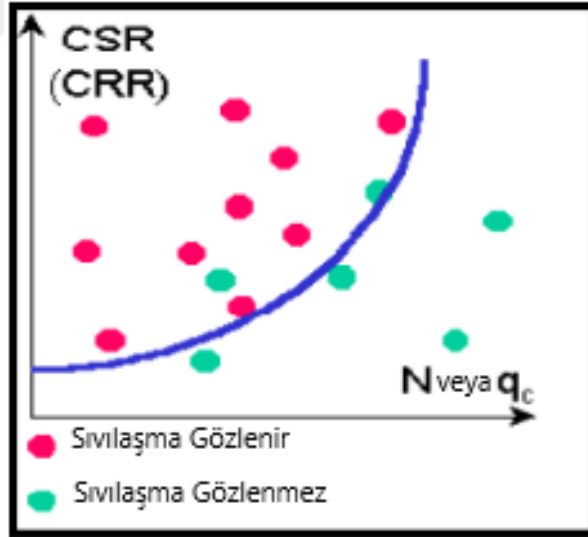
Toplam gerilme değeri sabit kalırsa, boşluk suyu basıncı u kademeli olarak arttıkça, efektif gerilme σ' kademeli olarak azalır. Boşluk suyu basıncı, toplam gerilmeye eşit olduğu noktaya kadar yükselirse, efektif gerilme sıfır olur. Bir zeminin rijitliği ve mukavemeti efektif gerilmenin büyüklüğüne bağlı olduğundan, efektif gerilme sıfır olduğunda ve zemin sıvılaşma durumunda olduğunda zemin dayanımını tamamen kaybeder ve sıvılaşma ortaya çıkar (Seed and Lee, 1966).

Sıvılaşmanın meydana gelme potansiyelinin değerlendirilmesi, eşdeğer deprem yükü ve sıvılaşma direnci ölçümlerinin karşılaştırılmasıyla gerçekleştirilir. Deprem yüklemesinin karakterinin belirlenmesine yönelik en yaygın yaklaşım, çevrimsel

kayma gerilmelerinin kullanılmasıdır. Çevrimsel kayma gerilmenin genliğini, başlangıçtaki efektif düşey gerilme ile normalleştirerek, bir çevrimsel gerilim oranı (CSR) elde edilir. CSR, bir deprem tarafından bir zemin profilinde farklı derinliklerde etkilenen yükleme seviyesini temsil edebilir. Döngüsel kayma gerilmelerini değerlendirmek için farklı yaklaşımlar vardır: Bunun için saha tepki analizleri gerçekleştirilebilir veya CSR'yi tepe zemin yüzeyi ivme genliğinin bir fonksiyonu olarak belirlemek için “basitleştirilmiş” bir yaklaşım kullanılabilir (Kramer and Seed, 1988).

Sıvılaşma direnci sahada elde edilen performansa dayalı olarak karakterize edilir. Gerçek deprem geçmişlerinin detaylı araştırılması, her vaka (deprem) geçmişi için yerinde özelliklerin (genellikle SPT veya CPT direnci) ve CSR kombinasyonlarının belirlenmesine olanak sağlamıştır.

Sıvılaşmanın gözlemlendiği ve gözlemlenmediği durumlar için CSR'yi SPT'nin düzeltilmiş değerleri ($CSR-(N_1)_{60}$) veya CPT değerleriyle ($CSR-q_c$) çizerek, sıvılaşmanın tarihsel olarak gözlemlendiği koşulları sınırlayan bir eğri elde edilebilir (Şekil 2.4) (Kramer, 1996).



Şekil 2.4: CRR (CSR) to SPT-N (qc) ile sıvılaşma oluşumu

Kaynak: (Url-1, 2011).

Bu eğri, belirli bir penetrasyon direncine sahip bir zeminin sıvılaşmasının, sıvılaşmaya karşı koyabileceği maksimum CSR olarak dikkate alınır, bir döngüsel direnç oranı eğrisi olarak (CRR) düşünülebilir. Daha sonra, deprem yüklemesi (CSR)

ile sıvılaşma direnci (CRR) karşılaştırılarak sıvılaşma potansiyeli değerlendirilebilir ve bu genellikle sıvılaşmaya karşı bir güvenlik faktörü (2.2) olarak ifade edilir,

$$FS = CRR / CSR > 1 \quad (2.2)$$

Güvenlik katsayısı (FS) birden büyükse, sıvılaşma direncinin deprem yükünü aştığını ve dolayısıyla sıvılaşmanın beklenmediğini gösterir. Sıvılaşmaya neden olan faktörleri ve mekanizmaları belirlemeye yönelik birçok çalışma yapılmıştır. Zemin tanelerinin boyutu, şekli ve derecelendirme spektrumu, başlangıç bağıl yoğunluğu, ince tane içeriği gerilme seviyesi, drenaj özellikleri, şekil değiştirme geçmişi, titreşim özellikleri, yükleme periyodu ve tutulan hava seviyesi sıvılaşma sürecini etkileyen ana faktörlerdir (Kramer 1996, Seed and Kramer 1998).

2.1.1 Zeminlerin sıvılaşma potansiyelleri

Sıvılaşmanın analizine ve değerlendirilmesine yönelik ilk adım, belirli bir alanda potansiyel olarak sıvılaşabilir zemin katmanlarının belirlenmesidir. Bu amaçla, Çin kriterleri mühendislik uygulamalarında yirmi yıldan uzun süredir yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu kriterler, Çizelge 2.1'de (Seed and Idriss, 1982) gösterildiği gibi değiştirilmiş ve formüle edilmiştir. Daha sonra, Çizelge 2.2'de gösterildiği gibi, 2000 yılında Andrews ve Martin tarafından silt ve kil tanımları için bu kriterlerde değişiklikler yapılmıştır (Andrews and Martin, 2000).

Çizelge 2.1: Seed ve Idriss tarafından önerilen formüle edilmiş Çin kriterleri

Sıvılaşma Potansiyeli Olan Zeminler	
İnce Malzeme (<0.005 mm)	≤ %15
Likit Limit (LL)	≤ %35
Su Muhtevası (W)	≥ % (0.9xLL)

Kaynak: (Seed and Idriss, 1982).

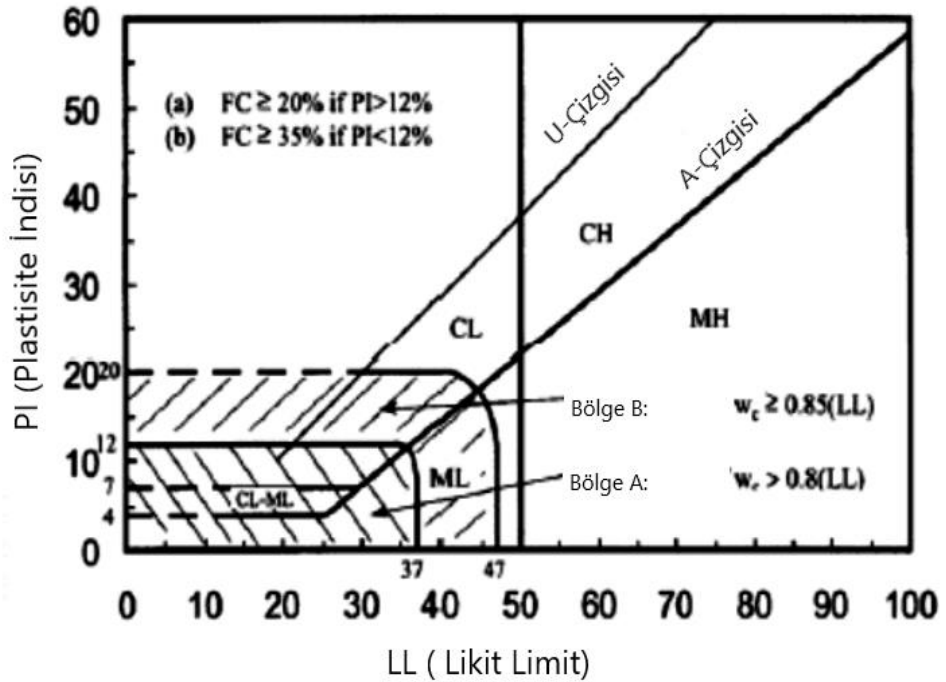
Seed ve arkadaşları 2003 yılında yaptıkları çalışmada, 1999 yılında gerçekleşen, Kocaeli ve Chi Chi, Tayvan'daki deprem olayları sırasında meydana gelen binaların zemine batma olaylarını doğrudan zemin sıvılaşmasıyla ilişkilendirmiş ve Şekil 2.5'te gösterildiği gibi Çin kriterlerinin yerine yeni kriterler önermiştir. Bu kriterler, plastik indeksi (PI) 12'den az ve likit limiti (LL) 35'den daha az olan tüm zeminleri, toprak doğal nem içeriğinin (0.8*LL)'den büyük olması koşuluyla, potansiyel olarak sıvılaşabilir olarak sınıflandırmaktadır (Seed vd., 2003).

Çizelge 2.2: Andrews ve Martin tarafından önerilen değiştirilmiş Çin kriterleri

	Likit Limit <32%	Likit Limit $\geq 32\%$
Kil miktarı (<0.002 mm) <10%	Potansiyel sıvılaşma	Plastik kil olmayan tanecikler dikkate alınarak daha ileri çalışmalar gerekli
Kil miktarı (<0.002 mm) <10%	Plastik olmayan kil boyutlu taneler dikkate alınarak daha ileri çalışmalar gerekli	Sıvılaşmaz

Kaynak: (Andrews and Martin, 2000).

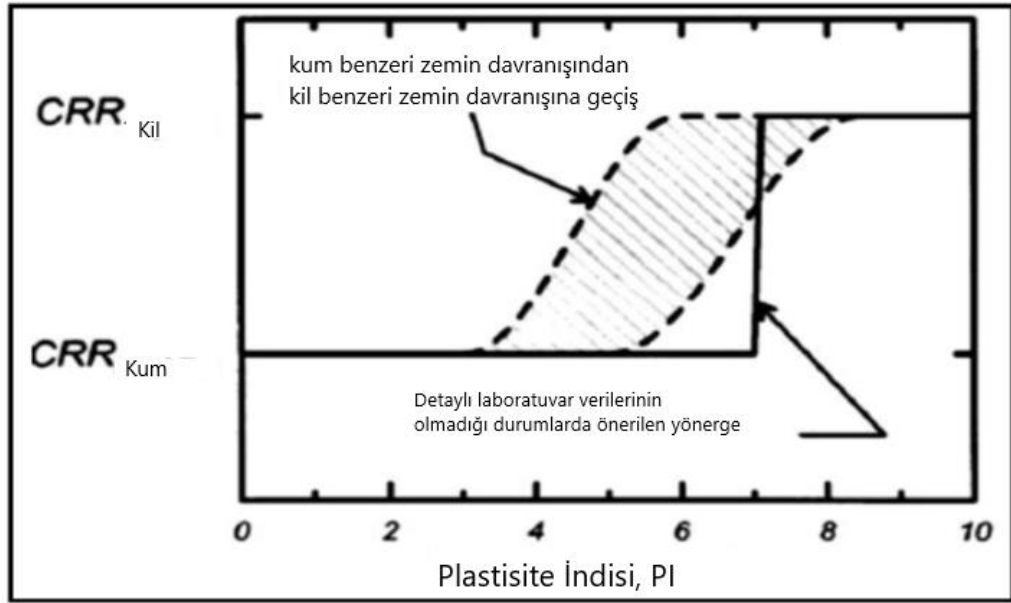
Bu konuda son değişiklik girişimi, 2004 yılında Boulanger ve Idriss tarafından yapılmıştır. Sıvılaşma direncini, granüler ve ince taneli zeminlerin deformasyonunu döngüsel laboratuvar testleri kullanarak değerlendirdiler ve Şekil 2.6'da gösterilen ve yine Çin kriterlerinin yerini alan yeni kriterleri önerdiler (Boulanger, and Idriss, 2004).



Şekil 2.5: Seed tarafından önerilen ince taneli sedimanların sıvılaşma duyarlılığı kriterleri

Kaynak: (Seed vd., 2003).

Bu metodoloji, ince taneli zeminlerin deformasyon davranışını iki farklı türe ayırır; Kum benzeri davranış bölgesindeki zeminler sıvılaşmaya duyarlıdır, kil benzeri davranış bölgesindeki zeminlerden önemli ölçüde daha düşük döngüsel direnç oranı, CRR değerlerine sahiptir (Boulanger and Idriss, 2004).



Şekil 2.6: Boulanger ve Idriss tarafından önerilen kum benzeri ve kil benzeri sediment davranışını ayırt etme kriterleri

Kaynak: (Boulanger and Idriss, 2004).

2.1.2 Sıvılaşma duyarlılığı

Tüm zeminler, şiddetli deprem yer hareketi altında bile sıvılaşmaya duyarlı değildir. Sıvılaşmanın oluşması için bazı temel gereksinimler vardır. 1996'da Kramer, sıvılaşma duyarlılığının belirlenebileceği dört genel duyarlılık kriteri tanımlamıştır; tarihi, jeolojik, kompozisyon ve durumu (Kramer, 1996). Bir zeminin sıvılaşmaya duyarlı olup olmadığını belirlerken ilk olarak tarihsel kriterler dikkate alınır. Deprem sonrası incelemelere ve vaka geçmişlerine dayalı olarak, araştırma çalışmaları, geçmişte sıvılaşan bir sahanın, toprak ve yeraltı suyu koşulları değişmeden kaldığında tekrar sıvılaşmaya maruz kalabileceğini göstermektedir (Youd, 1984).

Sıvılaşma olan sahalardan elde edilen zemin ve su koşullarının benzerlikleri, sıvılaşmaya eğilimli diğer sahaları kontrol etmek için bir temel veri seti olarak ayrıca değerlendirilebilir. Daha sonra, sıvılaşma gözlemlenen tarihsel kanıtlarının sayısına dayalı olarak bir sıvılaşma duyarlılığı haritası oluşturulabilir. Sediment ortamı, zemin yaşı ve yeraltı suyu koşulları gibi jeolojik kriterler, zeminlerin sıvılaşma duyarlılığını etkileyebilir. Sıvılaşabilir zemin bölgelerinin aralığı, nispeten dar bir jeolojik ortam aralığıdır. Genel olarak, akarsu ve kolüvyal sedimentler gibi gevşek hallerde biriken zemin, suya doymun olduğunda yüksek sıvılaşma duyarlılığına sahiptir. Daha önce bahsedildiği gibi, sıvılaşma suya doymun zeminlerde meydana gelir, dolayısıyla yeraltı suyu seviyesi konumu da zeminin sıvılaşma duyarlılığını etkiler. Bileşim

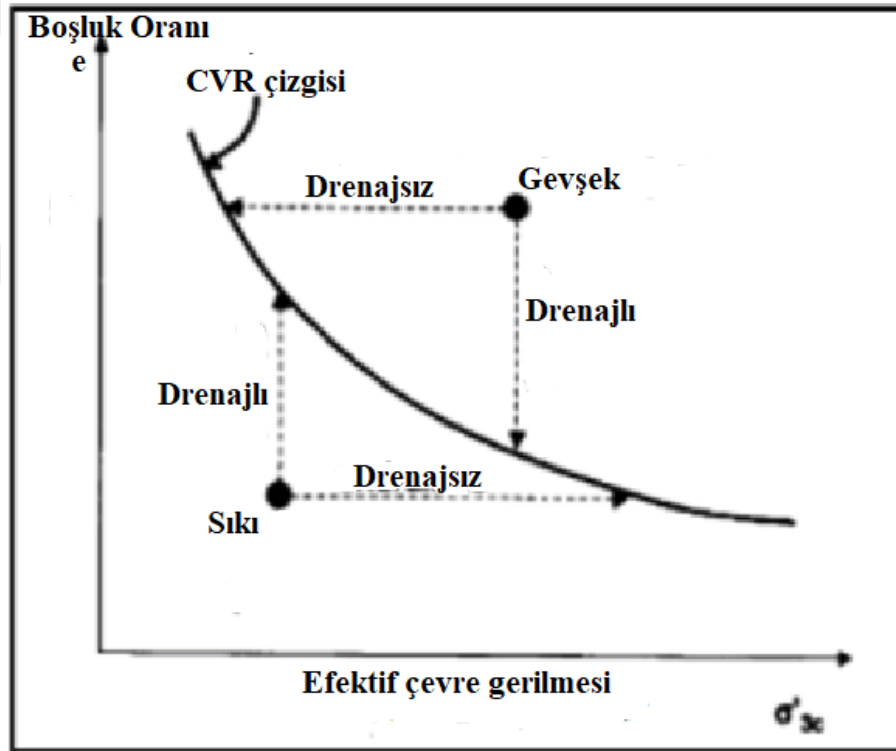
kriterleri, zeminlerdeki hacim değişikliği davranışının etkisinin, sıvılaşma duyarlılığından sorumlu olduğunu göstermektedir. Zemin gradasyonu, partikül şekli, ince tane içeriği, plastisite indeksi (PI), likit limit (LL) ve su içeriği (W) gibi birçok bileşim faktörü, zeminin sıvılaşma duyarlılığını etkiler (Youd, 1991).

Erken sıvılaşma potansiyeli araştırmasında, Wang ilk olarak 1979'da Çin'deki depremlerden sonra sıvılaşmanın gözlemlendiği veya gözlemlenmediği alanlardan alınan verilere dayanarak sıvılaşma duyarlılığı için kriterleri belirlemiştir. Bu verilere dayanarak, 1982 yılında Seed ve Idriss, zeminin sıvılaşmaya duyarlı olup olmadığını belirlemek için killi zeminler için üç kriter önermiştir. Sadece üç kriteri de karşılayan zeminlerin sıvılaşmaya duyarlı olduğu kabul edilmiştir (Youd, 1991). Durum kriterleri, zemin sıvılaşma duyarlılığını değerlendirmek için kullanılan nihai kriterlerdir. Bir zemin, durum kriterlerini karşılayamıyorsa, yine de sıvılaşmaya duyarlı olmayabilir; hatta önceki üç kriteri de karşılayabilir. “Durum” terimi, deprem anında zeminin başlangıçtaki efektif gerilmesini ve yoğunluğunu ifade eder. Aşırı boşluk suyu basıncı, zemin yoğunluğu ve başlangıç gerilmesi koşulları arasındaki ilişkiden dolayı, sıvılaşma duyarlılığı zeminin başlangıç durumuna güçlü bir şekilde bağlıdır. Durum kriterleri, daha önce bahsedilen kriterlerden farklı olarak, akış sıvılaşması ve çevrimsel hareketlilikten farklıdır. Sıvılaşma duyarlılığının değerlendirilmesinde başlangıç durumlarının rolünü göstermek için, gerek şart olarak, kohezyonsuz zemin davranışına ilişkin iki temel kavram sunulmuştur (Boulanger vd., 2005).

Sıvılaşma duyarlılığının değerlendirmesi aynı zamanda bir başka kritere dayanmaktadır. Casagrande, 1936'da gevşek ve başlangıçta yoğun kum numunelerinin drene edilmiş, gerilme kontrollü üç eksenli deneylerinde, büyük şekil değiştirmelerde tüm numunelerin aynı yoğunluğa yaklaştığını ve sabit kesme direnci ile kesmeye devam ettiğini göstermiştir. Buradi sabit zemin yoğunluğuna karşılık gelen boşluk oranı (e), kritik boşluk oranı olarak adlandırılmıştır, Casagrande farklı çevre basınçları için deneyler yaparak, Şekil 2.7'de gösterildiği gibi kritik boşluk oranı, (CVR) adı verilen bir çizgi oluşturdu. Bu CVR çizgisi, monotonik yükleme altında gevşek ve yoğun durumları ayırmak için bir sınır olarak kullanılır. Zemin büzülme davranışı gösterdiğinde aşırı boşluk basıncı pozitif olarak üretildiğinden, CVR çizgisinin üzerinde çizilen ilk boşluk oranlarına sahip doymuş zeminler akış sıvılaşmasına karşı hassastır. Kararlı şekil değiştirme durumu ilk olarak bir seri

gerilme kontrollü drenajsız üç eksenli deneylere dayalı olarak önerilmiştir. Kararlı durum çizgisi (SSL) olarak adlandırılan bir hat, sabit deformasyon durumunda boşluk oranı ile efektif sınırlayıcı basınç arasındaki ilişkiyi temsil eder (Casagrande, 1936).

Pratikte, SSL, zeminin akış sıvılaşmasına duyarlı olabileceği veya olmayabileceği koşulları belirlemek için kullanışlıdır. Şekil 2.7’de, konumu, SSL'nin üzerinde olan bir zeminin akış sıvılaşmasına duyarlı olduğunu, ancak bunun yalnızca statik kayma geriliminin kararlı duruma ait dayanımı aşması halinde olduğunu gösterir. İki kavram, CVR ve SSL, akış sıvılaşmasına karşı duyarlılığı anlamak için özellikle yararlıdır. Saha gözlemlerine ve laboratuvar test sonuçlarına dayanarak, kohezyonsuz zeminlerin sıvılaşma özellikleri bir dizi parametreden etkilenir. Sıvılaşma duyarlılığını etkileyen bu parametreler aşağıda verilmiştir.



Şekil 2.7: Boşluk oranı ve Efektif çevre gerilmesi grafiğinin CVR çizgisi altında kalan kısım sıkı kum iken üzerindeki kısım gevşek kum

Kaynak: (Casagrande, 1936).

2.1.2.1 Düşey efektif gerilme ve aşırı konsolidasyon

Efektif düşey gerilmedeki bir artışın zeminin taşıma kapasitesini ve kesme mukavemetini arttırdığı ve dolayısıyla sıvılaşmaya neden olmak için gereken kesme gerilmesini arttırdığı ve sıvılaşma potansiyelini azalttığı iyi bilinmektedir. Saha

gözlemlerinde, araştırmacılar tarafından, 15 ila 18 m'den (50 ila 60 ft) daha derinde bulunan doymuş kumların sıvılaşma olasılığının olmadığı sonucuna varılmıştır. Bu derinlikler, suya doygun kumlu bir zeminin efektif basıncının değerı 190 kN/m²'yi (2 tsf) aşarsa sıvılaştılamayacağını 1969'da belirten Kishida'nın çalışması ile genel olarak uyumludur. Hem teorik hem de deneysel veriler, belirli bir zemin için daha yüksek aşırı konsolidasyon oranının, hareketsiz durumda daha yüksek yanal zemin basıncına yol atığını ve dolayısıyla sıvılaşmaya neden olmak için gereken kayma gerilmesi oranını arttırdığını göstermektedir (Seed vd., 1977).

2.1.2.2 Zeminin yaşı ve kökeni

Alüvyon ve akarsu kökenli doğal sedimentler genellikle gevşek halde zemin taneleri içerir. Bu sedimentler genç, zayıf ve imentolaşmanın neden olduğu ek dayanımdan yoksundur. 1977'de Seed ve diğerleri, genel bir kural olarak, alüvyon yataklarının geç çağdan daha eski olduğunu belirtmişlerdir (Seed vd., 1977). Pleistosen için (yaşı 10.000-130.000 yıl) şiddetli deprem koşulları dışında sıvılaşma olasılığı düşükken, geç Holosen okellerinin (1.000 yıl veya daha az) sıvılaşması en muhtemeldir ve daha nceki Holosen (1.000-10.000 yıl) tortuları orta derecede sıvılaşma riski içerir.

2.1.2.3 Sismik şekil değiştirme geçmişi

Laboratuvar test sonuçları, önceki sismik şekil değiştirme geçmişinin zeminlerin sıvılaşmaya karşı direncini önemli lde etkileyebileceği gösterilmiştir (Seed vd., 1977). Düşük seviyelerde aşırı boşluk suyu basıncı üreten bir dizi önceki sarsıntının bir sonucu olarak önceki sismik şekil değiştirme geçmişinin düşük seviyeleri, müteakip döngüsel yükleme sırasında zeminin boşluk basıncı oluşumuna karşı direncini önemli lde artırabilir. Bu artan direnç, herhangi bir genel yapısal yeniden düzenleme meydana gelmeden temas noktalarındaki kk yerel kararsızlıkların ortadan kaldırılması nedeniyle, zeminin düzgün bir şekilde yoğunlaşmasından veya orijinal yapıdaki parçacıkların daha iyi kenetlenmesinden kaynaklanabilir (Seed vd., 1977). Bununla birlikte, büyük boşluk basıncı oluşumu ve tam sıvılaşma koşulları ile ilişkili büyük şekil değiştirmeler, eşit olmayan yoğunlaşma ve su içeriğinin yeniden dağılımı nedeniyle zeminde zayıf bölgeler geliştirebilir ve böylece sonraki döngüsel yükleme sırasında zeminin boşluk basıncı oluşumuna karşı direncini azaltabilir (Whitman, 1985).

2.1.2.4 Doygunluk derecesi

Kuru zeminlerde sıvılaşma olmaz. Sadece titreşim sırasında yoğunlaşmanın bir sonucu olarak meydana gelen oturma biraz endişe verici olabilir. Mevcut laboratuvar deney sonuçları, suya doygunluk derecesinin azalmasıyla zeminler için sıvılaşma direncinin arttığını ve düşük doygunluk derecesine sahip kum numunelerinin ancak şiddetli ve uzun süreli deprem sarsıntısı altında sıvılaşabileceğini göstermektedir (Seed vd., 1977).

2.1.2.5 Sıvılaşma – deprem ilişkisi

Yer hareketlerinin değişimi dikkate alınır, bir deprem sırasında zemin sıvılaşmaya maruz kaldığında, rijitliğinin önemli ölçüde azaldığı söylenebilir, bu da sıvılaşmış bölgenin üzerindeki zemin hareketinin genliğini ve frekans içeriğini güçlü bir şekilde etkileyebilir. Zeminin değişen özellikleri, yüksek frekanslı yer hareketlerini filtreleme eğilimindedir, böylece yalnızca daha düşük frekanslı dalgaların yer yüzeyinde devam etmesine izin verir. Düşük frekanslı yer hareketleri, özellikle düşük doğal frekanslara sahip yumuşak yapılara zarar verebilecek büyük yer değiştirmelere neden olabilir (Seed and Idriss, 1982).

Bununla birlikte, faz dönüşüm davranışıyla ilişkili genleşme, sıvılaşmanın başlamasını takiben yüksek frekanslı ani artışlara neden olabilir. 2003 yılında Youd ve Carter, döngüsel yüklemeler sırasında sıvılaşmanın neden olduğu zemin gevşemesinin etkilerini analiz etmek için beş aletle, sahadaki yer hareketi kayıtlarını incelemiştir. Sıvılaşmış zeminin gevşemesi, sıvılaşmış zeminin rijitliği ve efektif gerilmenin azalmasına neden olan boşluk basıncının oluşmasından kaynaklanmaktadır (Youd and Carter, 2003). Deprem-sıvılaşma ilişkisinin öneminden dolayı, Seed ve Idriss 1982'de $M_w=7,5$ için basitleştirilmiş davranışı diğer büyüklükteki depremlerde kullanabilmek için büyüklük ölçekleme faktörleri (MSF) olarak adlandırılan korelasyonu ortaya koymuştur. Bu faktörler, aşağıdaki denklem (2.3) ile basitleştirilmiş eğrileri yukarı ve aşağı ölçeklendirmek için kullanılır (Seed and Idriss, 1982).

$$CSR = CRR_{7,5} \times MSF \quad (2.3)$$

Burada;

$$CRR_{7,5} = \text{Çevrimsel direnç oranı,}$$

MSF = Büyüklük ölçekleme faktörü.

2018 Deprem Yönetmeliğinin Bölüm 16.6 başlığında sınılaşma riski için ne gibi durumlarda araştırma yapılması gerektiği açıklanmıştır. 2018 Deprem Yönetmeliğinin Bölüm 16.6'ya göre, daha önce belirlenmiş olan DTS yani Deprem Tasarım Sınıfı 1, 1a, 2 ve 2a olan yapılarda lokal zemin sınıfı eğer ZD, ZE veya ZF olması durumunda, devamlı bir tabaka yada kalın mercekler şeklinde bulunan ve 2018 Deprem Yönetmeliğinin Bölüm 16.6.6'da ifade edilen hallerin dışında olan kumlu zeminler için sınılaşma riskinin tespit edilmesi zorunlu hale getirilmiştir. Bu kısımda tanımlanmış olan muafiyet helleri için, DTS=4 olması halinde kil içeriği değeri %20'den ve plastisite indeksi değeri %10'dan daha büyük olan kumlu zeminler ile ince dane oranı % 35 değerinden yüksek ve düzeltilmiş SPT vuruş sayısı, $N_{1,60} > 20$ olan kumlu zeminlerdir.

2018 Deprem Yönetmeliğinde sınılaşma analizi için SPT testlerinin neticelerine bağlı olarak yapılması için belirlenen hesap yaklaşımı basitleştirilmiş metoda bağlı olarak (Youd vd., 2002) tarafından önerilmiş olan değişikliklerin ve ince dane miktarının sonucunda çevrimsel dayanım oranının formülize edilmiş değerlerinin dikkate alındığı metottur. 2018 Deprem Yönetmeliğinde sınılaşma analizine ilişkin olarak CPT (Koni Penetrasyon Deneyi) neticelerinin yahut kayma dalgasının hızına ait değerlerin kullanılması gibi uygulamacılar tarafından kabul görmüş metotların kullanılması da alternatif olarak ifade edilmiştir.

Sınılaşma riskine karşı olarak emniyet şartı, zemindeki sınılaşma dayanımının zeminde ortaya çıkacak sismik aktivite nedeniyle meydana gelen ortalama çevrimsel kayma gerilmesine oranı değerinin 1.10'dan büyük olması şartı şeklinde belirlenmiştir. Sınılaşma dayanımı, τ_R , değerinin hesaplanabilmesi için moment büyüklüğü $M_w=7.5$ olan deprem için bulunan çevrimsel dayanım oranı, $CRR_{M_w=7.5}$, değerinin tespiti gereklidir. Söz konusu değer ise zemindeki ince dane muhtevası dikkate alınarak en baştan hesaplanarak $N_{1,60f}$ değerinin kullanımı ile gerçekleştirilmiştir. Tasarım için alınan depreme ait moment büyüklüğü değeri 7.5'ten farklı olursa, bu durumda depremin büyüklüğü için hesaplanan düzeltme katsayısı, yani CM değerinin kullanımı gereklidir. Zemindeki kayma gerilmesinin hesaplanabilmesi için gerekli olan maksimum yer ivme değeri ise kısa periyot tasarım spektral ivme katsayısı olan S_{DS} , %40'ı olarak işlemlere alınacaktır. Fakat

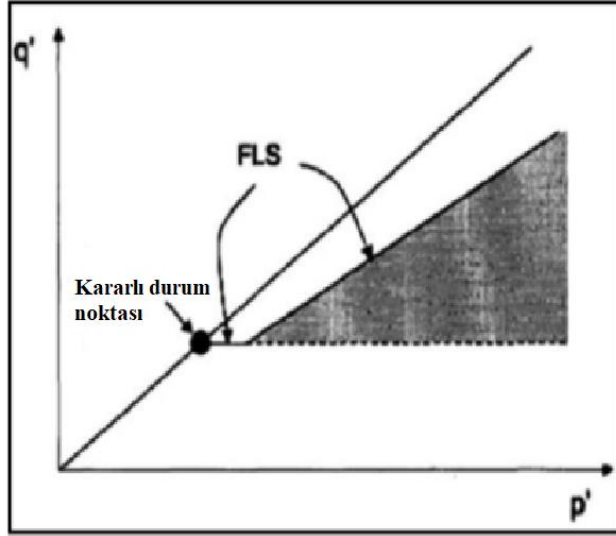
tasarım depremine ait büyüklüğün ne şekilde tespit edileceği konusunda 2018 Deprem Yönetmeliğinde tarif edilmiş net bir bilgi bulunmamaktadır.

2.1.2.6 Akış sıvılaşması yüzeyi ve aşırı boşluk basıncı ilişkisi

Akış sıvılaşmasının meydana geldiği gerilme durumunu anlamının en kolay yolu, gerilme yolunu izlemektir. Gerilme izi boşlukta çizildiğinde, sıvılaşmanın başlangıcındaki etkin gerilme koşulları, akış sıvılaşma yüzeyi (FLS) olarak adlandırılan üç boyutlu bir yüzey oluşturur (Hanzawa vd., 1979).

FLS'nin tanımına göre, eğer bir zemin elemanının gerilme koşulları, drenajsız koşullar altında gerilme yolu FLS'ye ulaşacak şekilde ise, akış sıvılaşması tetiklenecek ve zeminin kesme dayanımı kararlı durum mukavemetine indirgenecektir. Bu nedenle FLS, akış sıvılaşmasının başladığı durumda etkin gerilme koşullarını tanımlar. FLS, hem döngüsel hem de monotonik yüklemeye uygulanabilir. Akış sıvılaşmasının gelişimi iki aşamayı takip eder. İlk aşama, gerilme yolunu ilk durumundan FLS'ye taşımak için aşırı boşluk basıncının ortaya çıkmasını içerir. İkinci aşama, etkili gerilme yolu, FLS'den kararlı durum noktasına hareket ettiğinde büyük gerilmelerin geliştiği gerilme- yumuşama aşamasını içerir (Huang, 2008).

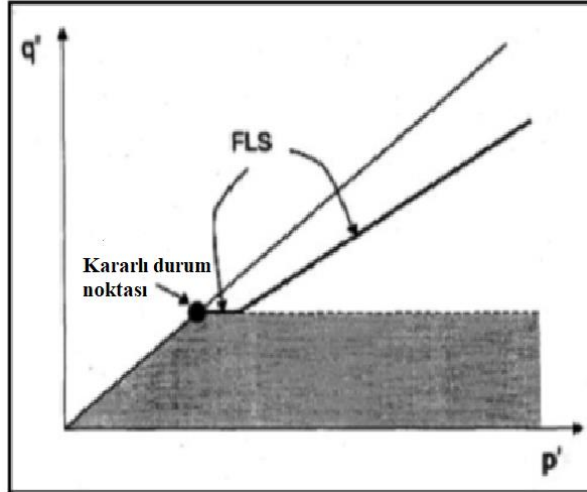
Farklı sıvılaşma olayları, farklı seviyelerde boşluk basıncının ortaya çıkmasını gerektirir. Daha önce bahsedildiği gibi, statik denge için kesme gerilmesi kararlı durum dayanımından büyük olduğunda akış sıvılaşması meydana gelebilir. Bu nedenle, Şekil 2.8'deki koyu bölgede çizilen ilk durumlar, akış sıvılaşmasına karşı hassastır. Zeminin başlangıç durumu FLS'ye yakınsa, grafikten de görülebileceği gibi, çok küçük statik veya dinamik bozulmalar akış sıvılaşmasını tetikleyebilir (Kramer and Seed, 1988).



Şekil 2.8: Akış sıvılaşmasına duyarlı başlangıç gerilme koşulları bölgesi

Kaynak: (Huang, 2008).

Buna karşılık, daha yüksek aşırı boşluk suyu basıncı seviyesi gerektiğinden, başlangıç gerilmesi durumu FLS'den daha uzaksa, zeminin akış sıvılaşmasını tetikleme şansı daha azdır. Çevrimsel hareketlilik, aşırı boşluk basıncı açısından farklı bir durum oluşturmaktadır. Şekil 2.9'daki gölgeli alanda bulunan bir zeminin başlangıç durumları, çevrimsel hareketliliğin olası oluşumunu gösterir (Huang, 2008).



Şekil 2.9: Çevrimsel hareketliliğin duyarlı alanı

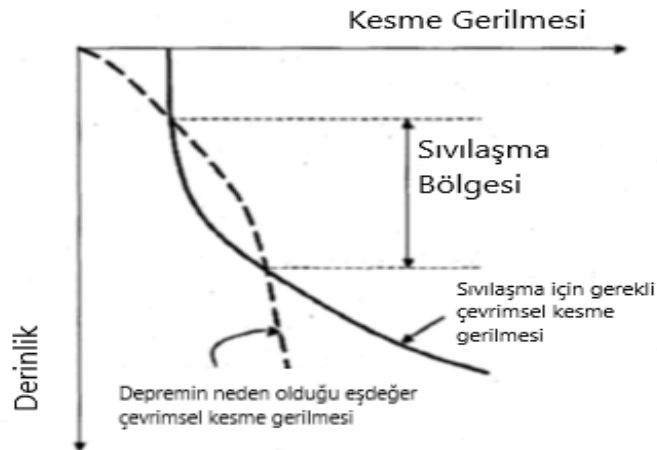
Kaynak: (Huang, 2008).

2.1.3 Sıvılaşmanın başlamasının değerlendirilmesi

Sıvılaşmanın başlama potansiyelini değerlendirmek için çağdaş mühendislik uygulamalarında çeşitli yöntemler kullanılmaktadır. Mevcut yöntemlerin çoğu iki

genel kategoriye ayrılabilir: Bunlar: Çevrimsel gerilme ve döngüsel gerilme yöntemleridir. Her kategoride, deprem yüklemesinin özellikleri ve zeminlerin mevcut sıvılaşma direnci, sıvılaşmanın başlamasını kontrol etmektedir (Huang, 2008).

Çevrimsel hareketliliğin hem gevşek hem de sıkı zeminlerde meydana gelebileceğini unutulmamalıdır. Çevrimsel hareketlilik oluşumu için üç başlangıç koşulu kombinasyonu ve çevrimsel yükleme oluşabilmesi için çevrimsel hareketlilik koşulu vardır. Bu kombinasyonların her biri, efektif gerilme durumlarındaki değişikliklerin farklı gereksinimlerini temsil eder ve bunlar (a) gerilmenin tersine çevrilmemesi ve sabit durum gücünün aşılmaması; (b) anlık kararlı durum dayanımı aşımı süresi ile gerilmenin tersine çevrilmemesi; ve (c) kararlı durum dayanımını aşmadan gerilmenin tersine çevrilmesi (Huang, 2008; Kramer, 1996). Çevrimsel kayma gerilmesinin ve sıvılaşma direncinin derinlikle nasıl değişebileceğini gösteren grafik, Şekil 2.10'da gösterilmektedir. Hesaplanan güvenlik faktörü 1.0'dan büyük olsa bile büyük seviyede aşırı boşluk suyu basıncının gelişebileceği gözden kaçırılmamalıdır (Huang, 2008; Kramer, 1996). Sıvılaşma potansiyelini temsil etmek için güvenlik faktörünün kullanılması uygun bir araçtır ve anlaşılması kolay bir ölçü sağlar. Yaygın olarak uygulanan SPT testlerine ve buna bağlı olarak büyük araştırmalara dayanarak, sıvılaşma potansiyelinin değerlendirilmesi için geçerli standartlar olarak kabul edilen iki ana değerlendirme prosedürü vardır (Çizelge 2.3, 2.4) (Huang, 2008).



Şekil 2.10: Potansiyel sıvılaşma bölgesi

Kaynak: (Kramer, 1996).

Çizelge 2.3: Sıvılaşmanın başlatılması için SPT tabanlı değerlendirme yöntemlerinin karşılaştırılması, bölüm I

NCEER(Youd et al.,2001)	Idriss and Boulanger(2006)
$CSR = 0.65 \left(\frac{a_{max}}{g}\right) \left(\frac{\sigma_{vo}}{\sigma'}\right) \left(\frac{r_d}{MSF}\right)$	$CRR = CRR_{\sigma=1} \text{ tsf } K_{\sigma}$
$N_{1,60} = C_N N_{60}^{ER}$	
Gerilme azaltma katsayısı, r_d	
r_d	$r_d = \exp(\alpha(z) + \beta(z)M_w) ;$ $\alpha(z) = -1.0212 - 1.126 \sin\left(\frac{z}{11.73} + 5.133\right)$ $\beta(z) = 0.106 + 0.118 \sin\left(\frac{z}{11.28} + 5.142\right)$
Deprem Büyüklüğü Derecelendirme Katsayısı	
$MSF = \frac{7.5}{M_w} 2.95 ; M_w \leq 7.5$ $MSF = \frac{7.5}{M_w} 2.56 ; M_w > 7.5$	$MSF = \min(6.9 \exp\left(\frac{-M_w}{4}\right) - 0.058), 1.8$
Efektif Gerilmeye Göre Düzeltme Faktörü	
$C_N = \min\left(\left(\frac{Pa}{\sigma_{vo}}\right)^{0.5}, 1.7\right)$	$C_N = \min\left(\left(\frac{Pa}{\sigma_{vo}}\right)^a, 1.7\right)$ $\alpha = 0.784 - 0.0768 \sqrt{N_{1.60}}$ $N_{1.60} \leq 46$

Kaynak: (Youd vd., 2001; Idriss and Boulanger, 2006)

Çizelge 2.4: Sıvılaşma başlatma için SPT tabanlı değerlendirme yöntemlerinin karşılaştırılması, bölüm II

NCEER (Youd et al., 2001)	Idriss&Boulanger(2006)
$N_{1,60cs}$ 'ın Hesabı	
$N_{1,60cs} = \alpha + \beta N_{1,60cs}$	$N_{1,60cs} = N_{1,60} + \Delta N_{1,60}$
$\alpha = \begin{cases} 0 \\ \exp\left(1.76 - \frac{190}{FC^2}\right) \\ 1.0 \end{cases}$	$\Delta N_{1,60} = \exp\left[1.63 + \frac{9.7}{FC+0.1} - \left(\frac{15.7}{FC+0.1}\right)^2\right]$
$\beta = \begin{cases} 0 \\ 0.99 + \frac{FC^{1.5}}{1000} \\ 1.2 \end{cases}$	
	$\begin{matrix} FC \leq 5\% \\ 5\% < FC < 35\% \\ FC \geq 35\% \end{matrix}$
	$\begin{matrix} FC \leq 5\% \\ 5\% < FC < 35\% \\ FC \geq 35\% \end{matrix}$

Çizelge 2.4: (Devamı) Sıvılaştırma başlatma için SPT tabanlı değerlendirme yöntemlerinin karşılaştırılması, bölüm II

NCEER (Youd et al., 2001)	Idriss&Boulanger(2006)
$N_{1,60cs}$ 'ın Hesabı	
Çevrimsel Kayma Mukavemeti Oranı, $CRR_{\sigma=1 tsf}$	
$CRR_{\sigma=1 tsf} = \frac{1}{34-N_{1,60cs}} + \frac{N_{1,60cs}}{135} + \frac{1}{(10N_{1,60cs}+45)^2} - \frac{1}{200}$	$CRR_{\sigma=1 tsf} = \exp(f(N_{1,60cs})) \frac{1}{34-N_{1,60cs}} + \frac{N_{1,60cs}}{135} +$ $f(N_{1,60cs}) = \left(\frac{N_{1,60cs}}{126}\right)^2 - \left(\frac{N_{1,60cs}}{23.6}\right)^3 + \left(\frac{N_{1,60cs}}{25.4}\right)^4 - 2.8$
Düzeltilme Faktörü, K_{σ}	
$K_{\sigma} = \min\left(\left(\frac{\sigma'_{vo}}{Pa}\right)^{f-1}, 1\right)$ $F = 0,7 \sim 0,8 ; D_r = 40\% \sim 60\%$ $F = 0,6 \sim 0,8 ; D_r = 60\% \sim 80\%$	$K_{\sigma} = \min\left(1 - C\alpha \ln\left(\frac{\sigma'_{vc}}{Pa}\right)^{f-1}, 1\right)$ $C\alpha = \frac{1}{18.9 - 2.55\sqrt{N_{1,60}}}$

Kaynak: (Youd vd., 2001; Idriss and Boulanger, 2006)

2.1.4 Sıvılaşma Türleri

Gevşek zeminlerde yumuşama ile aynı anda kayma dayanım kaybı ortaya çıkar ve bu nedenle büyük kayma şekil deformasyonları, ötesinde akma göçmesi ve akış sıvılaşması (flow liquefaction) oluşabilmektedir. Orta sıkılıkta olan zeminlerde ise sıvılaşma geçici olarak dayanım kaybına ve artan çevrimli kayma şekil değiştirmelerine yol açar ve bunla birlikte, zeminde genleşme eğilimi dayanım kaybını ve büyük şekil değiştirmeler meydana gelmesini sınırlar. Bu tarz zeminler için çevrimli hareketlilik (cyclic mobility) veya çevrimli sıvılaşma (cyclic liquefaction) meydana gelebilir.

Akış sıvılaşması (flow liquefaction) sıvılaşma meydana gelen zeminde kayma dayanımının zemin kütlesi için statik denge haline ait gerekli kayma dayanımından düşük olması durumunda gözlemlenmektedir. Böylece statik kayma gerilmeleri etkisi ile zeminde büyük şekil değiştirmeler görülür ve akma göçmesi ortaya çıkar. Akma sıvılaşması çok ani şekilde ortaya çıkar ve sıvılaştıran zeminde çok büyük yer değiştirmeler meydana gelir.

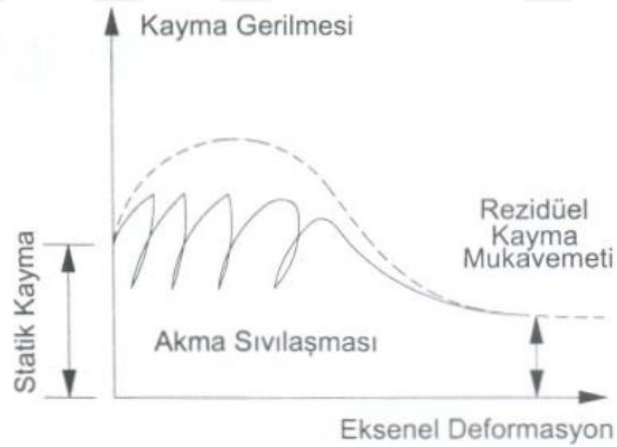
Çevrimsel sıvılaşma (cyclic liquefaction) statik kayma gerilmeleri sıvılaşmış zeminin kayma dayanımını geçmediği hallerde ortaya çıkar fakat izin verilen değerlerin üzerinde kalıcı deformasyonlara neden olmaktadır. Çevrimsel sıvılaşma

durumu, deprem sırasında deformasyonlar her çevrimde artarak kırılmalara neden olabilmektedir. Statik ve çevrimli kayma gerilmelerinden ortaya çıkan bu deforasyonlar eğimi az olan yerlerde bile yanal akma veya yayılmalara sebep olabilmektedir. Düz arazilerde ise çevrimsel sıvılaşma yanal akmalara yol açmasa bile deprem anında zemin salınımları olarak tanımlanan hareketlere neden olabilmektedir.

Bir arazide oluşabilecek akma sıvılaşması veya çevrimsel sıvılaşma hallerinin çeşitli göçme ve hasarlara neden olabildiği gözlemlenmiştir. Sıvılaşmanın muhtemel zararlı etkilerini minimize edebilmek için, sahadaki zeminlerin sıvılaşabilirliği, sıvılaşmanın tetiklenmesine neden olabilecek şartlar ve sıvılaşma meydana gelmesi durumunda oluşabilecek hasarların hassas şekilde incelenmesi gereklidir (Özaydın, 2007).

2.1.4.1 Akış sıvılaşması

Akma tipi sıvılaşma, aşırı deformasyonların ve hasarların gözlemlendiği akma kırılmalarını ortaya çıkarır. Zeminin statik dengesinin oluşumu için gereken kayma gerilmelerinin, sıvılaşmış zeminin mukavemetini (rezidüel mukavemet) aştığı durumlarda ortaya çıkar (Mollamahmutoğlu ve Babuççu, 2021)



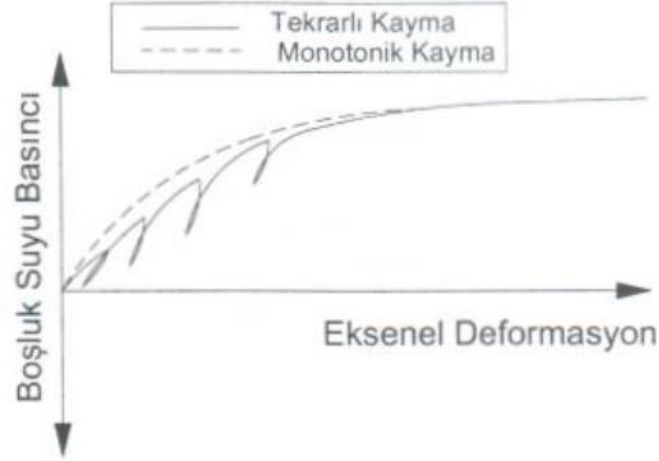
Şekil 2.11: Akış sıvılaşması

Kaynak: (Mollamahmutoğlu ve Babuççu, 2021).

2.1.4.2 Döngüsel sıvılaşma

Döngüsel sıvılaşma, sınır değerlerin ötesinde büyük, kalıcı şekil değiştirmeler üreten bir başka sıvılaşma türüdür. Zemindeki statik denge durumu için gereken kayma gerilmelerinin, sıvılaşmış zeminin mukavemetinden (rezidüel mukavemet) küçük olduğu hallerde ortaya çıkar. Döngüsel sıvılaşma kaynaklı oluşan şekil değiştirmeler,

deprem titreşimleri sırasında artarak devam eder. Yanal yayılma şeklinde tanımlanan bu tarzda formasyonlar, su kütlelerine yakın hafif eğimde veya yaklaşık düz yüzeyli zeminlerde gözlemlenir. Yapıların yoğun olduğu bölgelerde önemli yapısal hasarlara hatta çökmelere sebep olacaktır (Mollamahmutoğlu ve Babuççu, 2021).



Şekil 2.1 : Akış sınıvlaşması

Kaynak: (Mollamahmutoğlu ve Babuççu, 2021)

Döngüsel sınıvlaşmanın bir başka hali, düz yüzeyli zemin sınıvlaşmasıdır. Düz olan yüzeye sahip zeminlerde, yanal şekil değiştirmeleri engelleyecek statik kayma gerilmelerinin olmayışı, dinamik kuvvetlerin etkisinde kalan zeminlerine yer salınımı olarak tanımlanan büyük ancak düzenli olmayan hareketler ortaya çıkmasına sebep olur. Yer hareketi nedeni ile zeminde boşluk suyu basıncı çok büyük değerlere çıkar. Bu yer hareketi sonucu gerçekleşen büyük boşluk suyu basıncının sönmülme gereksinimi, zemindeki suyun yukarı doğrultuda hareketine sebep olur. Eğer zemindeki boşluk suyu yeteri kadar hızlı hareket ederse, zeminde mevcut çatlaklar içinden yüzeye kum taneleri götürebilir. Söz konusu kum taneleri, mini kum tepeleri yada kum kaynaması şeklinde oluşur. Hidrolik denge oluşması için gereken zamana dayalı olarak, şekil değiştirmeler deprem bittikten sonra da gözlemlenebilir. Büyük düşey oturmalar ve kum kaynaması oluşması, düz yüzeyli zemin sınıvlaşmasının en yaygın belirtileridir.

2.1.5 Sınıvlaşmanın Etkileri

Sınıvlaşma oluşumu ile yapılarda, köprüler, boru hatları ve diğer yapısal sistemlerde değişik hasarlar ortaya çıkabilir. Sınıvlaşma aynı zamanda zemin yüzeyindeki hareketinin meydana gelmesini de etkileyebilir. Akma türü sınıvlaşma neticesinde

akma göçmeleri oluşur. Ayrıca buna ek olarak ağırlığı fazla olan yapıların zemine batması veya devrilmesi, nispeten hafif olan zemine gömülü yapıların yüzmesi ve istinat yapılarının yıkılması da akma türü sıvılaşma olayı sonucu ortaya çıkabilecek hasarlar arasındadır.

Zeminde sıvılaşma oluşumu esnasında aşağıda verilen etkiler görülür (Url-2, 2021)

- Demiryolu ve karayollarında kayma, oturma
- Yer altı olan (boru hatları gibi) yapılarının yüzeye çıkışı
- Zeminde kayma, heyelan oluşumu, toprak kayması veya akması olaylarının görülmesi
- Temeli sığ olan yapılarda göçmesi veya büyük hasar
- Zemin büyük oturmalar gerçekleşebilir
- Kumda kaynama oluşumu
- Obruklar ortaya çıkması
- Lokal oturma

Döngüsel sıvılaşma neticesinde ise şev kırılması, yapılarda kısmi veya tam oturmalar, yanal yayılmalar ve istinat yapılarında yanal ve düşey yer değiştirmeler gibi hasarlar gözlenebilir. Sıvılaşmadan kaynaklanan hasar, iyi kaydedilmiş bir sıvılaşma geçmişi ile daha gerçekçi şekilde tespit edilebilir (Mollamahmutoğlu ve Babuççu, 2021).

2.1.5.1 Oturma problemi

Deprem esnasında meydana gelen sıvılaşma ile derin çatlaklar, aşırı oturmalar, yanal yayılmalar ve taşıma gücünde kayıplar bir çok kez gözlenmiştir. Depreme maruz kalan yapıların bazıları tamamen yıkılırken bazıları ise sıvılaşmadan nedeniyle oturma yapmış, belli seviyede dönmüş yada zemine batmıştır.

Tamamen doymuş kumlu, az plastisiteli ve plastik olmayan siltli zeminlerde deprem etkileri altında boşluk suyu basınçlarının yükselmesiyle efektif basınç değerleri azalır ve sıfır veya sıfıra oldukça yakın seviyelere düşer. Efektif gerilmenin sıfıra yakın değere gitmesi ile zeminin taşıma kapasitesi yok olur. Sıvılaşma oluşan zeminde drenaj koşulları, zeminin geçirgenliğine dayalı olarak kum zemin içindeki su kısa zamanda zeminden çıkar, düşük plastisiteli siltte ise daha yavaş şekilde terk eder. Hem kumlu hem de düşük plastisiteli siltlerde sıvılaşma sonucu zemin yüzeyinde her noktada farklı oturmalar gerçekleşir. Bundan dolayı, yapının temel sistemi yetersiz

ise zemindeki düzensiz oturmalar nedeni ile ilkin temel sistemi ve daha sonra üst yapıyı sıvılaşma etkisinde kalır. Bu yüzden zeminlerin sıvılaşması potansiyeli, yapının tasarımı sırasında bilinmeli ve gerekli tedbirlerin alınması gerekecektir (Erken vd., 2001).



Şekil 2.12: Sıvılaşma kaynaklı oturma hasarı

Kaynak: (Url-3, 2021)

2.1.5.2 Yanal zemin yayılması ve akış kayması

Mühendislik hizmeti alan yapılar için en önemli negatif etkilerin, zeminde dayanım ve rijitlik kaybedilmesi ile büyük deformasyonlar ve yer değiştirmeler neticesinde oluşan, temellerin dayanım gücü kaybı, çok büyük toplam ve farklı oturma, yanal akmalara ve şev kırılmaları, temellerde ve istinat yapılarında hasarlar, kazıklar üzerinde ilave yükler ve yanal destekte azalmalar, zemine gömülmüş yapılarda büyük basınç artı kaldırma etkisi olduğu söylenebilir. Ayrıca bu etkilerin çoğu, bu aşamada tasarım için gereken kesinlik ve güvenilirlikte tespit edilmemiştir. Statik ve çevrimli kayma gerilmeleri yüzünden oluşan şekil değiştirmeler nispeten az eğimli arazilerde bile yanal akma veya yayılmalara sebep olmaktadır. Düz arazilerdeyse çevrimsel sıvılaşma yanal akmalara neden olmasa da deprem esnasında zemin salınımları olarak tanımlanan hareketlere yol açmaktadır. Bir arazide meydana gelecek akma sıvılaşması veya çevrimsel sıvılaşma durumlarında çeşitli zarar ve hasara sebep olabilmektedir. Sıvılaşmanın muhtemel zararlı etkilerinin minimize edilmesi, sahadaki zeminlerin sıvılaşma potansiyeli, sıvılaşmanın tetiklenmesine yol açacak etkenler ve sıvılaşma meydana gelmesi durumunda oluşabilecek hasarların analiz edilmesi gerekecektir (Özaydın, 2007).

2.1.5.3 Kum kaynaması

Sıvılaşma olduğunda genelde kum kaynaması birlikte ortaya çıkar. Sıvılaşmanın derinlerde oluşması ve zemin yüzeyinin yanal yer değiştirmeye müsaade etmeyecek kadar düşük bir eğime sahip olduğunda, sıvılaşma alanı üzerindeki zemin (sıvılaşmayan zeminde) bloklar birbirinden ayrılır ve sıvılaşan zemin üzerinde salınır. Etkilenen zemin salınımı ile, açılan ve kapanan çatlaklar ortaya çıkabilir. Deprem esnasında meydana gelen boşluk suyu basıncındaki sönümlenme gereksinimi, boşluk suyunda yukarı yönde hareket oluşumuna neden olur. Oluşan hareket, zemin tanelerine yukarı doğrultuda etki eden kuvvetler meydana getirir. Oluşan kuvvetler, bazı taneciklerin su ile birlikte yüzeye kadar çıkmasına ve zemin yüzeyinde kum konileri oluşumuna neden olur (Mollamahmutoglu ve Babuççu, 2021).



Tottori depremi 2000



Chi Chi Depremi 1999

Şekil 2.13: Sıvılaşma kaynaklı kum kaynamaları

Kaynak: (Özaydın, 2007).

2.1.6 Deprem tarafından zemin sıvılaşmanın tetiklenmesi

Sıvılaşma, suya doygun zeminlerde, zemin taneleri arasındaki boşluğun tamamen suyla dolu olduğu zeminlerde oluşur. Bu boşluk suyu basıncı, zemin taneleri üzerinde, parçacıkların birbirine uyguladığı kadar bir basınç uygular. Bir depremden önce, boşluk suyu basıncı görece daha azdır. Bununla birlikte, deprem titreşimleri, su basıncının, zemin tanelerinin birbirine göre kolayca hareket edebileceği seviyeye kadar artmasına sebep olabilir. Deprem titreşimi genelde boşluk suyu basıncındaki bu artışı tetikler, ancak patlatma gibi inşaatla ilgili faaliyetler de boşluk suyu basıncı değerinde yükselişe sebep olabilir. Sıvılaşma yalnızca suya doygun zeminde meydana geldiğinden, etkileri en yaygın olarak nehirler, göller, koylar ve okyanuslar

gibi su kütlelerinin yakınındaki su seviyesinin altında kalan alanlarda gözlenir. Sıvılaşmanın sonucunda zeminde büyük kaymalar oluşabilir (Raghudeep, 2008).

Sıvılaşma tetiklenmesi analizi metodları olarak arazi deney sonuçları ve önceki dönemlerde olay örneklerine dayalı şekilde geliştirilmiş metotlar sıklıkla kullanılmıştır (Mollamahmutoğlu ve Babuççu, 2021).

- SPT (Spandart Penetrasyon Testi)
- CPT (Koni Penetrasyon Testi)
- VST (Kayma Dalgası Hızı)

Bu tarz yöntemler, deprem nedeniyle oluşacak gerilme ve zemin dayanımının belirlenerek karşılaştırılmasına dayanmaktadır. CSR: Tekrar eden gerilim oranı – Deprem dalgalarının yayılımı esnasında ortaya çıkan etkinin belirlenmesi için Basitleştirilmiş yöntem şeklinde kullanılmaktadır (Seed and Idriss, 1971).

2.1.6.1 Çevrimsel gerilim oranı (CSR)

Sıvılaşmanın meydana gelme potansiyelinin değerlendirilmesi, eşdeğer deprem yükü ve sıvılaşma direnci ölçümlerinin karşılaştırılmasıyla gerçekleştirilir. Deprem yüklemesinin karakterinin belirlenmesine yönelik en yaygın yaklaşım, çevrimsel kayma gerilmelerinin kullanılmasıdır. Çevrimsel kayma gerilmenin genliğini, başlangıçtaki efektif düşey gerilme ile normalleştirerek, bir çevrimsel gerilim oranı (CSR) elde edilir. CSR, bir deprem tarafından bir zemin profilinde farklı derinliklerde etkilenen yükleme seviyesini temsil edebilir. Döngüsel kayma gerilmelerini değerlendirmek için farklı yaklaşımlar vardır: Bunun için saha tepki analizleri gerçekleştirilebilir veya CSR'yi tepe zemin yüzeyi ivme genliğinin bir fonksiyonu olarak belirlemek için “basitleştirilmiş” bir yaklaşım kullanılabilir (Kramer and Seed, 1988; Kramer, 1996).

Sıvılaşma direnci sahada elde edilen performansa dayalı olarak karakterize edilir. Gerçek deprem geçmişlerinin detaylı araştırılması, her vaka (deprem) geçmişi için yerinde özelliklerin (genellikle SPT veya CPT direnci) ve CSR kombinasyonlarının belirlenmesine olanak sağlamıştır.

Sıvılaşmanın gözlemlendiği ve gözlemlenmediği durumlar için CSR'yi SPT'nin düzeltilmiş değerleri ($CSR-(N1)_{60}$) veya CPT değerleriyle ($CSR-q_c$) çizerek,

sıvılaşmanın tarihsel olarak gözlemlendiği koşulları sınırlayan bir eğri elde edilebilir (Kramer and Seed, 1988; Kramer, 1996).

$$CSR = 0.65 \left(\frac{a_{max}}{g} \right) \left(\frac{\sigma_v}{\sigma'_v} \right) r_d \quad (2.4)$$

a_{maks} = yüzeyde oluşan maksimum yatay ivme

σ_v = toplam düşey gerilme

σ'_v = efektif düşey gerilme

r_d = gerilme azaltım katsayısı

$$r_d = 1 - 0.00765z \quad (z \leq 9.15m \text{ için}) \quad (2.5)$$

$$r_d = 1.174 - 0.0267z \quad (9.15m \leq z \leq 23m \text{ için}) \quad (2.6)$$

z = yüzeye olan derinlik (metre biriminde) şeklinde belirtilmiştir.

İzleyen yıllarda yapılmış olan çoğu araştırmada sıvılaşma tetiklenme potansiyelinin tespitinde kriter olarak alınan CSR oranı yöntemi, düz serbest arazi koşulları ve sığ çökelti için güvenilir olur. Eğimli arazilerde veya ağırlığı çok fazla olan yapılar altında bulunan tabakalarda başlangıç (statik) kayma gerilmeleri var olması sıvılaşma potansiyelini etkiler. Seed tarafından, 1983'de yapılan çalışmada, başlangıçtaki kayma gerilmelerinin ve büyük çevre basınçları etkisinin dikkate alınması için CSR oranı üzerinde aşağıdaki verilen düzeltme yapılmasını önerilmiştir (Seed vd., 1983).

2.1.6.2 Döngüsel direnç oranı (CRR)

Depremi neden olduğu yer hareketi etkisinin bir çevrimli kayma gerilmesi oranı (CSR) kullanılması göz önüne alındığı bu metotta değerlerin sıvılaşma dayanımını tanımlama amacıyla kullanılan çevrimli kayma dayanımı oranı (CRR) ile mukayese edilmesi sonucunda sıvılaşma etkisine karşı güvenlik katsayısı belirlenebilir (Seed and Idriss, 1971; Youd ve ark., 2001).

Çevrimli kayma dayanımı oranı (CRR) ise deprem titreşimi ile zemin üzerindeki oluşan sıvılaşma riskine karşı zeminin yeterliliğinin bir göstergesidir ve zemin nisbi yoğunluğu ve ince tane muhtevasına bağlıdır. Zemin dayanımı deprem talebinin altında ise sıvılaşma tetiklenmesi ortaya çıkar ($CRR < CSR$).

- Çevrimli kayma dayanımı oranı (CRR) : Kritik olan zemin tabakası için CSR hesaplanır. CSR, yer titreşimi seviyelerine bağlı bir fonksiyondur (Maksimum

Yer İvmesi (PGA), Moment Büyüklüğü (Mw), ve yer altı su seviyesi mesafesi).

- Temiz Kum Eşdeğeri Düzeltimi: (FC) zemin içindeki kil-silt yüzdesini ortaya koyan bir orandır. Daha yüksek FC'ye değeri olan zeminler, genelde daha siltli olup, sıvılaşmaya karşı daha az FC'ye ve eşdeğer uç dayanımına sahip olan zeminlere göre büyük yüksek bir dayanıma sahiptirler.
- Çevrimli Kayma Dayanımı Oranı (CRR): CRR, deprem zemin tepkisine karşı zemin direncinin bir göstergesidir. Daha büyük CRR'si olan zeminler, sıvılaşmaya karşı daha çok dayanım gösterebildiğinden, bu tür zeminlerde sıvılaşma görülmesi için daha büyük seviyelerde titreşim meydana gelmesi gerekmektedir (Manav, 2019).

2.1.6.3 Gerilim azaltma faktörü (r_d)

Derinliğe bağlı azalma faktörünü (gerilme azaltma katsayısı) r_d ile gösterilmektedir.

ise Gerilme azaltma katsayısı için şu ifade önerilmiştir (Liao and Whitman, 1986),

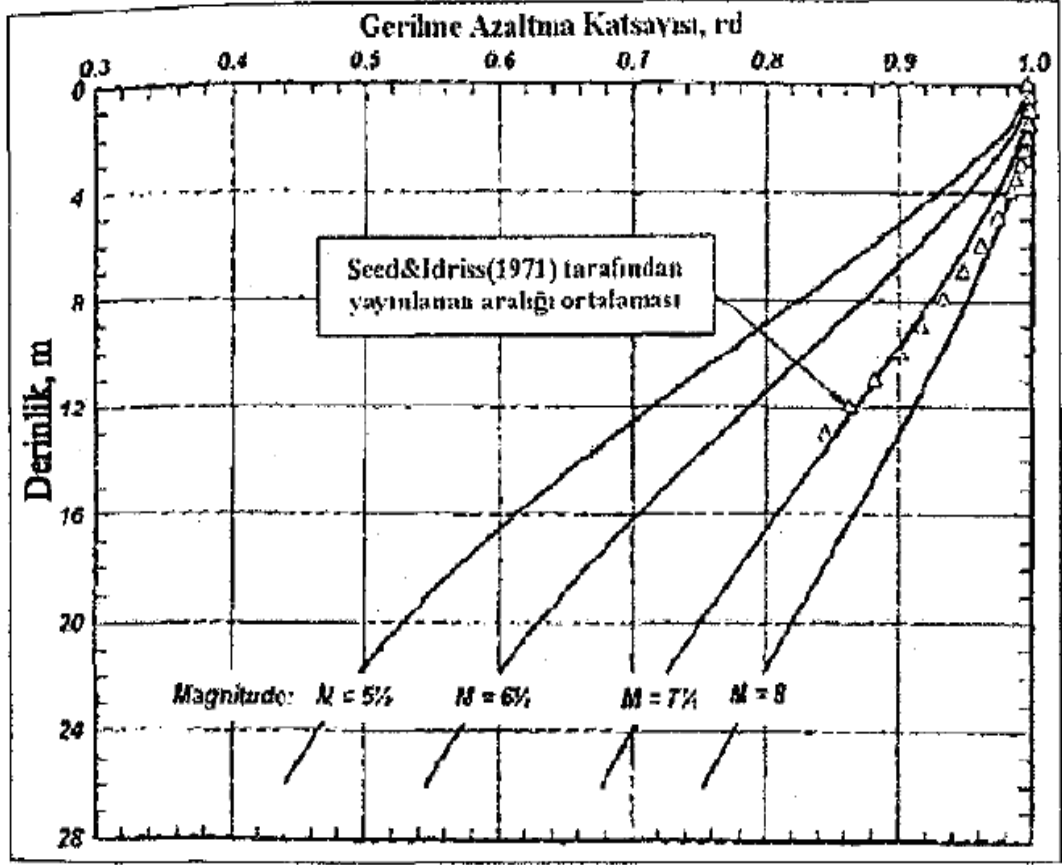
r_d = gerilme azaltım katsayısı

$$r_d = 1 - 0.00765z \quad (z \leq 9.15m \text{ durumunda}) \quad (2.7)$$

$$r_d = 1.174 - 0.0267z \quad (9.15m \leq z \leq 23m \text{ durumunda}) \quad (2.8)$$

z = yüzeyden ölçülen derinlik (metre) olarak gösterilmektedir.

Buradaki, r_d değeri aynı zamanda depremin büyüklüğüne de bağlı olduğunu belirtilmiş ve Şekil 2.15'de gösterilen $r_d(z, M)$ bağıntısı verilmiştir (Seed and Idriss, 1971).



Şekil 2.14: Gerilme azaltım katsayısı (rd) derinlik ve deprem ile değişimi

Kaynak: (Seed and Idriss, 1971).

2.1.7 Sıvılaşma güvenlik göstergeleri

Zeminin sıvılaşma direnci için sıvılaşma potansiyelinin değerlendirilmesi, ilgili zemin alanı boyunca yükleme ve direnç özellikleri basitçe karşılaştırılarak gerçekleştirilebilir. Yüklemin direnci aştığı derinliklerde, aşağıda belirtildiği gibi sıvılaşmaya karşı güvenlik katsayısının 1'den (2.9) az olduğu durumlarda sıvılaşma beklenebilir (Huang, 2008).

$FS_L = (\text{sıvılaşmaya için gerekli çevrimsel kesme gerilmesi}) / (\text{depremden kaynaklanan eşdeğer çevrimsel kesme gerilmesi})$

$$FS_L = \tau_{cyc} / \tau_{cyc} = CRR / CSR \quad (2.9)$$

Denklemden, sıvılaşmaya neden olacak minimum döngüsel kayma gerilmesi anlamına gelen kısım, yani döngüsel direnç oranı (CRR), aslında zeminin sıvılaşmanın oluşmasını önlemek için sahip olduğu dirençtir. Döngüsel kayma gerilmesinin ve sıvılaşma direncinin derinlikle nasıl değişebileceğini gösteren değerlendirmenin grafik bir örneği Şekil 2.10'da gösterilmektedir. Hesaplanan güvenlik faktörü 1.0'dan

büyük olsa bile önemli aşırı boşluk basıncının gelişebileceği belirtilmelidir (Kramer, 1996; Huang, 2008).

Çevrimsel kayma gerilmesinin ve sıvılaşma direncinin derinlikle nasıl değişebileceğini gösteren grafik, Şekil 2.10'da gösterilmektedir. Hesaplanan güvenlik faktörü 1.0'dan büyük olsa bile büyük seviyede aşırı boşluk suyu basıncının gelişebileceği gözden kaçırılmamalıdır (Kramer, 1996; Huang, 2008). Sıvılaşma potansiyelini temsil etmek için güvenlik faktörünün kullanılması uygun bir araçtır ve anlaşılması kolay bir ölçü sağlar (Huang, 2008).

2.1.8 Sıvılaşma tahmini için mevcut yöntemler

Bu yöntem türleri, yerinde testler yapılması, çok sayıda vaka geçmişi incelenerek elde edilen veri setleri aracılığıyla analizler yapılması, yerinde test verileri ile “sıvılaşma” veya “sıvılaşma olmaması” durumu için saha davranışı arasındaki ilişkiyi geliştirmeye çalışır. Bu yöntemlerden elde edilen sonuçlar, geleneksel yöntemlere göre bir daha iyi sonuçlar vermektedir. Araştırmacılar sıvılaşmaya neden olan faktörler ve sıvılaşma tahmin yöntemleri üzerine birçok çalışma yapmıştır. Sıvılaşma sonucu zemin çökmesi, zemin taşıma gücü yetersizliği ve yanal hareket hasarları oluşabilir. Tüm dünyada sıvılaşmanın farkına varılmasını sağlayan 1964 Niigata depremi sonrası sıvılaşma nedeniyle ağır hasar gören çok sayıda yapıya ait fotoğraf Şekil 2.16'da gösterilmiştir (Japan National Committee on Earthquake Engineering, 1965).



Şekil 2.15: 1964 Niigata depremi sonrası sıvılaşma kaynaklı hasara uğrayan yapılar

Kaynak: (Japan National Committee on Earthquake Engineering, 1965).

Sıvılaşma potansiyelinin tespit edilmesini amaçlayan farklı birçok araştırma bulunmaktadır. Kullanılan yöntemler için çeşitli sınıflandırmalar yapılmıştır. Belli başlı sınıflandırma olarak; deterministik, olasılık yöntemler ve sıvılaşma şiddeti parametrelerinin kullanıldığı yöntemler sayılabilir (Manav, 2019).

2.1.8.1 Sonlu elemanlar teknikleri

Sıvılaşmanın tahmini için kullanılan sonlu elemanlar yönteminde (FEM), bir problemin çözüm alanı, sonlu elemanlar adı verilen sonlu sayıda daha küçük alanlarla ifade edilir. Her sonlu eleman parçası için, yönetici diferansiyel denklem, yaklaşık fonksiyonlar kullanılarak eleman içinde yakınsanır. Problemin genel çözümü, sınır koşullarının belirlenmesi ile birlikte global bir matrisin çözülmesinden bulunabilir (Amit, 2002).

Son yıllarda bilgisayar teknolojisindeki hızlı gelişmeler nedeniyle yöntem çok hızlı bir şekilde geliştirilmiş ve sıvılaşma olasılığı değerlendirmesinde analiz için güçlü bir araç olarak yerini almıştır. Diğer sayısal yöntemler gibi FEM de diferansiyel denklemler için yaklaşık çözümler sağlayan sayısal bir yaklaşımdır. Ancak problem karmaşıklığı, uzun hesaplamalar ve sınır koşullarının zor olması nedeniyle geçmişte bu kadar popüler olmamıştır. Ancak günümüzde bilgisayar teknolojisinin gelişmesiyle sıvılaşma olasılığı değerlendirme problemleri bu yöntem kullanılarak çözülebilmektedir.

Zeminlerde sıvılaşma davranışının analizi için geliştirilen ve sonlu elemanlar ve sonlu farklar tekniklerinin kullanıldığı nümerik gerilme-şekil değiştirme analizi yöntemlerinde boşluk suyu basıncı değişimlerinin de modele dahil edilmesi gerekmektedir. Bu amaçla geliştirilmiş analiz yöntemlerinde kullanılan bünye modellerinde, çevrimli kayma gerilmeleri altında oluşan hacim değişimleri ve artık boşluk suyu basıncı ile yükleme çevrim sayısı arasındaki ilişki yanında, deneysel gözlemler ışığında artık boşluk suyu basıncı-efektif gerilme izi-akma (göçme) yüzeyi arasındaki ilişkinin modellenmesi mümkündür (Özaydın, 2007).

Seed vd., (1975) artan boşluk suyu basıncı- yükleme çevrim sayısı arasındaki ilişkiyi kullanarak sıvılaşma davranışını açıklamaya yönelik bir yöntem geliştirmiştir. Ishiara vd. (1976) laboratuvar deneyleri gözlemleri ışığında artık boşluk suyu basıncı ve efektif gerilme izi arasında ilişkiyi modellemeye çalışırken, Yoshimi ve Tokimatsu (1978) çevrimli kayma gerilmeleri etkisinde oluşan hacim değişimleri ile yükleme

çevrim sayısı arasındaki ilişkiyi modelleyen öncü çalışmalardan birini yapmışlardır. Nishi vd. (1986), Nishi ve Kanatani (1986) tarafından da benzer bir yaklaşım kullanılarak, çok boyutlu zemin ortamlarında yüksek serbestlik dereceli sistemlerin dinamik davranışının analizi ve kum zeminlerde depremler sırasında oluşan oturumların tahminine yönelik çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmalar, doğrusal olmayan (nonlinear) deformasyon davranışı tam olarak modellenememekle birlikte, basit ve pratik olması açısından oldukça yararlı yöntemler olarak literatürde yer almaktadırlar.

2.1.8.2 Sonlu fark teknikleri

Sonlu farklar yaklaşımı da sınıflama analizinde kullanılan yöntemlerden birisidir. Buna göre:

1. Bir değişkenin birinci mertebeden uzay ve zaman türevleri, sırasıyla değişkenin sonlu uzay ve zaman aralıklarında lineer varyasyonları olduğu varsayılarak, sonlu farklar ile yaklaşıklaştırılır.
2. Ayrık model yaklaşımı: Sürekli ortamın yerini, ilgili tüm kuvvetlerin (uygulanan ve etkileşimli) ortam temsilinde kullanılan üç boyutlu bir ağ düğümlerinde yoğunlaştığı ayrı bir eşdeğer ile değiştirilir.
3. Dinamik çözüm yaklaşımı: Hareket denklemlerindeki atalet terimleri, söz konusu sistemin denge durumuna ulaşmak için sayısal araçlar olarak kullanılır. Süreklilik için hareket yasaları, bu yaklaşımlar aracılığıyla, düğümlerde Newton yasasının ayrık biçimlerine dönüştürülür. Ortaya çıkan adi diferansiyel denklemler sistemi daha sonra zaman içinde açık bir sonlu fark yaklaşımı kullanılarak sayısal olarak çözülür (Tolon, 2013).

2.1.8.3 Esnek hesaplama teknikleri

Esnek hesaplama, en iyileme teknikleri ile sezgisel algoritmaların bütünleşik olarak ele alındığı hesaplamalı zekadır. Yapay zeka geleneksel hesaplama teknikleri ile ilgilenmektedir. Farklı olarak, esnek hesaplama karmaşık yapıda, belirsizlik içeren gerçek yaşam problemlerinin çözümlenmesi için hesaplamalı zeki yöntemlerin kombinasyonunu sunmaktadır. Zadeh (1994) esnek hesaplamayı şu şekilde ifade etmiştir (Zadeh, 1994):

Yapay sinir ağı, insan beynininkine benzeyen bazı organizasyonel ilkelerden yararlanmak için oluşturulmuş sistemler ve hesaplama cihazlarıdır. Normalde paralel düzenli mimarilerde çalıştırılan ve yapılandırılan çok sayıda yüksek düzeyde bağlantılı hesaplama düğümü (nöron) vardır. İnsan beyni gibi bir yapay sinir ağı da öğrenme yeteneğine sahiptir; Sistemi eğitmek için kullanılan verileri hatırlar ve genelleştirir.

Giriş birimlerindeki etkinleştirme modeli, ağa sunulan sorunu temsil eder; ve çıktı işleme birimlerindeki aktivasyon modeli, sinir ağı tarafından elde edilen hesaplama sonuçlarını temsil eder. Sinir ağı, gerçek çıktı ve hedef çıktı arasındaki farkı en aza indirerek her bağlantılı nöron arasındaki bağlantının ağırlıklarındaki değişiklikleri yayar. Sinir ağı tarafından gerçekleştirilen hesaplamanın bağlantı ağırlığındaki değişikliklerin yayılması, nöronlar arasındaki bağlantıların topolojisinden ve kuvvetlerinden güçlü bir şekilde etkilenir.

Sinir ağı programlanmamıştır; örnek alarak öğrenirler. Tipik olarak, bir sinir ağı, ağın öğrenebileceği bir grup örnekten oluşan bir eğitim seti ile sunulur. En yaygın eğitim senaryoları, ağın bu model için hedef çıktıyla birlikte bir girdi modeliyle sunulduğu denetimli öğrenmeyi kullanır. Hedef çıktı genellikle girdi modeli için doğru yanıtı veya doğru sınıflandırmayı oluşturur. Bu eşleştirilmiş örneklere yanıt olarak, sinir ağı kendi iç ağırlıklarının değerlerini ayarlar. Eğitim başarılı olursa, dahili parametreler daha sonra ağın her giriş modeline yanıt olarak doğru yanıtları üretebileceği noktaya ayarlanır. Genellikle eğitim örnekleri seti, ağın dahili parametrelerini kademeli olarak ayarlamasına izin vermek için eğitim sırasında birçok kez sunulur.

Özet olarak, bir yapay sinir ağı, aşağıdaki özelliklere sahip paralel bir hesaplama sistemidir, doğal olarak esinlenilmiş bir matematiksel modeldir, çok sayıda birbirine bağlı işlem biriminden oluşur, bağlantıları (ağırlıkları) arasındaki ilişki hakkında bilgi içerir. girdiler ve çıktılar, her nöron girdi uyarana dinamik olarak yanıt verebilir ve yanıt tamamen yerel bilgisine bağlıdır, yani giriş sinyalleri bağlantılar ve bağlantı ağırlıkları aracılığıyla işlem elemanına ulaşır, eğitimden hatırlama ve genelleme öğrenme yeteneğine sahiptir. Bağlantı ağırlıklarını ayarlayarak veriler ve ayrıca toplu davranışı hesaplama gücünü gösterirken, tek bir nöron belirli bilgileri taşımaz, bilgi büyük bir hesaplama gücüne sahip nöronlar arasında dağıtılır (Lin and Lee, 1996).

2.1.8.4 Basitleştirilmiş analitik teknikler

Basitleştirilmiş yöntem ile yapılan analize göre zemin profilinde sıvılaşma potansiyeli taşıyan tabakalar mevcuttur. Bu sebeple zaman tanım alanında yapılan doğrusal olmayan dinamik analizde artık boşluk suyu basıncı oluşumunu dikkate alabilen bir model kullanılmalıdır. Bu amaçla Deepsoil (Hashash vd., 2017) programında bulunan Dobry-Matasovic modeli kullanılmıştır. Ancak sahadaki zeminin sıvılaşma davranışı laboratuvar deneyleri ile belirlenmediği için boşluk suyu basıncı modelinde programın belirli bir saha için önerdiği parametreler ile analizler gerçekleştirilmiştir. Boşluk suyu basıncı parametrelerinin serbest saha analizi sonuçlarına etkisi, hassasiyet analizine benzer bir yöntemle farklı parametreler denenerek incelenmiştir. Özellikle daha sonra etkileşim analizlerinde kullanılacak olan serbest saha yerdeğiştirmeleri açısından, programın önerdiği parametrelerin kullanımının kayda değer bir fark yaratmadığı gözlemlenmiştir.

Yönetmelikte sıvılaşma analizinin SPT deneylerinin sonuçlarına dayalı olarak gerçekleştirilmesi için verilen yaklaşım basitleştirilmiş yöntemle dayalı olarak Youd vd. tarafından önerilen revizyonların ve ince dane oranı etkisi ile çevrimsel dayanım oranının formüle edilmiş ifadelerinin göz önüne alındığı yöntemdir (Youd vd., 2001). Yönetmelikte sıvılaşma analizi için Koni Penetrasyon Deneyi (CPT) sonuçlarının veya kayma dalgası hızı değerlerinin kullanıldığı ve uygulamada genel kabul gören yöntemlerin de kullanılabileceği belirtilmiştir.

2.1.8.5 Ampirik modeller

Sıvılaşmanın neden olduğu yanal yayılmanın değerlendirilmesi için ampirik temelli modeller ortaya koymuştur. (Hamada vd., 1986; Youd ve Perkins, 1987; Rauch, 1997; Shamoto vd., 1998; Bardet vd., 1999; Youd vd., 2002; Kanibir, 2003; Faris vd., 2006). Laboratuvar değerlerini gözlemlenen alan davranışıyla ilişkilendirmek için deneysel bir ayarlama faktörü ile birleştirilmiş sıvılaşma kaynaklı sınırlayıcı kesme şekil değiştirmelerinin laboratuvar temelli tahminlerini kullanmaktadır (Shamoto vd.,1998; Faris vd., 2006). Tüm bu modeller arasında Hamada ve ark. (1986) yaygın olarak kabul edilmiştir. Yine yaygın olarak kullanılan Youd ve ark. (2002) ve Faris ve ark. (2006) laboratuvar tabanlı ve sahada kalibre edilmiş modeli de yaygın olarak kullanılmaktadır.

1986 yılında Hamada ve ark. sadece zemin eğimi ve sıvılaşmış zemin tabakasının kalınlığı açısından sıvılaşmaya bağlı yanal zemin deformasyonlarını tahmin etmek için basit bir ampirik denklem ortaya koymuştur. Bu denklem, çoğunlukla Noshiro-Japonya'dan gelen 60 deprem vaka geçmişinin regresyon analizine dayanıyordu ve şu şekilde (2.10) ifade edilmiştir:

$$D_h = 0.75 * H^{1/2} O^{1/3} \quad (2.10)$$

burada:

D_h , öngörülen yatay yer yer değiştirmesidir (m),

H, sıvılaştırılmış bölgenin kalınlığıdır (m),

(birden fazla alt tabaka sıvılaştığında) tüm ara alt katmanlar dahil olmak üzere en üstteki ile en alttaki sıvılaştırılmış alt katmanlara olan mesafe olarak ölçülür ve θ , zemin yüzeyinin veya sıvılaştırılmış bölgenin alt sınırından daha büyük olan eğimidir. Basitliğine ve kullanım kolaylığına rağmen, ilişkinin temelini oluşturan sınırlı sayıda vaka geçmişi nedeniyle, kullanımı yalnızca benzer koşullara sahip vakalarla sınırlandırılmalıdır.

1990'ların başlarından başlayarak, Bartlett ve Youd (1992, 1995), sıvılaşabilir bölgelerde yanal yayılma yer değiştirmelerini tahmin etmek için ampirik yöntemler tanıttı. Bu erken çabaların bir iyileştirmesidir ve (i) eğimli zemin koşulları veya (ii) yanal yer değiştirmelerin meydana gelebileceği “serbest yüz” ile nispeten düz zemin koşulları için yeni ve geliştirilmiş tahmin modelleri şu şekilde geliştirilmiştir: vaka geçmişi veritabanının çok doğrusal regresyonu. Eğimli zemin ve “serbest yüz” koşulları için önerilen tahmin modelleri, aşağıdaki denklemlerde verilmiştir (Youd vd., 2002).

$$\log D_h = -16.213 + 1.532 M_w - 1.406 \log R^* - 0.012 R + 0.338 \log S + 0.54 \log T_{15} + 3.413 \log(100 - F_{15}) - 0.795 \log(D_{50}_{15} + 0.1 \text{mm}) \quad (2.11)$$

$$\log D_h = -16.713 + 1.532 M_w - 1.406 \log R^* - 0.012 R + 0.592 \log W + 0.54 \log T_{15} + 3.413 \log(100 - F_{15}) - 0.795 \log(D_{50}_{15} + 0.1 \text{mm}) \quad (2.12)$$

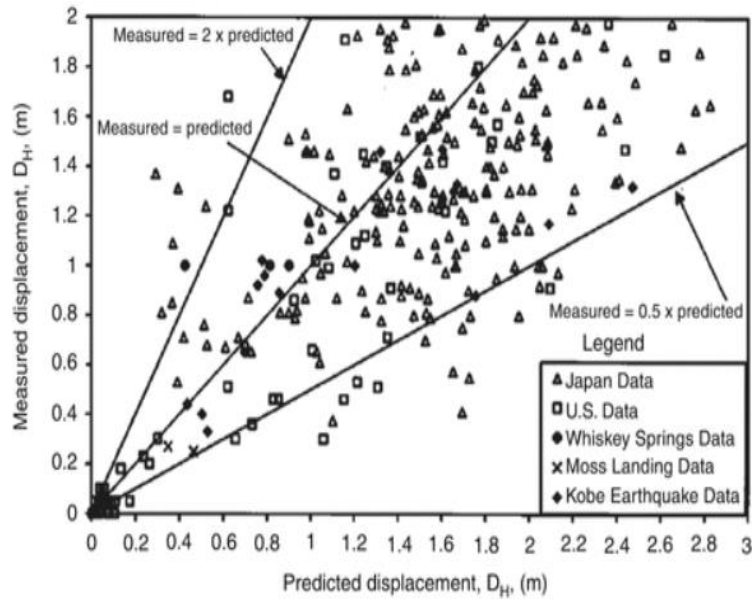
D_h , çoklu doğrusal regresyon modeli tarafından tahmin edilen metre cinsinden yatay yer değiştirmedir, M_w deprem büyüklüğüdür, S, yüzey topografyasının gradyanı veya zemin eğimidir (%), W, serbest yüzün yüksekliği olarak tanımlanan serbest

yüzey oranıdır hesaplama noktasına olan mesafesine bölünmesi ile elde edilir, T 15, SPT-N $1,60 \leq 15$ ile doymuş tabakaların kalınlığıdır, F 15, T 15 (%) cinsinden ortalama ince madde içeriğidir (partikül $< 0,075$ mm), D5015 ortalamadır T 15'te D 50. R, en yakın sismik kaynağa veya en yakın fay kırılmasına (km) olan yatay mesafedir ve R^* aşağıdaki denkleme göre hesaplanır.

$$R^* = R + R_0 \text{ ve } R_0 = 10^{0.89M_w - 5.64} \quad (2.13)$$

Youd ve arkadaşlarının ampirik modeli (2002) mühendislik alanında yaygın olarak kullanılmaktadır. Modelin performansı, Şekil 2.17'de gösterildiği gibi Youd ve diğerleri tarafından incelenmiş ve R2 değerinin yeterince yüksek olduğu sonucuna varılmıştır. Bununla birlikte,

- (i) Bağımsız bir tepede zemin ivme teriminin aksine büyüklük ve mesafe açısından zayıflama benzeri bir yoğunluk ölçüsünün benimsendiği ve bu zayıflama benzeri formülasyonların yanal yayılma tahminlerine göre belirsizlikleri daha da beraberinde getirdiği belirtilmelidir.,
- (ii) $(N_1)_{60}$ ile 15 darbe/30 cm'den büyük olan alt tabakalardan oluşan zemin sahaları için sıfır yanal yer değiştirme üretilmiştir. Ayrıca performans açısından geniş yer değiştirme aralığına göre daha kritik olduğu düşünülen 0-3 m yer değiştirme aralığındaki başarı oranı da tatmin edici düzeyde yüksek değildir.



Şekil 2.16: Yanal yayılma tahmin modeli performans değerlendirilmesi

Kaynak: (Youd vd., 2002).

Daha yakın zamanlarda, Faris vd. (2006) aşağıdaki yarı deneysel modeli sunmuştur.

$$H_{\max} = \exp(1.0443 \cdot \ln(DPI_{\max}) + 0.0046 \cdot \ln \alpha + 0.0029 \cdot M_w) \quad (2.14)$$

Burada H_{\max} , metre cinsinden yanal yayılmadır, DPI_{\max} maksimum d6ng6sel kayma şekil değiştirme potansiyelidir, α eğim veya serbest y6zey oranıdır ve M_w deprem b6y6kl6ęüdür. Faris ve ark. benzer şekilde, sonuçları şekil 2.18’de sunulan bir performans değerlendirme çalışması gerçekleştirmiştir. Bu çerçevenin, fiziksel olarak anlamlı bir terim olan, zeminlerin d6ng6sel kayma gerilme potansiyelini hesaba kattığına dikkat edilmelidir. Ancak Youd ve arkadaşlarının y6ntemine benzer şekilde, bu modun tahmini başarı oranı 0-3 m yer değiştirme aralığında çok y6ksek değildir.

2.1.9 Sıvılaşma potansiyeli değerlendirmesi için kullanılan araçlar

Bu araçlar, sahada yapılan testlerin, çok sayıda vaka geçmişini içeren veri setleri aracılığıyla, yerinde test verileri ile ‘‘sıvılaşma’’ veya ‘‘sıvılaşma olmaması’’ ile saha davranışı arasındaki ilişkiyi geliştirmeye çalışır. Bu y6ntemlerden elde edilen sonuçlar, geleneksel y6ntemlere g6re bir gelişme g6stermiştir. S6z konusu belli başlı y6ntemler bu b6l6mde 6zetlenmiştir.

2.1.9.1 Sonlu elemanlar tekniği (Diana vb programlar)

Sonlu elemanlar y6nteminde (FEM), bir problemin tamamı yerine, sonlu elemanlar adı verilen sonlu sayıda daha k66k alanlarla idealleştirilir. Her sonlu eleman için, y6netici diferansiyel denklem, deneme fonksiyonları kullanılarak eleman içinde yaklaştırılır. Problemin toplam 6z6m6, sınır koşullarının dayatılmasıyla birlikte global bir matrisin 6z6lmesinden bulunabilir. Bunu yapabilen çok sayıda ve değişik alanlarda problem 6zebilen, analizler yapabilen FEM yazılımları mevcuttur. Bunlar;

LASS-II (Suya Doygun Zemin 6kelleri Sıvılaşma Analizi),

CUMLIQ, rastgele titreşim prosed6rleri kullanılarak bir zemin 6kelinde sıvılaşma potansiyelinin değerlendirilmesi.

CPTINT, CPT ve CPTU sonuçlarının yorumlanmasına dayanan men6 odaklı bir programdır.

LIQUITER, deprem y6klemesine maruz kalan doygun kohezyonsuz tabakaların sıvılaşmasına karşı g6venlik fakt6r6n6 belirlemede kullanılır.

CLiq, CPT verilerinden sıvılaşma potansiyelini analiz eder.

FEQDrain, dikey drenajlı katmanlı kumda deprem oluşumu ve boşluk suyu basıncının dağılımının analizi için kullanılan sonlu eleman bilgisayar programıdır.

VERSAT-D2D, depremler, makine titreşimi, dalgalar veya buz hareketlerinden kaynaklanan dinamik yüklere maruz kalan toprak yapılarının dinamik 2D düzlem gerilme sonlu eleman analizleri için kullanılan bir bilgisayar programıdır.

SHAKE2000, ShakEdit ve SHAKE'ı entegre eden bir yazılım paketidir.

SPTLIQ, basitleştirilmiş Seed-Idriss prosedürlerine dayalı standart penetrasyon testi (SPT) verilerini kullanarak sıvılaşma potansiyelini ve deprem kaynaklı zemin oturmalarını analiz eder

LATSPREAD, ampirik yöntemlere dayalı olarak beklenen sıvılaşma kaynaklı yanıl yayılmanın büyüklüğünü tahmin eder.

GEOSTRESS, hem stres hem de termal kaynaklı faaliyetlere yerinde zemin deformasyon tepkisini tahmin eder ve konsolidasyonu, sismik yüklemeyi ve donmuş zeminin sürünmesini modelleyebilir.

SWANDYNE, tamamen eşleştirilmiş modeller kullanan dinamik bir etkileşim ve doğrusal olmayan 2D programdır.

ZSOIL, temel mühendisliğinde karşılaşılan doğal süreçlerin çoğunu simüle eden sonlu elemanlar yöntemine dayalı program.

DIANA, beton, çelik, zemin, kaya ve zemin-yapı etkileşimindeki tasarım ve değerlendirme yapabilen yazılımdır.

Yukarıda bahsedilen yazılımlar Bölüm 2.1.10'da detaylı olarak anlatılmıştır.

2.1.9.2 Sonlu farklar tekniği (Flac 3d)

FLAC3D (Ortamın 3 Boyutta Hızlı Lagrange Analizi), zemin, kaya ve yapısal desteğin üç boyutlu gelişmiş geoteknik analizi için kullanılan sayısal bir modelleme yazılımıdır. Geoteknik, inşaat ve maden mühendisleri tarafından analiz, test ve tasarımda kullanılır. Süreklilik analizinin gerekli olduğu her türlü geoteknik mühendislik projesini çözebilecek şekilde tasarlanmıştır. Malzemeler, kullanıcı tarafından modellenecek nesnenin şekline uyacak şekilde ayarlanan bir ızgara oluşturan elemanlar veya bölgelerle temsil edilir. Her eleman, uygulanan kuvvetlere

veya sınır kısıtlamalarına yanıt olarak, önceden belirlenmiş bir doğrusal veya doğrusal olmayan gerilme/gerilme ilişkisine göre davranır. Açık, Lagrange hesaplama şeması ve içinde kullanılan karma ayrıklaştırma bölgeleme tekniği, plastik göçme ve akışın çok doğru bir şekilde modellenmesini sağlar. Benzer yazılım paketleriyle karşılaştırıldığında, geoteknik problemlere uygunluğunu artıran çeşitli avantajlara sahiptir. Örneğin, içindeki "büyük gerilme" hesaplama seçeneği, simülasyonların malzeme kırılmasına kadar, bu sırada ve sonrasında modeldeki önemli deformasyonları yakalamasına olanak tanır (Itasca, 2009). Yazılım, geniş gerilme seçeneğine ek olarak, özel yapısal elemanların dahil edilmesi yoluyla zemin-yapı etkileşim problemlerinin analizini kolaylaştırır. Değiştirilmiş Cam-kil ve lineer elastik Mohr - Coulomb gibi geo-malzemesler için yaygın olarak kullanılan birkaç plastisite modeli, yazılımda uygulanmıştır (Itasca, 2009).

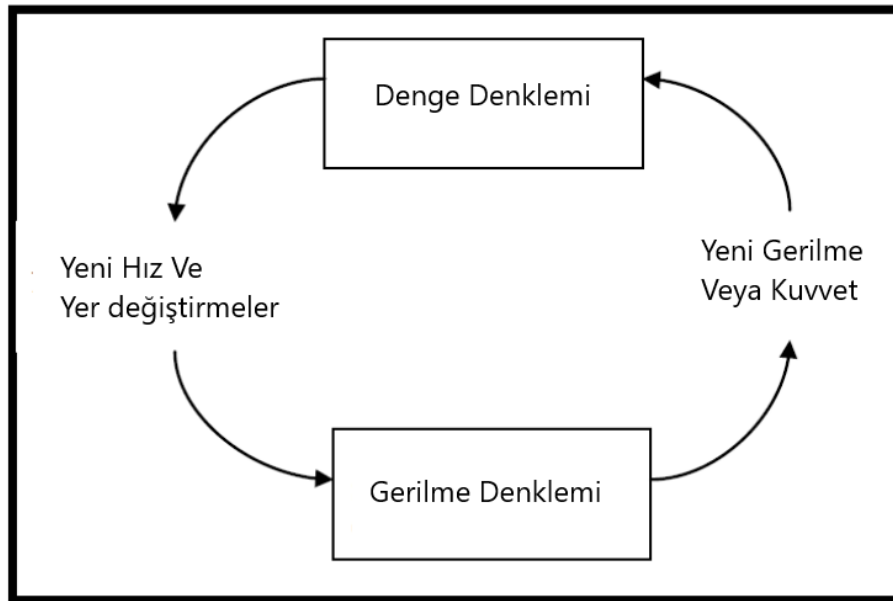
Düğüm noktaları ve oluşan bölgeler tarafından oluşturulan geometriye ızgara denir ve bir sonlu eleman ağına benzer. Her (i,j) bölgesi (i,j) , $(i,j+1)$, $(i+1,j+1)$ ve $(i+1,j)$ dört ızgara noktası ile tanımlanır. Her bölge dört ızgara noktasıyla tanımlanır, ancak herhangi bir dörtgen şekli alabilir. Bölge geometrisine bağlı olarak bazı bölgelerin sadece iki alt bölgesi olmasına rağmen, çoğu bölgeyi dört üçgen alt bölgeye ayırır (Itasca, 2009).

Mevcut sayısal yöntemlerle karşılaştırıldığında, sonlu farklar yönteminin bariz avantajları vardır. FLAC3D hesaplamasında karışık ayrıklaştırma teknolojisini kullanarak, malzemelerin plastik hasarı veya akma ötesi davranışı daha kesin ve etkili bir şekilde simüle edilir, bu nedenle yaklaşımın geleneksel sonlu elemanlar yöntemlerinde kullanılan sayısal entegrasyondan daha gerçekçi olduğu düşünülmektedir (Qiang vd., 2002).

Dinamik hareket denklemlerinin tümü, statik problemlerin simülasyonunda da kullanılır. Bu nedenle, mekanik sistemin tüm özellikleri, sistemi dengesizlikten dengeye simüle etmek için kullanılabilir. Kesin sonlu farklar sayısal yönteminde hesaplama sırasında büyük bir rijitlik matrisinin oluşturulması gerekli değildir. Bu nedenle, bu yöntemi kullanarak, yalnızca bilgisayar belleğinden tasarruf etmekle kalmaz, ardından analiz süresini kısaltır, aynı zamanda sistemi çözme hızını da artırır. Ancak, FLAC 3D'nin modelleme ve ağ oluşturma gibi Ön İşleme'de bariz eksiklikleri vardır. Modelleme, yalnızca çok sezgisel olmayan ve doğrudan katı model oluşturamayan FLAC 3D kullanan veri dosyalarıyla gerçekleştirilebilir. Daha

karmaşık jeolojik model için, modelleme sırasında hata yapılması kolay ve kontrol edilmesi zor olan kontrol noktaları modellemesinin detay verileri gereklidir. FLAC 3D ile modellemenin zaman alıcı olması ve karmaşıklık gibi sorunları çözmesi gerekir. Doğrudan sonucu elde etmek için üç boyutlu simülasyon, uzun bir hesaplama periyodu gerektirir. FLAC3D'deki genel hesaplama yöntemi kısaca aşağıdaki gibidir: ilk olarak, gerilimlerden ve kuvvetlerden yeni hızlar ve yer değiştirmeler türetmek için hareket denklemleri kullanılır. Daha sonra hızlar, gerilme oranlarını elde etmek için kullanılır ve bu da yeni gerilmeler elde edilir. Yukarıda açıklanan döngü etrafında hareket, bir adımı oluşturur. Bu döngü içindeki her adımda, tüm ızgara değişkenleri, söz konusu adım yapılırken sabit kalan bilinen değerlerden güncellenir. Yukarıda bahsedilenler şematik olarak Şekil 2.18'de gösterilmektedir. Bünye denklemlerini içeren "kutu", önceden hesaplanmış hız setini alır ve her eleman için yeni gerilmeleri hesaplar. "Kutu"nun çalışması için hızların değişmediği varsayılır, yani yeni hesaplanan gerilmeler hızları etkilemez (Itasca, 2009).

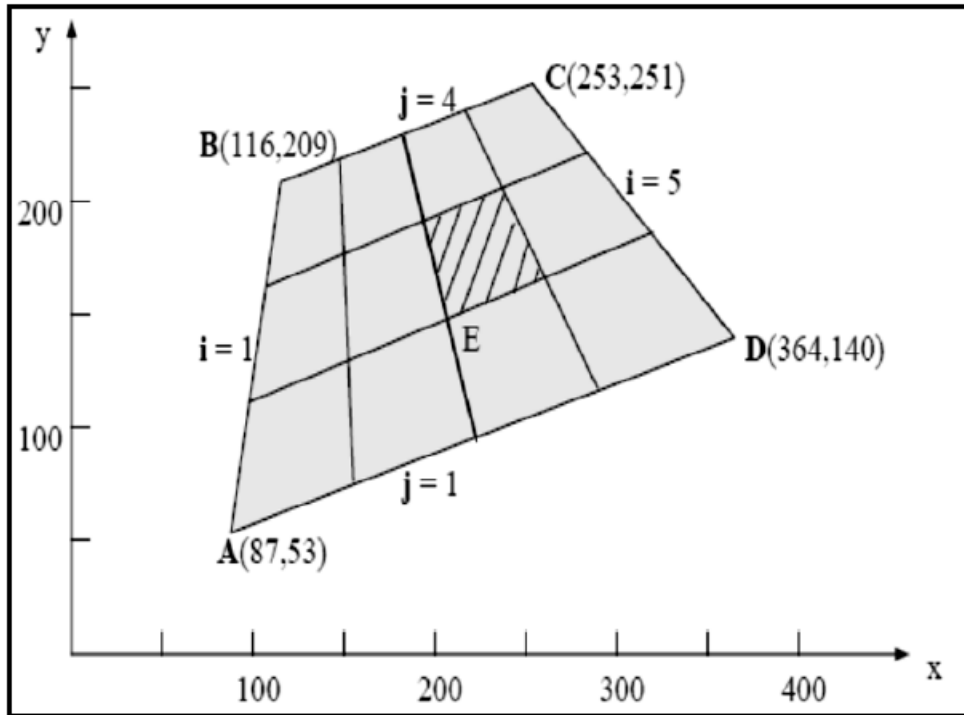
FLAC3D'deki problemlerin geometrisi ızgaralar ve ızgara noktaları ile tanımlanır. FLAC 3D, ızgaraları ve ızgara noktalarını satır ve sütun şeklinde düzenler. "i" ile ifade edilen yatay yönde ve "j" ile ifade edilen dikey yönde düzenlenirler. Satır ve sütunların numaralandırılmasına modelin sol alt köşesinden başlanır (Sivakugan, 2006).



Şekil 2.17: FLAC3D'de temel açık hesaplama döngüsü

Kaynak: (Itasca, 2009).

Bir problemi çözenin ilk adımı, problem bölgesini uygun bir ızgaraya (veya ağa) bölmektir. Sınırlar yeterince uzak seçilmelidir (Sivakugan, 2006). Şekil 2.19 basit bir 4x3 ızgarayı göstermektedir. ABCD sınırları içindeki her noktanın koordinatlarını yansıtmak için x-y Kartezyen koordinat sistemi kullanılır. i ve j tamsayıları (1 ile başlayan – sıfır değil), mutlaka dik olması gerekmeyen iki yöndeki ızgara çizgilerini (ve öğeleri) belirtmek için kullanılır. Bu nedenle, her eleman ve düğüm bir çift i ve j değeri ile tanımlanabilir. Koyu çizgi $i = 3$ ile, taranmış eleman $i=3$ & $j=2$ ile ve düğüm (veya ızgara noktası) E $i = 3$ & $j = 2$ ile tanımlanır (Sivakugan, 2006). Esasen model, varsayılan bir hiperbolik ilişkiye dayalı olarak modellenen zeminin yapısal gerilme-şekil değiştirme davranışını tahmin eder ve dolayısıyla zemin iskeletinin ilişkili hacimsel tepkisi, mevcut gerilme oranının bir fonksiyonu olan bir akış kuralı kullanılarak tahmin edilir. Modellerden biri, gerilme tersine çevrilmelerini hesaplar, yatay düzlemler üzerinde etkili olan kesme gerilmesini izleyerek kesme gerilmesi döngülerini sayar. Her çevrimin çevrimsel gerilme oranı (CSR) ölçülür ve bu, aşırı boşluk basıncı artışına çevrilen artımlı "hasarı" hesaplamak için kullanılır (Girsang, 2001; Ziotopoulou, 2010).



Şekil 2.18: FLAC3D'de sonlu fark ağı

Kaynak: (Sivakugan, 2006).

Aynı zamanda, sıvılaşmayı tetiklemek için gereken kayma gerilmesi döngülerinin sayısına yanıt olarak doğrudan boşluk basıncını ürettiği için "ayrışmış" (veya

"gevşek bağlanmış") efektif gerilme modeli olarak da tanımlanır. Boşluk basınçları, bir döngüsel dayanım eğrisi tarafından tanımlandığı gibi malzemenin döngüsel mukavemetine göre aşamalı olarak üretilir. Bazı araştırmacılar bu yaklaşımı, "basit, sağlam ve uygulamaya yönelik" olarak tanımlanmıştır. Avantajlarından biri, girdi parametrelerinin sıradan saha araştırmalarından kolayca elde edilebilmesidir (Ziotopoulou, 2010).

2.1.9.3 Regresyon tekniği

Regresyon, değişkenler arasındaki ilişkiyi incelemek için kullanılan ve herhangi bir sayıda açıklayıcı değişken tarafından bir sonucun tahmin edilmesini sağlayan istatistiksel bir araçtır. Özellikle sürekli fonksiyon yaklaşımları için kullanışlıdır. Çok boyutlu girdiye sahip olabilir ve veriler aracılığıyla çok boyutlu yüzeylere sığar. Ağa yeni bir kalıp sunulduğunda, bu kalıplardan ne kadar uzakta olduğunu belirlemek için bu girdi kalıbı N boyutlu uzayda eğitim setindeki tüm kalıplarla karşılaştırılır. Ağ tarafından tahmin edilen çıktı, eğitim setindeki tüm çıktıların orantılı bir miktarıdır. Oran, yeni kalıbın eğitim setinde verilen kalıplardan ne kadar uzakta olduğuna bağlıdır. Çıktı parametresi, daha önce açıklanan yöntemlerden farklıdır. Lojistik regresyon, sonuç ölçüsü olarak ikili (evet/hayır) değişkenleri kullanan bir regresyon türüdür. Dolayısıyla bu farklılık nedeniyle, girdi ve çıktı katmanları arasında bilgi taşıyan gizli katmanlar ve aralarındaki ilişkiler farklı bir ağırlığa sahiptir (McCulloch and Pitts, 1943). Sıvılaşma potansiyelinin değerlendirilmesi bağlamında, sıvılaşma olasılığını SPT, CPT veya Vs gibi yerinde test verileriyle ilişkilendiren matematiksel denklemler geliştirmek için lojistik regresyon kullanılabilir.

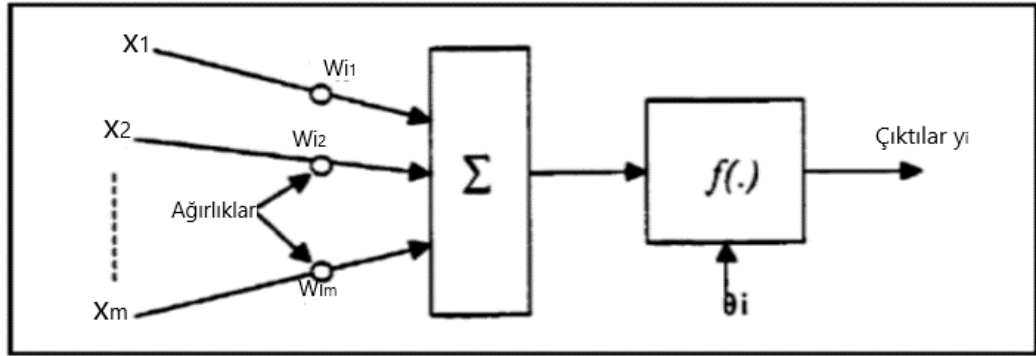
2.1.9.4 Yumuşak bilgi işlem teknikleri

Yapay sinir ağı (YSA), destek vektörü gibi yumuşak hesaplama teknikleri Son zamanlarda yapay sinir ağı (YSA), destek vektör makineleri (SVM), uygunluk vektör makinesi (RVM) vb. gibi yumuşak hesaplama teknikleri son zamanlarda kullanılmıştır.

2.1.9.5 Yapay sinir ağı (YSA)

Yapay sinir ağları, insan beynine benzeyen bazı organizasyonel ilkelerden yararlanmak için oluşturulmuş sistemler ve hesaplama cihazlarıdır. Normalde paralel

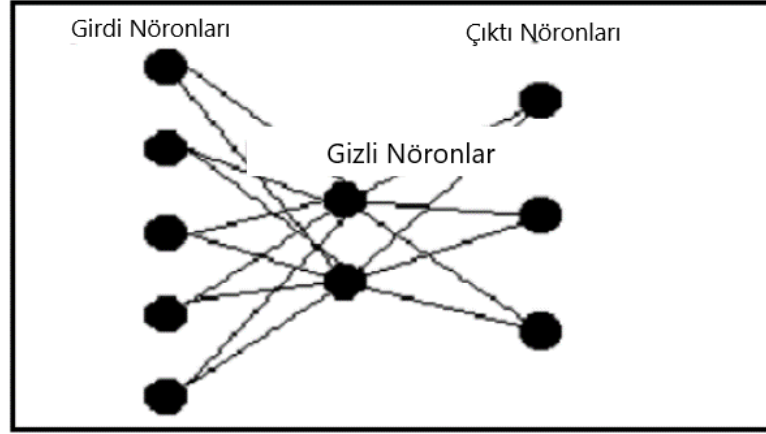
bağlı mimarilerde çalıştırılan ve yapılandırılan çok sayıda yüksek düzeyde bağlantılı hesaplama düğümü (nöron) vardır. İnsan beyni gibi bir yapay sinir ağı da öğrenme yeteneğine sahiptir; Sistemi eğitmek için kullanılan verileri hatırlar ve genelleştirir. Giriş birimlerindeki etkinleştirme modeli, ağa sunulan sorunu temsil eder; ve çıktı işleme birimlerindeki aktivasyon modeli, sinir ağı tarafından elde edilen hesaplama sonuçlarını temsil eder. Sinir ağı, gerçek çıktı ile hedef çıktı arasındaki farkı en aza indirerek her bağlantılı nöron arasındaki bağlantının ağırlıklarındaki değişiklikleri yayar. Sinir ağı tarafından gerçekleştirilen hesaplamaların bağlantı ağırlığındaki değişikliklerin yayılması, nöronlar arasındaki bağlantıların topolojisinden ve kuvvetlerinden güçlü bir şekilde etkilenir. Örnek olarak, Şekil 2.20 bu ağın basit bir matematiksel modelini göstermektedir. Sinir ağı teknolojisinin temel yapı taşı simüle edilmiş nörondur. Bağımsız nöronlar, bir nöron ağında birbirine bağlı olmadıkça çok daha az yararlıdır. Ağ, bir çıktı, ağın sınıflandırmaları ve tahminleri üretmek için dışarıdan girilen bir dizi veriyi işler.



Şekil 2.19: Bir nöron ağının şematik diyagramı

Kaynak: (McCulloch and Pitts, 1943).

Nöronlar, bir nörondan diğerine aktarılan değerlere uygulanan ağırlıklarla birbirine bağlanır. Bir grup nörona levha denir. Nöronlar ayrıca dış dünyayla bağlantılarına göre katmanlara ayrılır. Örneğin, bir nöron ağ dışından veri alıyorsa, giriş katmanında olduğu kabul edilir. Bir nöron, ağın tahminlerini veya sınıflandırmalarını içeriyorsa, çıktı katmanındadır. Giriş ve çıkış katmanları arasındaki nöronlar gizli katman(lar)dadır. Bir katman, bir veya daha fazla nöron levhası içerebilir (Şekil 2.21) (Ural vd., 2003).



Şekil 2.20: Sinir ağları yapısı

Kaynak: (Ural vd., 2003).

Sinir ağları programlanmamıştır; örnek olarak öğrenirler. Tipik olarak, bir sinir ağı, ağı öğrenilebileceği bir grup örnekten oluşan bir eğitim seti ile sunulur. En yaygın eğitim senaryoları, ağı bu model için hedef çıktıyla birlikte bir girdi modeliyle sunulduğu denetimli öğrenmeyi kullanır. Hedef çıktı genellikle girdi modeli için doğru yanıt veya doğru sınıflandırmayı oluşturur. Bu eşleştirilmiş örneklere yanıt olarak, sinir ağı kendi iç ağırlıklarının değerlerini ayarlar. Eğitim başarılı olursa, dahili parametreler daha sonra ağı her giriş modeline yanıt olarak doğru yanıtları üretebileceği noktaya ayarlanır. Genellikle eğitim örnekleri seti, ağı dahili parametrelerini kademeli olarak ayarlamasına izin vermek için eğitim sırasında birçok kez sunulur.

Yapay sinir ağı yaklaşımı, sınıflandırma problemine özel algoritma ve programların insan tarafından geliştirilmesini gerektirmez, bu da zamandan ve insan emeğinden tasarruf edilebileceğini düşündürür. Bununla birlikte, sinir ağı yaklaşımının dezavantajları vardır: Ağı eğitmek için gereken zaman önceden bilinmeyebilir ve bir uygulama sorununu başarıyla çözen bir ağı tasarlama süreci söz konusu olabilir. Eğitim setindeki girdiden farklı yeni bir girdi modeli ile sunulduğunda, ağı doğru cevabı vermesini sağlayarak, eğitildiği görevler üzerinde genelleme yapabilen bir ağı geliştirmek mümkündür. Eğitim setini genelleştirebilecek bir sinir ağı geliştirmek için, genelleme görevi için iyi bir hazırlık olan çeşitli örnekler içermelidir. Ek olarak, eğitim oturumu yinelemelerle sınırlandırılmalıdır, böylece “aşırı öğrenme” gerçekleşmez.

Bu nedenle, bir sinir ağından etkili genelleme davranışına izin vermek için eğitim setini ve eğitim sunumlarını oluştururken özel yaklaşımlar yapılmalıdır. Sinir

ağlarının tüm bu özellikleri, sinir ağı modellerinin basit matematiksel yapısıyla açıklanabilir. Sinir ağındaki yapılan hesaplamalar matematiksel olarak belirtilebilir. Özet olarak, bir yapay sinir ağı, aşağıdaki özelliklere sahip paralel bir hesaplama sistemidir, doğal olarak esinlenilmiş bir matematiksel modeldir, çok sayıda birbirine bağlı işlem biriminden oluşur, bağlantıları (ağırlıkları) arasındaki ilişki hakkında bilgi içerir. girdiler ve çıktılar, her nöron kendi girdi uyarısına dinamik olarak yanıt verebilir ve yanıt tamamen kendi yerel bilgisine bağlıdır, yani giriş sinyalleri bağlantılar ve bağlantı ağırlıkları aracılığıyla işlem elemanına ulaşır, eğitimden hatırlama ve genelleme öğrenme yeteneğine sahiptir. Bağlantı ağırlıklarını ayarlayarak veriler ve ayrıca toplu davranışı hesaplama gücünü gösterirken, tek bir nöron belirli bilgileri taşımaz, bilgi büyük bir hesaplama gücüne sahip nöronlar arasında dağıtılır (Lin and Lee, 1996). Farklı sinir ağı mimarileri vardır. Bu mimarilerin farklılıkları, algoritmaları ve fonksiyon formülleridir. Ayrıntılı olarak, YSA'ların tipik bir yapısı, genellikle nöronlar olarak adlandırılan, birbirine bağlı bir dizi işlem elemanından (PE'ler) oluşur.

Nöronlar mantıksal olarak katmanlar halinde düzenlenmiştir: bir girdi katmanı, bir çıktı katmanı ve bir veya daha fazla gizli katmandan oluşur. Nöronlar, ağırlıklı bağlantılar aracılığıyla birbirleriyle etkileşime girer. Her nöron bir sonraki katmandaki tüm nöronlara bağlıdır. Giriş katmanı, verilerin ağa sunulma aracıdır. Çıkış katmanı, ağın girişe verdiği yanıtı tutar. Gizli katmanlar, bu ağların girdiler ve çıktılar arasındaki karmaşık ilişkileri temsil etmesini ve hesaplamasını sağlar (Lin and Lee, 1996).

Geri yayılım öğrenme algoritması, en yaygın kullanılan yapay sinir ağı (YSA) algoritmasıdır. Geri yayılım sinir ağı, jeoteknik ve jeoçevre mühendisliği alanındaki birçok olayı modellemek için büyük bir başarı ile uygulanmıştır. Bir katmandaki her nöron, bir önceki katmandaki nöronlardan ağırlıklı girdileri alır ve işler ve çıktılarını bağlantılar aracılığıyla bir sonraki katmandaki nöronlara iletir. Her bağlantıya, bağlantı gücünün sayısal bir tahmini olan bir ağırlık atanır. Bir nörona girdilerin ağırlıklı toplamı, doğrusal olmayan bir transfer fonksiyonuna göre bir çıktıya dönüştürülür. Literatürde yaygın olarak kullanılan yaygın transfer fonksiyonu sigmoid fonksiyonudur. YSA, gerçek çıktı değerleri ile hedef çıktı değerleri arasındaki hatalara yanıt olarak nöronların ağırlıklarını değiştirerek "öğrenir". Bu,

tüm eğitim desenleri için hataların karelerinin toplamı üzerinde gradyan inişi yoluyla gerçekleştirilir (Lin and Lee, 1996).

Ağırlıklardaki değişiklikler, hata teriminin türevinin negatif değeri ile orantılıdır. Ağırlıkların ilgili güncellenmesiyle birlikte eğitim kalıpları kümesinden bir geçiş, bir döngü veya bir dönem olarak adlandırılır. Eğitim, tüm eğitim kalıpları üzerindeki ortalama toplam kare hatası minimum olana ve problem için belirtilen tolerans dahilinde olana kadar, eğitim kalıplarının tamamının tekrar tekrar sunulmasıyla (her dönemin sonunda ağırlıkların güncellenmesiyle) gerçekleştirilir. Eğitim aşamasının sonunda, sinir ağı, eğitim verileri için hedef çıktı değerlerini doğru bir şekilde yeniden üretmelidir ve hataların minimum olması gereklidir. Nöronların ilişkili eğitilmiş ağırlıkları daha sonra sinir ağı belleğinde saklanır. Bir sonraki aşamada, eğitilmiş sinir ağı ayrı bir veri seti ile beslenir. Bu test aşamasında, eğitilmiş ağırlıkları kullanan sinir ağı tahminleri, hedef çıktı değerleri ile karşılaştırılır. Genel YSA modelinin performansı çeşitli kriterlere göre değerlendirilebilir.

Bu kriterler, belirleme katsayısını (R^2), ortalama kare hatası, ortalama mutlak hata, minimum mutlak hata ve maksimum mutlak hatayı içerir. İyi eğitilmiş bir model, 1'e yakın bir R^2 değeri ve hata terimlerinin küçük değerleri ile sonuçlanmalıdır.

2.1.9.6 Destek vektör makinesi (SVM)

Son yıllarda, sınıflama potansiyelini değerlendirmek için Yapay sinir ağı (YSA), Destek vektör makinesi (SVM) ve Uygunluk vektör makinesi (RVM) gibi yumuşak hesaplama teknikleri, mevcut istatistiksel yöntemlere kıyasla daha iyi doğrulukla başarıyla uygulanmaktadır. Yakın geçmişte, Darwinci doğal seleksiyon teorisine dayanan evrimsel yumuşak hesaplama tekniği genetik programlama (GP), alternatif bir yumuşak hesaplama tekniği olarak kullanılmaktadır.

Destek vektör makinesi (SVM), tahmin hatası ve model karmaşıklığının aynı anda en aza indirildiği, gelişmekte olan bir makine öğrenimi teknolojisidir. Biyolojiden ilham alan algoritmaya dayanan YSA modellemesinin aksine, SVM istatistiksel öğrenme teorisine dayanmaktadır. Destek vektör makinesi, yüksek genelleme kabiliyeti nedeniyle daha popüler hale gelmektedir (Vapnik, 1998). Ancak, SVM'nin sınıflama tetikleme analizine uygulanması çok sınırlıdır ancak YSA modellemesine kıyasla daha iyi genelleme kabiliyetine sahip olduğu bulunmuştur (Pal 2006; Goh ve Goh 2007; Samui ve Sitharam 2011).

Destek Vektör Makinesi (SVM), Boser ve diğerleri tarafından öncülük edilen istatistiksel öğrenme teorisi kavramından kaynaklanmıştır (Boser vd., 1992). Sıvılaşma analizi için SVM, ϵ 'ye duyarlı bir kayıp fonksiyonu tanıtarak bir regresyon tekniği olarak kullanılır. Bir dizi eğitim verisi göz önüne alındığında, Burada x girdidir, y çıktıdır, R^N ise N boyutlu vektör uzayıdır ve r tek boyutludur vektör alanıdır. $\{ (x_1, y_1), \dots, (x_n, y_n) \}$, $x \in R^n$, $y \in r$

ϵ -duyarlı kayıp fonksiyonu aşağıdaki şekilde tanımlanabilir.

$$L_\epsilon = \begin{cases} 0 & \text{if } |f(x) - y| < \epsilon \\ |f(x) - y| - \epsilon & \text{otherwise} \end{cases} \quad (2.15)$$

Bu, bir ϵ tüpünü tanımlar, böylece tahmin edilen değer tüpün içindeyse kayıp sıfır olur, tahmin edilen nokta tüpün dışındaysa kayıp sapma eksi ϵ 'nin mutlak değerine eşittir. SVM'deki ana amaç, gerçek çıktıdan ϵ sapma veren ve aynı zamanda mümkün olduğunca düz olan bir $f(x)$ fonksiyonu bulmaktır. DVM'nin son denklemleri şu şekilde yazılabilir

$$f(x) = \sum_{i=1}^{nsv} (b_i + \alpha_i - \alpha_i^*) K(x_i, x_j) \quad (2.16)$$

Burada α_i , α_i^* Lagrange Çarpanlarıdır, nsv destek vektörlerinin sayısıdır ve $K(x_i, x_j)$ çekirdek fonksiyonudur. Lineer olmayan durumlar için polinom (homojen), polinom (homojen olmayan), radyal temel fonksiyon, Gauss fonksiyonu, sigmoid vb. gibi bazı yaygın çekirdek fonksiyonları kullanılmıştır (Pal, 2006). SPT ve CPT veri tabanına dayalı sıvılaşma sonrası durum geçmişlerini kullanarak SVM tabanlı sınıflandırma modelleri geliştirmiş ve tahmin doğruluğunun sırasıyla %96 ve %97 olduğunu gözlemlemiştir. CPT veri tabanını kullanarak SVM modeli geliştirmiş ve genel sıvılaşma sınıflandırma doğruluğunun %98 olduğunu bulmuşlardır (Goh ve Goh, 2007). 1999 yılında Chi Chi Tayvan sıvılaşma sonrası veri tabanını kullanarak sıvılaşma ve sıvılaşma olmamasının sınıflandırılması için SPT tabanlı DVM modeli geliştirmişler ve bağımsız bir veri kümesine dayalı sınıflandırma doğruluğunun %77,5 olduğunu bulmuşlardır (Samui ve Sitharam, 2011).

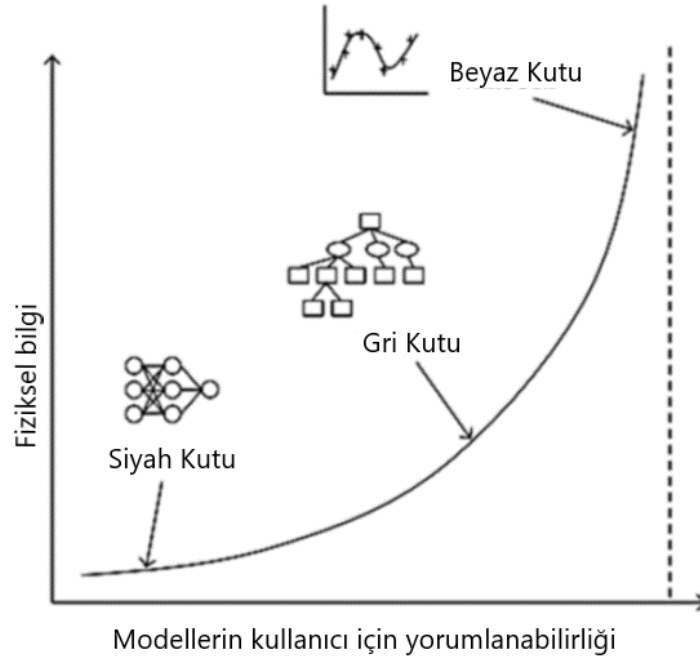
2.1.9.7 Uygunluk vektör makinesi (RVM)

Uygunluk vektör makinesi (RVM), revize edilmiş bir SVM aracıdır. Tipping (2001) tarafından tanıtılmıştır ve Bayesian lineer model formülasyonuna dayanan seyrek bir lineer modeldir. Sıvılaşma potansiyeli değerlendirmesi için güvenilir CPT tabanlı

sıvılaşma vaka geçmişi veri setini kullanarak RVM modelini geliştirmiştir ve genel performansın tahminde iyi olduğunu, ANN modelinden daha doğru olduğunu ortaya koymuştur. İki model geliştirerek, güvenilir CPT verilerinden sıvılaşma potansiyelini değerlendirmek için RVM tabanlı sınıflandırma yaklaşımının potansiyelini incelemiştir. Model-I ve Model-II için sıvılaşma tahmin doğruluğu sırasıyla %100 ve %97,14'tür (Das ve Samui, 2008).

2.1.9.8 Genetik programlama (GP)

Yakın geçmişte, Darwinci doğal seleksiyon teorisine dayanan genetik programlama (GP), alternatif bir yumuşak hesaplama tekniği olarak kullanılmıştır. GP, yeni nesil yumuşak bilgi işlem tekniği olarak tanımlanır. Renklere dayalı modelleme tekniklerinin sınıflandırmasına göre anlamı gerekli olan üç ön bilgi düzeyi ile ilgilidir, beyaz-, siyah- ve gri-kutu modelleri, her biri kullanılabilir. Aşağıdaki gibi açıklanabilir. Kara kutu modelleri (örneğin, YSA, SVM, vb.), model değişkenleri arasındaki işlevsel ilişki biçiminin bilinmediği ve tahmin edilmesi gereken veri odaklı veya gerilemeli sistemlerdir. Kara kutu modelleri, model girdi-çıkı ilişkilerinin uygun bir yapısını bulmaktan ziyade, model girdileri ve karşılık gelen çıktılar arasındaki ilişkileri haritalamak için verilere dayanır. Ancak gri kutu modelleri, modelin matematiksel yapısının türetilmediği ve sistem davranışına ilişkin daha fazla bilginin çözülmesine izin veren kavramsal sistemlerdir. Beyaz kutu modelleri, model değişkenlerinin ve parametrelerinin bilindiği ve sistemin temel fiziksel ilişkilerinin açıklanabileceği fiziksel bir anlama sahip olduğu ilk ilkelere (örneğin fiziksel yasalar) dayanan sistemlerdir. GP ve onun varyantı olan çok genli GP (MGGP), gri kutu teknikleri olarak sınıflandırılabilir. Şekil 2.22'de model geliştirme sırasında kullanılan fiziksel bilgi ne kadar yüksekse, modelin kullanıcıya izin verdiği olgunun fiziksel yorumunun o kadar iyi olduğu, yukarıdaki sınıflandırmanın resimli bir temsilidir (Giustolisi vd., 2007).



Şekil 2.21: Hesaplama modelleme tekniklerinin grafiksel sınıflandırmaları

Kaynak: (Giustolisi vd., 2007).

GP ve varyantları kullanılarak geliştirilen modeller, bazı zor geoteknik mühendislik problemlerine başarıyla uygulanmıştır. GP'nin ve onun varyantı olan çok genli genetik programlamanın (MGGP) geleneksel istatistiksel yöntemlere ve diğer yumuşak hesaplama tekniklerine göre ana avantajı, farklı model değişkenleri açısından kompakt ve açık bir tahmin denklemi geliştirme yeteneğidir. Ancak, sıvılaşma duyarlılık değerlendirmesinde kullanımı çok sınırlıdır (Gandomi ve Alavi, 2012). Gandomi ve Alavi (2012), sıvılaşma sonrası CPT veri tabanını kullanarak bir sıvılaşma sınıflandırma modeli geliştirmiştir. Modellerinin genel sınıflandırma doğruluğu, çok iyi olarak kabul edilen %91,6'dır. Ancak geliştirilen modelin performansı, diğer yumuşak hesaplama tekniklerine dayalı mevcut modellerle karşılaştırılmamıştır. Geliştirilen model, test verileri dışında bağımsız veri seti ile de test edilmemiştir.

2.1.10 Sıvılaşma analizlerinde kullanılan bilgisayar programları

LASS-II (Suya Doymuş Zemin Çökelleri Sıvılaşma Analizi), yatay katmanlı suya doymuş zeminlerin deprem etkisini ve sıvılaşmasını analiz eden bir yazılımdır. Su tablasının altındaki doymuş zemin, bileşen malzemeleri olarak katı tanecikli iskelet ve boşluk suyu ile birleştirilmiş iki fazlı bir ortam olarak modellenmiştir. Bu iki faz arasındaki bağlantı dikkate alınan bir yazılımdır.

CUMLIQ, rastgele titreşim prosedürleri kullanılarak bir zemin çökeline sınılaşma potansiyelinin değerlendirilmesi için kullanılır. Bu yazılım, depremlerin genel istatistiksel parametreleriyle birlikte zeminlerin bilinen saha ve laboratuvar verilerini kullanarak sismik sınılaşma potansiyelini tahmin eder.

CPTINT, CPT ve CPTU sonuçlarının yorumlanmasına dayanan menü odaklı bir programdır. Zemin sınıflandırma tipinin sürtünme ve boşluk basıncı oranlarına, bağıl yoğunluk ve iç sürtünmeye göre 3 yöntemle yorumlanması, SPT-N ve N1, sınılaşmaya neden olan döngüsel gerilme oranı ve deprem, dinamik kesme modülü ile uygulanan 35'ten fazla farklı korelasyon parametresi, kısıtlı modül ve Young modülü, çeşitli derinlik aralıklarında birim seçimi ile parametre menüsü kullanılarak hesaplanabilir. Yeni özellikler arasında gelişmiş bir zemin ampirik sınılaşma analizi, yeraltı suyu tablasının üstü, ayrı bir sınılaştırma menüsünde yorumlama temeli için Rf veya Bq bölgesinin kullanımı ve kullanıcı tanımlı birim ağırlık, SPT-N, su basıncı, Qt, Rf veya Bq Bölgesi ve Derinlikli CSR(EQ) analizi yapılabilmektedir (Url-4, 2006).

LIQUITER, 1982 yılında Seed ve Idriss tarafından deprem yüklemesine maruz kalan doygun kohezyonsuz tabakaların sınılaşmasına karşı güvenlik faktörünü belirlemekte kullanılır. Girdi verileri, depremi simüle etmek için gerekli sismik parametrelerle birlikte zemin birim ağırlığı, SPT bağıl yoğunluğu ve medyan parçacık çapıdır. Kullanılan formül, maksimum değer yerine ortalama bir değer referans alınarak depremin neden olduğu çevrimsel gerilme oranı aracılığıyla maksimum ivme tepe noktalarının dikkate alınmasını sağlar.

CLiq, CPT verilerinden sınılaşma potansiyelini analiz eder. Kullanıcılara CPT ve CPTU verileri için özel olarak hazırlanmış bir grafik ortamı sağlar. Yazılım, kil benzeri topraklarda döngüsel yumuşama ve ince tabaka/katman geçiş bölgesi tespiti gibi gelişmiş sorunları ele alır. Temel CPT verilerinin yorumlanmasından başlayarak, güvenlik faktörü, sınılaşma potansiyeli indeksi ve deprem sonrası yer değiştirmelerin, hem dikey oturma hem de yanal yer değiştirmelerin nihai çizimlerine kadar her hesaplama adımı için sonuçlar ve grafikler sağlar (Url-4, 2006).

LiqIT, yaygın olarak kullanılan saha verilerine dayalı olarak kuvvetli yer hareketinin etkisi altında gevşek, doygun kohezyonsuz zeminlerin sınılaşmasının analizini gerçekleştirir. En yeni ve iyi bilinen deterministik ve olasılıksal yöntemleri kullanır.

SPT, CPT ölçümlerinden saha veri girişi ile genel sıvılaşma potansiyeli, Iwasaki formülasyonuna göre değerlendirilir (Url-4, 2006).

FEQDrain, dikey drenajlı katmanlı kumda deprem oluşumu ve boşluk suyu basıncının dağılımının analizi için kullanılan sonlu eleman bilgisayar programıdır. Potansiyel olarak sıvılaşabilir alanlar için zemin stabilizasyonunun yöntemi ile, deprem yüklemesi tarafından üretilen fazla boşluk suyu basıncını dağıtmak ve böylece sıvılaşmayı önlemek için bir dikey drenaj sisteminin kullanılmasıdır. Bu sistemler için performans değerlendirmeleri, aşırı boşluk basıncı oranının maksimum eşik seviyesinin aşılmaması için dikey drenaj aralığının tahmin edilmesini gerektirir. FEQDrain, sıvılaşmayı azaltmak için geokompozit dikey drenajlı katmanlı kum yataklarında üç boyutlu boşluk basıncı oluşumunu ve dağılımını analiz etmek için kullanılabilir. Bir zemin sorununu analiz etmek için dört farklı modülü vardır.

VERSAT-D2D, depremler, makine titreşimi, dalgalar veya buz hareketlerinden kaynaklanan dinamik yüklere maruz kalan toprak yapılarının dinamik 2D düzlem gerilme sonlu eleman analizleri için kullanılan bir bilgisayar programıdır. Dinamik analizler, lineer veya lineer olmayan veya lineer olmayan efektif stres analiz yöntemleri kullanılarak gerçekleştirilebilir. Program, zemin sıvılaşması, deprem kaynaklı deformasyon ve kazık destekli köprüler gibi dinamik zemin-yapı etkileşimini incelemek için kullanılabilir. Dinamik boşluk suyu basıncını ve dinamik boşluk suyu basıncını hesaplamak için üç modeli içeren efektif gerilme modelini değerlendirme yeteneğine sahiptir.

SHAKE2000, ShakEdit ve SHAKE'ı entegre eden bir yazılım paketidir. Aşağıdaki özelliklerle SHAKE için bir grafik kullanıcı arabirimi sağlar: En yüksek yatay ivmeyi ve mesafeyle hızı tahmin etmek için sözde ivme ve sözde hız tepki spektrumları gibi çok sayıda zayıflama ilişkisi kullanılmaktadır. Aşağıdakiler kullanılarak sıvılaşmayı başlatmak için gereken döngüsel direnç oranının (CRR) tahmini: Standart Penetrasyon Testi sonuçları ve Seed vd. (1985) tarafından geliştirilen (CRR) ile $N_{1,60,cs}$ tablosu NCEER (1997) çalıştayında revize edildiği şekliyle; ve Robertson ve Wride tarafından (Robertson ve Wride, 1997) önerilen Koni Penetrasyon Testi (CPT) verileri, Tokimatsu ve Seed yöntemi (Seed vd., 1985) veya Ishihara ve Yoshimine yöntemi kullanılarak deprem sarsıntısının neden olduğu oturmanın hesaplanması gibi özellikleri mevcuttur.

SPTLIQ, basitleştirilmiş Seed-Idriss prosedürlerine dayalı standart penetrasyon testi (SPT) verilerini kullanarak sıvılaşma potansiyelini ve deprem kaynaklı zemin oturmalarını analiz eder (Url-4, 2006).

CPTLIQ, basitleştirilmiş Seed-Idriss temelinde koni penetrasyon testi (CPT) verilerini kullanarak sıvılaşma potansiyelini ve deprem kaynaklı zemin oturmalarını analiz eder (Url-4, 2006).

LATSPREAD, Kullanıcı tanımlı tasarım depremi için Youd, Hansen, Bartlett, Bardet ve Tobita tarafından geliştirilen ampirik yöntemlere dayalı olarak beklenen sıvılaşma kaynaklı yanal yayılmanın büyüklüğünü tahmin etmektedir (Url-4, 2006; Bardet ve Tobita, 1999; Youd, Hansen, Bartlett, 2002).

GEOSTRESS, hem stres hem de termal kaynaklı faaliyetlere yerinde zemin deformasyon tepkisini tahmin eder ve konsolidasyonu, sismik yüklemeyi ve donmuş zeminin sürünmesini modelleyebilir. Kullanıcının başlangıç sıcaklıklarını, basınçları, yükleri, yer değiştirmeleri ve gerinimleri belirlemesine izin verir ve kazılar, toprak dolgular ve yapısal yükler için inşaat sırası simülasyonlarına izin verir. Model, karmaşık mühendislik uygulamaları için efektif gerilme, konsolidasyon ve sızıntıdaki geçici değişiklikleri modelleme yeteneği veren birleştirilmiş geçici boşluk basıncı tepkisi çözümüne sahiptir. Program ayrıca, statik ve dinamik olarak indüklenen sıvılaşma yenilmelerinin ve ilerleyici yenilmenin neden olduğu şev duraysızlığının analizine izin veren pik gerilme yumuşatma modellerinin kullanımını da içerir (Url-4, 2006).

SWANDYNE, tamamen eşleştirilmiş modeller kullanan dinamik bir etkileşim ve doğrusal olmayan 2D programdır. Program hem üçgen hem de dörtgen şeklinde sonlu elemanlar kullanır. Akışkan hızı diferansiyel denklem aşamasında elimine edilebildiğinden, elde edilen değişkenler iskelet yer değiştirmesi (u) ve boşluk suyu basıncıdır (p). Bu yüzden u - p formülasyonu olarak adlandırılır. Program, Drenajlı veya Drenajsız koşullar altında Statik, Konsolidasyon ve Dinamik koşulları dikkate almak için kullanılabilir. Program, sıvılaşma davranışının modellenmesi de dahil olmak üzere, kum ve kilin monotonik ila döngüsel yüklemesini ele alabilen bir yapısal model kütüphanesi içerir (Url-4, 2006).

ZSOIL, stabilite, konsolidasyon, sünme, kazı ve yeraltı akışı ve sıvılaşma dahil olmak üzere geoteknik ve temel mühendisliğinde karşılaşılan doğal süreçlerin

çoğunu simüle eden sonlu elemanlar yöntemine dayalı bir geoteknik, temel ve yeraltı suyu mühendisliği programıdır (Url-4, 2006).

DIANA, beton, çelik, zemin, kaya ve zemin-yapı etkileşimindeki tasarım ve değerlendirme faaliyetleriyle ilgili zorlu teknik problemlerin üstesinden gelmesiyle tanınan, kendini kanıtlamış ve test edilmiş bir yazılımdır. Programın sağlam işlevselliği, gelişmiş veritabanı tekniklerine, doğrusal ve doğrusal olmayan yeteneklere, tam 2D ve 3D modellemeye ve CAD araçlarına dayalı kapsamlı malzeme, eleman ve yöntem kitaplıkları içerir. DIANA ayrıca güçlü çözüm yöntemleri sunar. Ana işlevler arasında doğrudan ve yinelemeli çözümler; otomatik yük ve zaman adımı; birkaç artımlı yinelemeli yöntem, devam yöntemleri ve satır arama tekniği, otomatik alt yapılandırma bulunmaktadır (Url-4, 2006).

Diana, bir sistemin tam dinamik tepkisinin, ya frekans alanında ya da zaman alanında simüle edilmesi için modellenmesine izin verir. Ayrıca sınıvlandırılmış zeminin malzeme davranışını simüle etmek için özel bir malzeme modelleri kitaplığı içerir: Towhata-Iai modeli, Nishi modeli ve Ramberg-Osgood-Bowl modeli sayılabilir. Geçici analizde, sınıvlaşma analizi için kurucu modellere isteğe bağlı olarak viskoz bir katkı eklenebilmektedir. Bu viskozite sabit bir değer veya aşırı boşluk basıncı oranının çok doğrusal bir fonksiyonu olabilir (Url-4, 2006).

FLAC3D, zemin, kaya ve yapısal desteğin üç boyutlu gelişmiş geoteknik analizi için kullanılan sayısal bir modelleme yazılımıdır. Geoteknik, inşaat ve maden mühendisleri tarafından analiz, test ve tasarımda kullanılır. Süreklilik analizinin gerekli olduğu her türlü geoteknik mühendislik projesini çözebilecek şekilde tasarlanmıştır. Malzemeler, kullanıcı tarafından modellenecek nesnenin şekline uyacak şekilde ayarlanan bir ızgara oluşturan elemanlar veya bölgelerle temsil edilir. Her eleman, uygulanan kuvvetlere veya sınır kısıtlamalarına yanıt olarak, önceden belirlenmiş bir doğrusal veya doğrusal olmayan gerilme/gerilme ilişkisine göre davranır. Açık, Lagrange hesaplama şeması ve içinde kullanılan karma ayrıklaştırma bölgeleme tekniği, plastik göçme ve akışın çok doğru bir şekilde modellenmesini sağlar. Benzer yazılım paketleriyle karşılaştırıldığında, geoteknik problemlere uygunluğunu artıran çeşitli avantajlara sahiptir.

Çizelge 2.5: Kullanılan yazılımlar ve özellikleri

Program Adı	Özellikleri
LASS-II	yatay katmanlı suya doymuş zeminlerin deprem etkisi
CUMLIQ	Deprem istatistiksel parametrelerive zeminlerin bilinen saha ve laboratuvar verileri
CPTINT	CPT ve CPTU sonuçlarının yorumlanması
LIQUITER	sismik parametrelerle birlikte zemin birim ağırlığı, SPT bağıl yoğunluğu ve medyan parçacık çapı
CLiq	CPT ve CPTU verileri için özel olarak hazırlanmış bir grafik ortamı sağlar
LiqIT	kuvvetli yer hareketinin etkisi altında gevşek, doymun kohezyonsuz zeminlerin sıvılaşmasının analizi için gerçekleştirir
FEQDrain	dikey drenajlı katmanlı kumda deprem oluşumu ve boşluk suyu basıncının dağılımının analizi için kullanılır
VERSAT-D2D	depremler, makine titreşimi, dalgalar veya buz hareketlerinden kaynaklanan dinamik yüklere maruz kalan toprak yapılarının dinamik 2D düzlem gerilme analizi
SHAKE2000	ShakEdit ve SHAKE'ı entegre eden bir yazılım paketidir
SPTLIQ	(SPT) verilerini kullanarak sıvılaşma potansiyelini ve deprem kaynaklı zemin oturmalarını analiz eder
LATSPREAD	ampirik yöntemlere dayalı olarak beklenen sıvılaşma kaynaklı yanıl yayılmanın büyüklüğünü tahmin etmektedir
GEOSTRESS	hem stres hem de termal kaynaklı faaliyetlere yerinde zemin deformasyon tepkisini tahmin eder ve konsolidasyonu, sismik yüklemeyi ve donmuş zeminin sürünmesini modelleyebilir.
SWANDYNE	eşleştirilmiş modeller kullanan dinamik bir etkileşim ve doğrusal olmayan 2D programdır
ZSOIL	stabilite, konsolidasyon, sünme, kazı ve yeraltı akışı ve sıvılaşma dahil olmak üzere geoteknik ve temel mühendisliğinde karşılaşılan doğal süreçlerin çoğunu simüle eder
DIANA	beton, çelik, zemin, kaya ve zemin-yapı etkileşimindeki tasarım ve değerlendirme işlemleri
FLAC3D	zemin, kaya ve yapısal desteğin üç boyutlu gelişmiş geoteknik analizi için kullanılır

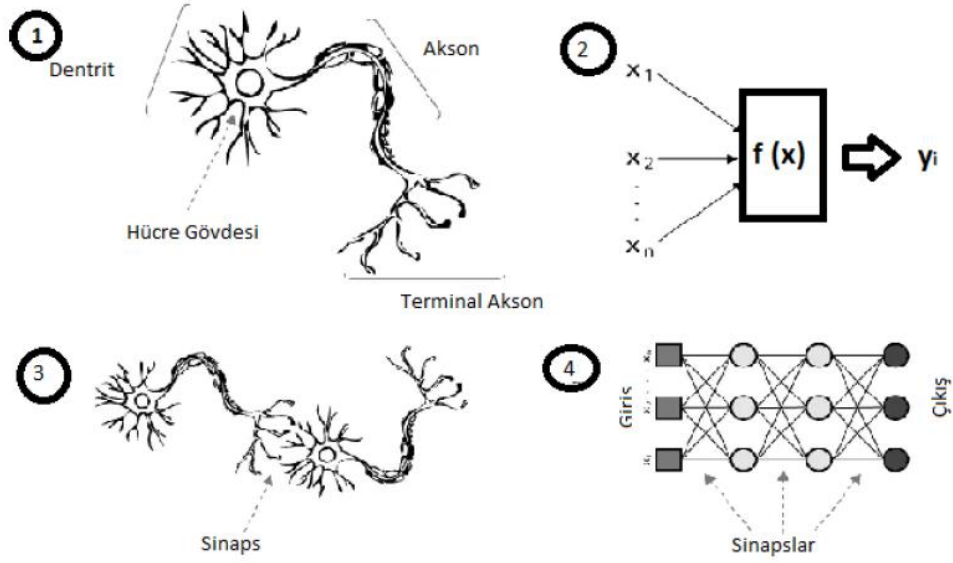
2.2 Yapay Sinir Ağları

Yapay sinir ağları (YSA), insan beynine ait öğrenme işlevini takliti sayesinde beyindeki öğrenim, hatırlama, genelleme fonksiyonları ile toplanan verileri kullanarak yeni veri oluşturabilme gibi ana fonksiyonların yapılabildiği bilgisayarın

kullanıldığı yazılımsal elemanlardır. YSA; insan beyni incelenerek, beyindeki öğrenme adımlarının matematik yöntemle modelleme çabası ile geliştirilmiştir (Kabalcı, 2014). YSA, birine paralel olarak yayılmış ağlar, bağlı ağlar, nöromorfo ağlar gibi adlarla da tanımlanmaktadır (Keskenler & Keskenler, 2017).

YSA modeli ilk kez, 1943'de bir nöroloji doktoru olan Warren McCulloch ve bir matematik uzmanı Walter Pitts tarafından "Sinir Aktivitesinde Düşüncelere Ait Bir Mantıksal Hesap (A Logical Calculus of Ideas Immanent in Nervous Activity) başlıklı makale ile tartışmaya açılmıştır (Egrioglu vd., 2009).

Nöronlar, birbirine sıkı sıkıya bağlı sinir hücreleri kümesidir veya insan beynindeki temel bilgi işlem birimleridir. Yaklaşık 10 milyar nöron ve 60 trilyon aralarındaki bağlantılar, sinapslar sayesinde bu işlemler gerçekleşir. Beyin en hızlı bilgisayarlardan çok daha hızlı çoklu nöronlar sayesinde işlevini gerçekleştirebilir. Beyindeki öğrenme, sinyallerin nöronlar arasında yayılmasına dayanır. Karmaşık elektrokimyasal yollarla bir nörondan diğerine reaksiyonlar iletilir. İnsan beyni son derece yüksek kapasiteli bir beyin olarak kabul edilebildiğinden karmaşık, doğrusal olmayan ve paralel bilgi işleme sistemi vasıtasıyla, hem veri toplanması hem de işlenmesi lokal değil küresel bir sinir sistemi ağı ile gerçekleşir. Bu sisteme ait en ilginç bulgu, bir sinir ağı, arasındaki bağlantılarda, 'doğru cevaba' götüren nöronlar güçlendirilirken 'yanlış cevaba' götüren nöronlar zayıflar. Bu veri, sinir ağlarının deneyim yoluyla öğrenme yeteneğini gösterir. Öğrenme, biyolojik öğrenmenin temel bir özelliğidir. Yapay sinir ağları, bilgisayarların sağladığı kolaylık ile doğal biyolojik bir sinir ağı gibi öğrenme sistemini taklit eder. Günümüzde yapay sinir ağları (YSA) bir kağıt uçağın süpersonik bir jeti taktil ettiği kadar insan beynine benzemektedir. İnsan beynine benzediği için; YSA, bir dizi nörondan benzeri yapıdan oluşur. Bu nöronlar, birinden sinyalleri ağırlıklandırarak, bir nörondan diğerine geçirir. Her nöron bir dizi girdi alıp, tek bir sinyal üretirken, bağlantısı üzerinden sinyaller verir. Giden nöronlar aracılığıyla iletilen çıkış sinyali, giden bağlantıyı bir sayıya böler ve aynı sinyali ileten dallara ayırılır. Ayrılan birimler, ağdaki diğer nöronlardan gelen bağlantıları yok eder (Negnevitsky, 2002).



Şekil 2.22: Biyolojik sinir hücresi ve yapay sinir ağı

Kaynak: (Maltarollo vd., 2013).

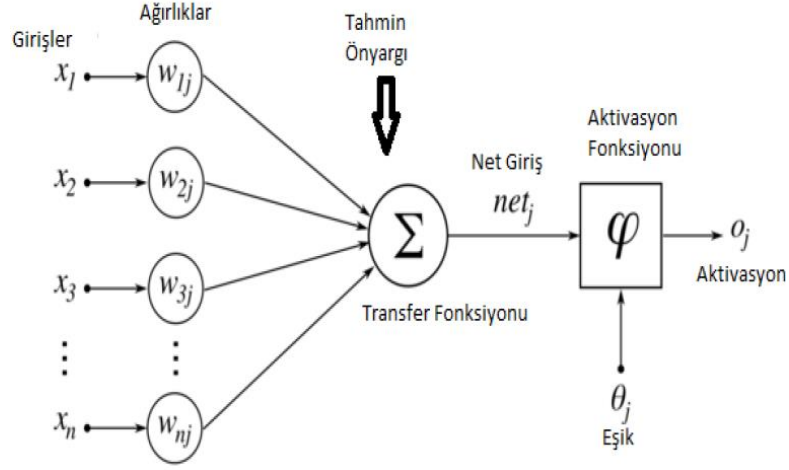
Gerçek canlı için nöral hücre ve YSA benzeşimi Şekil 2.23’de verilmiştir. Gerçek nöral sistem bileşenleri ve YSA karşılıkları ise Çizelge 2.6’de verilmiştir. Burada biyolojik sinir sistemi kısımlara ayrılmış ve her bir elemana karşılık yapay sinir ağı siteminde bir karşılığı verilmiştir.

Çizelge 2.6: Canlı nöral sistem bileşenleri ve YSA karşılığı

Biyolojik Sinir Sistemi	Yapay Sinir Sistemi
Nöron	İşlemci Elemanı
Dentrit	Toplama Fonksiyonu
Hücre Gövdesi	Transfer Fonksiyonu
Aksonlar	Yapay Nöron Çıkışı
Sinapslar	Ağırlıklar

Kaynak: (Url-5, 2021).

Aşağıdaki Şekil 2.24’de ifade edildiği gibi bir adet hücreye n adet veri ataması yapılabilir (X_n veri girdisi). Girişi yapılan veriler sayısal ağırlıkları çarpılarak elde edilen sonuçlar toplanır, daha sonra önyargı ilave edilerek takiben net yargı bulunur. Net girdi aktive fonksiyonu kullanılarak bir veri çıkışı bulunur.



Şekil 2.23: Yapay sinir hücresi

Kaynak: (Url-6, 2021)

2.2.1 Yapay sinir ağlarının özellikleri

YSA ana özellikleri aşağıda gösterilmiştir:

- Lineer Olmama
- Paralel Çalışmaları
- Öğrenme özelliği
- Genelleme yapabilme
- Hata Toleransı ve Flexibilite
- Eksik Verilerle Çalışması
- Fazla Sayıda Parametre ve Değişken Kullanabilme
- Uyarlanabilme özelliği

YSA uygulamaları genelde tahmin yapma, sınıflandırma işlemleri, verilerin ilişkilendirilmesi, verilerin yorumlanması ve verilerin filtrelemesi amacıyla kullanılabilir (Ağyar, 2015). Bu işlemleri tanımlarsak;

Tahmin işlemi: Bu alanda çalışan YSA girdi değeri ile çıkışların tahminine dayalı çalışmaktadır, mesela altın birim fiyatının tahmin edilmesi.

Veri Filtreleme İşlemi: Bu şekilde kodlanmış olan yapay ağlar ile toplanmış olan veri setleri içinde en kullanışlı olan verileri dikkate alınır.

Sınıflandırma işlemi: Girdi değerleri tasnif edilerek YSA'nın hızlı şekilde sonuca ulaşmasını sağlar.

Verileri Yorumlama İşlemi: Daha öncesinde eğitilmiş olan ağ girdileri analiz edilerek, bir vaka ile ilgili bu girdi analizi ile yeni yorumlar yapılabilir.

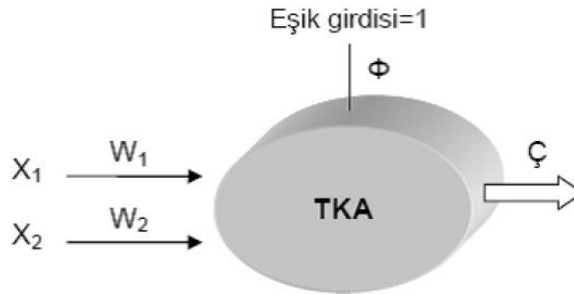
Verilerin İlişkilendirmesi İşlemi: Öğrenilen bilgiler ile konuların ilişkilendirilmesi yapılarak, belirlenen eksik bilgilerin tamamlanması sağlanır.

2.2.2 Yapay Sinir ağı (YSA) modelleri

YSA modelleri tek tabakalı algılayıcı, çok tabakalı algılayıcı, ileri beslemeli YSA ve geri beslemeli YSA şeklinde dört ayrı başlığa ayrılabilir.

2.2.2.1 Tek tabakalı algılayıcılar

Tek tabakalı ağlarda sadece girdi ve çıktı mevcuttur. Tek tabakalı algılayıcı sistemde çıktı fonksiyonu lineerdir ve sadece "1" veya "-1" değerini alabilir. Çıktının "1" olması durumunda ilk sınıf, "-1" olması durumunda ikinci sınıf olarak alınır (Öztemel, 2003).



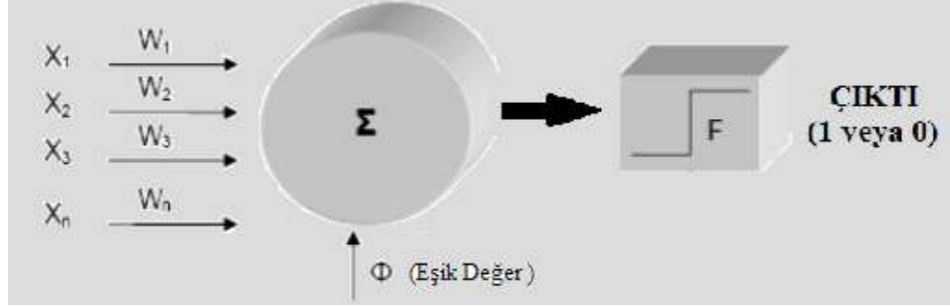
Şekil 2.24: Tek katmanlı algılama modeli

Kaynak: (Öztemel, 2003)

2.2.2.1.1 Adaline modeli

Yapay sinir ağlarında ki en basit ağ modelidir. Basit nöron benzeri elemanlara dayanan ve "Adaline" (Adaptive Linear Neuron) olarak adlandırılan bir adaptif lineer eleman olarak geliştirilmiştir. Adaline ve iki tabakalı biçimi olan "Madaline" (Multiple Adaline); ses tanıma, karakter tanıma, hava tahmini ve adaptif kontrol gibi çok çeşitli uygulamalar için kullanılmıştır. İlk defa Widrow ve Hoff tarafından, telefon hatları üzerindeki ekoları elimine etmeye yarayan adaptif filtreleri geliştirmede, adaptif lineer eleman algoritması kullanılmıştır. Bu ağ modeli birçok

uygulama için oldukça iyi çalışmasına rağmen kullanım alanı lineer problem uzayıyla sınırlıdır, doğrusal olmayan problemler için çözüm üretemez (Şekil 2.26) (Widrow ve Hoff, 1962).

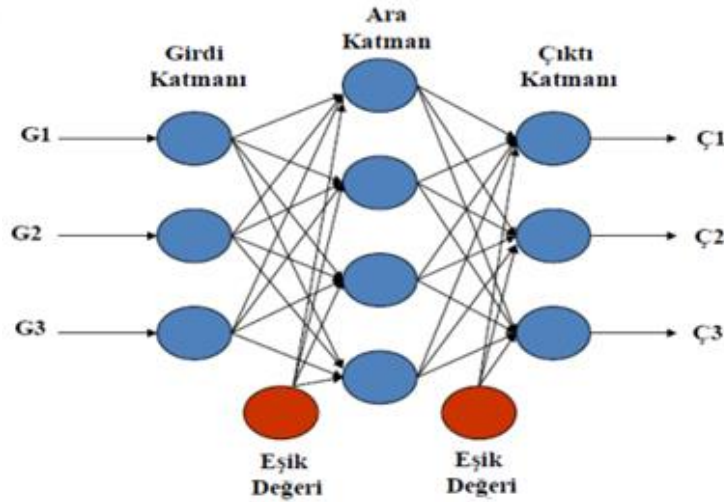


Şekil 2.25: Adaline ağ modeli

Kaynak: (Widrow ve Hoff, 1962).

2.2.2.2 Çok tabakalı algılayıcılar

Yapısal açıdan lineer şekilde olmayan aktive fonksiyonu olan çok sayıda nöronun belirli bir hiyerarşi içinde bağlanmış olduğu yapı çok tabakalı algılayıcı denilmektedir. Çok tabakalı algılayıcıların geliştirilmesinde mevcut yöntemlerle etkili sonuç elde edilememesinin payı vardır.



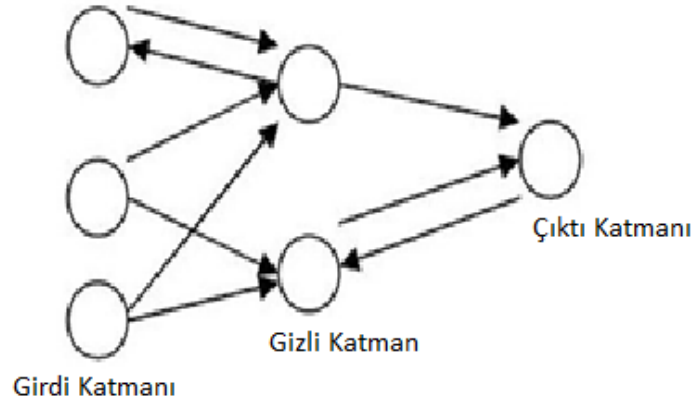
Şekil 2.26: Çok katmanlı algılama modeli

Kaynak: (Kabalıcı, 2014).

2.2.2.3 İleri beslemeli YSA sistemi

İleri beslemeli YSA sisteminde mevcut nöronların girişinden çıkışına doğru düzenli tabakalı bir yapıdadır. Bir tabakanın sadece kendinden sonraki tabakalara bağlantısı mevcuttur. YSA sistemi girişine ulaşan veriler değiştirilmeden orta noktaya başa bir

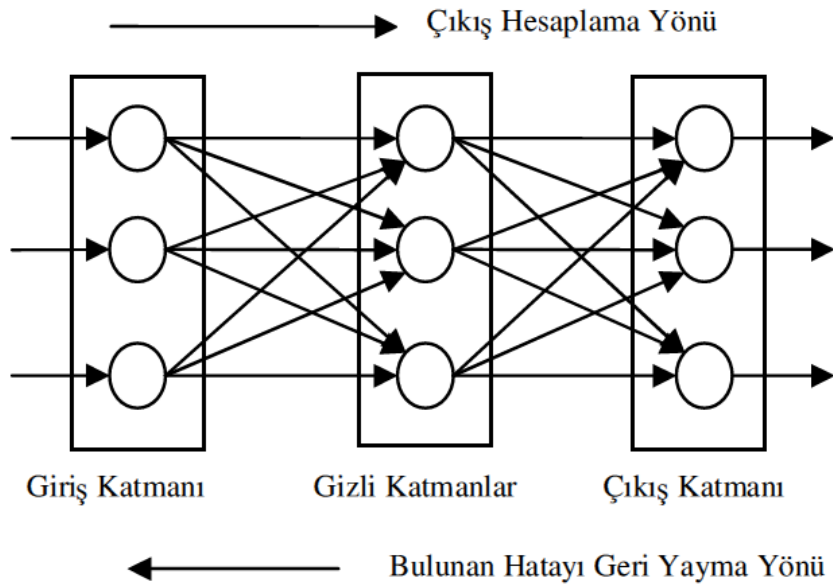
ifadeyle gizli tabakadaki hücelere ulaştırılır. Sonrasında çıkış tabakasından işlenerek geçer ve dış ortama iletilir.



Şekil 2.27: İleri beslemeli YSA

2.2.2.4 Geri beslemeli YSA sistemi

Geri beslemeli YSA sisteminin, ileri beslemeli YSA sisteminden farkı, bir nöronun çıkışının sadece kendini izleyen nöron tabakasına girdi olarak verilmemesidir. Öncesindeki tabakada veya kendi tabakasında bulunmakta olan herhangi bir nörona girdi şeklinde bağlanması mümkündür. Bu yapı sayesinde geri beslemeli YSA lineer olmayan dinamik bir yapı sergilemektedir. Geri besleme özelliği kazandıran bağlantıların bağlanma yapısına göre; aynı YSA farklı davranış ve yapıda geri beslemeli YSA elde edilmesi mümkündür (Doğan, 2016).



Şekil 2.28: Geri beslemeli ağ yapısı

Kaynak: (Kurnaz, 2014).

.2.2.3 Levenberg-Marquardt algoritması

Newton algoritmasının bir başka türü olan LM algoritması YSA ile birlikte ileri beslemeli geriye yayımlı algoritmalar arasında kullanılmaktadır (Hagan ve Menhaj, 1994; Ham ve Kostanic, 2001; Okkan ve Mollamahmutoğlu, 2010). LM algoritması hızlı yakınsaması, kendi içerisinde az parametre muhteva etmesi ve sadece birinci dereceden kısmi türevler ile işletilmesi bakımından avantajlı bir algoritmadır. LM algoritmasında SSE amaç fonksiyonunu minimize edecek optimum ağ ağırlıkları W , k iterasyon adımıyla Denklem 1 yardımıyla bulunabilmektedir.

$$\Delta W(k) = -[J_k^T J K + \lambda k I]^{-1} J_k^T e k \quad (2.17)$$

$$W(k+1) = W(k) + \Delta W(k) \quad (2.18)$$

Denklem 2.18'de $\Delta W(k)$ k . iterasyonda ağ ağırlıklarındaki değişimi sembolize etmektedir. Burada J Jakobien matrisi ifade etmekte olup ağ hataları olan e 'nin ağırlıklara göre birinci türevlerinden oluşmaktadır. λ Marquardt parametresini, I ise birim matrisi temsil etmektedir. Marquardt parametresi de LM algoritmasında iterasyonlar boyunca güncellenebilen bir parametredir. Eğer herhangi bir iterasyon adımında SSE azalıyorsa, λ bir sonraki iterasyon için belirli bir bozulma oranı (decay rate) ile çarpılarak kullanılmaktadır. Bu değer genelde 0.1 alınabilmektedir. Aksi durumda ise λ bir sonraki iterasyon için seçilen bozulma oranı değerine bölünerek kullanılmaktadır. Böylece her bir adımda ağın performansının iyileştirilmesi amaçlanmaktadır.

2.2.4 YSA ana bileşenleri

YSA iki ana bileşenden meydana gelir. Bu bileşenler öğrenme algoritması ile aktivasyon fonksiyonudur.

2.2.4.1 Öğrenme algoritması

Yapay Sinir Ağlarının en belirgin özelliklerinin başında veriyi tam kaynağında öğrenme özelliği vardır. Ağda bulunan veri biyolojik ağlardaki sinaps denilen Yapay Sinir Ağların dıysa ağırlık olarak tanımlanan kısımlarda saklanır. Bu nedenle ağırlıklar çok daha önemli hale gelmektedir. Ağın tümü dikkate alınırsa, ağırlıkların en uygun değeri alması gerekmektedir. Yani ağırlıklar, mevcut veriler içinde en uygun olan değeri bulmak için çalışır. Böylece ağın eğitilmesi söz konusu olacaktır.

2.2.4.2 Aktivasyon fonksiyonu

Aktivasyon fonksiyonun, YSA hücresinde girdi verileri üzerinden işlem yaparak, bu veriye karşı gelen net çıktı sonucu üretir. Burada kullanılan fonksiyon genellikle lineerlik sergilemez. Fonksiyonun bu amaç için uygun seçilmesi kritiktir. Zira elde edilen sonuç YSA performansını doğrudan etkiler. Söz konusu fonksiyon tek ve çift iki kutup şeklinde olabilecektir.

Kullanılan aktivasyon fonksiyonları olarak;

- Parçalı lineer fonksiyon,
- Hiperbolik tanjant aktivasyon fonksiyonu,
- Adımsal aktivasyon fonksiyonu, sayılabilir

2.3 İnşaat Mühendisliğinde Matlab Kullanımı

MATLAB pek çok bilimsel araştırmada kullanılan gelişmiş bir matematik tabanlı yazılımdır. MATLAB ismi “Matrix Laboratory” kelimelerinin kısaltması olarak elde edilmiştir. Mühendislik uygulamaları kolayca yapılabildiği için hemen her mühendislik alanında son derece yaygın ve etkili bir çözüm olarak kullanılmaktadır (Url-7, 2021).

MATLAB yazılımı, MathWorks firması tarafından geliştirilmiştir. MATLAB, kullanıcının C, C++ ve Java gibi diğer dillerde yazılmış programlarla, matris işlemleri, fonksiyon ve veri çizimi, algoritma geliştirme ve kullanıcı arayüzü oluşturma ile çalışmasına olanak tanır. Araştırmacılar ve geliştiriciler ilk olarak MATLAB'ı kontrol mühendisliğinde kullanmışlardır. Ayrıca lineer cebir, sayısal analiz ve görüntü işlemeyi öğrenmek için yaygın olarak kullanılan bir araçtır (Url-7, 2021).

MATLAB, New Mexico Üniversitesi Bilgisayar Bölümünden Prof. Cleve Moler tarafından yazılmıştır. Bu yazılım ile istenen amaç, öğrencilerin Fortran dili olmadan lineer cebir ve nümerik analiz hesapları yapabilmeleri için başka bir yol bulabilmektir. 1984 yılında Steve Bangart, Jack Little, Cleve Moler bir araya gelerek MathWorks firmasını kurmuştur. MathWorks firması, 1984 yılında, MATLAB yazılımına ait ilk sürümü yayınlamıştır (Url-7, 2021).

MATLAB ile C programlama dilinde veya Fortran'da fonksiyonları çağırabilir ve alt programlar yazabilirsiniz. MATLAB, Lineer cebir, istatistik, optimizasyon, sayısal analiz, Fourier analizi gibi matematiksel hesaplamalar etkin ve hızlı bir şekilde yapılabilmektedir. MATLAB programlama dili, 2D ve 3D grafik çizimi için de kullanılır. MATLAB ile çok karmaşık matematiksel hesaplamalar kısa sürede tamamlanabilir. MATLAB ile temel matematiksel fonksiyonların iki ve üç boyutlu grafikleri kolaylıkla çizilebilir. MATLAB ayrıca, polinomlar, paraboller, sinüs, kosinüs dalgaları başta olmak üzere her türlü iki ve üç boyutlu matematiksel grafiği kolaylıkla çizebilmektedir.

MATLAB Kullanılmasını

- MATLAB'ı kullanımı ile farklı algoritmaları geliştirip kullanılabilir.
- Mevcut dosyalar veya veritabanları gibi kaynaklara ait verileri MATLAB'in içine çağırarak, bu verilerle analizler yapılabilir yada farklı araçlar kullanarak sonuçların görsel hale getirilmesi sağlanabilir.
- MATLAB, matematik tabanlı bir yazılım olarak lineer cebir ve matrislerin hesabında çok yararlı olan matematiksel fonksiyon kütüphanesi içermektedir.
- Girdi verisi modelleri, prototip ve tasarlanan yada hesaplanan fonksiyonlara ait simülasyonlar MATLAB'in gelişmiş yetenekleri ile gerçekleştirilebilir.
- Bunlara ek olarak, başka kullanıcılar için veya MATLAB'in diğer mevcut uygulamaları ile senkron halde ve uyumlu çalışabilmesi için arayüzler geliştirilmesi mümkündür.

MATLAB'in Sağladığı Avantajlar

- MATLAB her bir veri bileşeninin bir matris olarak alır. Örneğin bir tam sayıyı, bir satır ve bir sütun şeklinde bir matris olarak alır. Matrislerin toplaması, çarpması ve tersini almak gibi işlemleri için program kendi içinde hazır fonksiyonlar verir.
- MATLAB araç kutusu kullanımı sayesinde fonksiyonelliği çok büyük oranda arttırılabilir. Mesela, statik araç çubuğu, girdi verilerin özelleştirilen istatistik formatta kullanımını mümkün kılar. Ayrıca kurulan Excel bağlantısı, söz konusu verinin Excel tarafından okunabilmesine olanak sağlar.

- Vektörleştirilen işlemlerin kullanılması ile yazılan kodların boyutunun büyük oranda azaltılmasını sağlar.
- MATLAB'ın grafik arayüz etkileşimi amaçlı kullanılan Simulink, optimize edilen çıktılar sağlamaktadır. Verinin grafik olarak ifade edilmesi bu sayede çok kolay hale gelir, kullanıcı detayları istediği gibi özelleştirebilir.

İnşaat mühendisliği, köprüler, barajlar, yollar ve diğer altyapı projeleri gibi kamu tesislerinin tasarlanması ve inşası ile ilgilenen bir mühendislik dalıdır. Halkın ihtiyaç duydukları tesisleri sağlayan en eski mühendislik alanları arasında yer almaktadır. Karayolları, demiryolları, hastaneler, elektrik ve su kaynakları, okullar ve ofisler olmadan, bir yerden diğerine seyahat etmek ve sağlık, eğitim ve bu olanaklar tarafından sağlanan diğer her şeyi almak son derece zor olabilir. Ancak bu kamu işlerini tasarlamak ve uygulamak için, gerçekten istendiği gibi çalışacaklarından ve amaçlanan amaca hizmet edeceklerinden emin olmak için test edilmeleri gerekir. Matlab'ın devreye girdiği yer burasıdır. Matlab, inşaat mühendislerinin en iyi sonuçları ürettiklerinden emin olmak için üstlenecekleri projenin modellerini ve tasarımlarını oluşturmalarına olanak tanır. Matlab'ın inşaat mühendisliğinde iki ana kullanımı.

Tasarım oluşturma: İnşaat mühendislerinin Matlab'ı kullanmalarının bir yolu, beklenen altyapılar ve tesisler için tasarımlar oluşturmaktır. Gerçek proje uygulanmadan önce beklenen projenin bir modeli oluşturulduğunda, inşaat maliyetlerinin düşürülmesine yardımcı olur. Ayrıca, tasarım gerçek projeye dönüştürülmeden önce bile doğruluk açısından test edileceğinden, mühendislerin nihai ürünün istendiği gibi çalışıp çalışmayacağını öğrenmelerini sağlar. Nihai projenin geliştirilmesinden önce oluşturulan modellere sahip olmak, insan hayatını kurtarmaya da yardımcı olabilir. Model geliştirme veya test aşamasında bir hata gözden kaçırıldığı için milyon dolarlık binaların çöktüğünü can ve mal kayıplarına neden olduğu bilinmektedir. Matlab ile, inşaat mühendisleri gerçek projeye başlamadan önce modeller oluşturup doğruluk ve etkinlik açısından test edebildikleri için hata olasılığı azalır.

Örneğin Georgia Southern Üniversitesinde Navaee ve Das tarafından yapılan çalışmada statik denge denklemleri kullanılarak statik olarak belirli bir kirişteki reaksiyonları belirlemek veya eğim-sehim yöntemini kullanarak daha karmaşık

statikçe belirsiz bir taşıyıcı sistemin analizleri MATLAB ile çözülmüştür. Bu çalışmada uygulanan prosedür, öğrencilerin eğitim sürecinde, geliştirdikleri el ile yapılan çözümlerinin doğruluğunu test etmek için MATLAB ile analizlerin yapılarak kesin çözümlerin bulunması amaçlanmıştır. Bu proje aynı zamanda öğrencilerin yapısal analiz kavramlarını daha derinlemesine anlamalarına yardımcı olur, çünkü MATLAB komut dosyalarının yazılması ile yapısal analiz bilgileri daha iyi anlaşılacaktır. Öğrenciler, bu ders için tasarlanan alıştırmaları yaparak, MATLAB'in yeteneklerini, gücünü ve yapısal analiz problemlerini çözmedeki uygulamalarını çok daha iyi anlarlar.

Kod yazma ve sayısal analiz yapma: İnşaat mühendisliğinde modeller oluşturmak, karmaşık kodlama ve karmaşık matematiksel analizler yapmayı gerektirir. Matlab ile mühendisler Simulink yazılımının yardımıyla simülasyonları için etkili kod yazabilir, varyasyonları çizebilir ve karmaşık matris denklemlerini çözebilir. İnşaat mühendisliğindeki birçok problem, Matlab olmadan çözülmesi zor olabilen ileri düzeyde matrisler içerir. İyi bir Matlab bilgisi, inşaat mühendislerinin farklı karmaşıklık seviyelerindeki mühendislik problemlerini çözmek için verimli, kompakt simülasyonlar oluşturmasına yardımcı olur (Navaee & Das, 2002).

Ulaştırma: Ulaşım ve trafik mühendisliği genellikle Excel ile yapılırken, Matlab kullanmak excelde zaman alan çoğu işlemin hazırlanmasına imkan sağlar.

Örneğin, Rothgang vd. tarafından yapılan elektrikli toplu taşıma araçlarının optimizasyonu ile ilgili bir çalışmada, geliştirilen bir Matlab/Simulink uygulaması ile bir referans otobüs güzergahı için enerji tüketimini tahmin etmek için kullanılmıştır. Hız ve yükseklik profiline ilişkin ölçüm verileri tüm güzergahlar için mevcut olmayabileceğinden, harita hizmetleri kullanılarak MATLAB yardımı ile yapay profiller oluşturulur. Doğru sürüş rotasının yanına otobüs durakları da eklenir. Gerçek zaman çizelgesine bağlı olarak bekleme süresi en az 15 s olarak ayarlanır. Maksimum şehir içi hız saatte 50 km olarak ayarlanmıştır. Ayrıca, trafik ışıklarında veya geçitlerdeki ek duraklar rastgele olarak dahil edilir. Gpx (koordinat verilerini depolamak için xml formatı) verilerine dayalı rota planlaması için Google Haritalar kullanılarak otobüs rotasının talep analizi için Matlab/Simulink aracı son derece etkili olmuştur.

Ölçme: Matlab, ölçmede ve daha spesifik olarak, kot tespiti ve ara işlemlerin yapımı ve hesaplanmasında kullanılır.

Örneğin, Herring tarafından yapılan çalışmada, GAMIT/GLOBK GPS veri analiz sistemi ile birlikte kullanılmak üzere geliştirilmiş, GPS hızlarının ve zaman serilerinin Matlab tabanlı bir grafikte etkileşimli olarak görüntülenmesine ve manipülasyonuna izin veren bir dizi Matlab aracı uygulaması yapılmıştır. Böylece çok sayıda GPS verisi ve karmaşık zaman serileri ile tektonik hız alanlarının oluşturulmasını mümkün kılmaktadır. Zaman serilerindeki komplikasyonlar genellikle depremlerden kaynaklanan kaymalar, deprem sonrası sismik geçiş davranışı ve yeraltı suyu değişikliklerinin etkileri gibi gürültü benzeri fenomenler gibi jeofiziksel etkilerle ilişkili olan parametreler etkin MATLAB araçları ile çalışmada dikkate alınmışlardır.

Su kaynakları: Matlab, barajların, insan yapımı göllerin ve diğer su kaynaklarının inşasında önemli bir unsur olan akışkanlar dinamiğini hesaplamak için uzun yıllardır kullanılmaktadır.

Matlab'ın inşaat mühendisliğinde kullanılmasının en büyük nedeni karmaşık hesaplamalar yapabilmesidir. Genellikle Matlab, C gibi çalışır ancak C'den daha gelişmiş hesaplamalar yapabilir. Ayrıca çok gelişmiş grafik ara yüzü ile tercih edilmektedir (Url-8, 2021).

Örneğin, açık kanal sistemlerini simüle etmek için kullanılacak mevcut birkaç kanal modeli vardır, ancak kontrol algoritmalarını test etmek için kapsamlı bilgisayar kodlaması ve hata ayıklaması yapılması gerekir. Öte yandan, rutin parametreleri kanal sistemine uygulamadan önce çeşitli kontrol algoritmalarını test etmek için çok kullanışlı ve kullanışlı olan kontrol sistemi geliştirme yazılımlar da mevcuttur. Kontrol endüstrisinde mevcut ve yaygın olarak kullanılan bir ürün Matlab/Simulink'tir. Kontrol mühendisliğinin çoğu, sistem kontrol parametrelerini geliştirmek için doğrusal modelleri kullanır, ancak Matlab büyük bir avantaj sağlayarak doğrusal olmayan süreçleri modellemek için programlanabilir. Bu model, 4 noktalı kapalı çözüm algoritmaları, adi diferansiyel denklem (ODE'ler) rutinleri veya istenen herhangi bir başka programlama yöntemi kullanılarak programlanabilir. Matlab çeşitli veri işleme fonksiyonları kullanarak sistem yanıtını görüntüleme yeteneğine sahiptir. Matlab, ODE'leri çözecek önceden programlanmış gelişmiş çözüm rutinine sahiptir. Ayrıca araştırmalarda ve endüstride kullanılan en son kontrol yöntemlerini kolaylıkla uygulama kabiliyetine de sahiptir (Url-8, 2021).

Geoteknik: Modelleme ve hesaplama, mühendislik sistemlerinin analizi ve tasarımının önemli bir parçası haline gelmiştir. Bu durum, temeller, toprak barajlar, tüneller, istinat duvarları ve diğer zemin-yapı sistemleri gibi "geoteknik sistemler" için de geçerli hale gelmektedir. Modelleme ve hesaplama, gerçek sistem için bir model geliştirmeyi ve daha sonra sistemin farklı koşullar altında (yani simülasyon) davranışını çözmeyi içermektedir. Bu sürecin özü, bir dizi yanıt değişkeni içindeki girdi uzayındaki ilgili değişkenlerin (hem kuvvetleri hem de sistem parametrelerini temsil eden) eşlenmesiyle gerçekleştirilen bir dizi dış uyaran (yani kuvvetler) için yanıt tahmin etmektir. Sayısal modeller geliştirmek için kullanılan temel denklemleri çözmek için matematiksel algoritmalar gereklidir. Çözüm yöntemiyle ilgili olarak, üç genel yöntem sınıfı dikkate alınır: i) Analitik yöntemler, ii) Yarı analitik yöntemler ve iii) Sayısal yöntemler. Çözüm prosedürleri daha sonra MATLAB'ın algoritmalarına rahatlıkla uygulanır. Örneğin Gayathri tarafından MATLAB ile istinat duvarlarına ilişkin bir yöntem geliştirilmiştir. İstinat duvarları genellikle zemin yüzeylerini farklı kotlarda tutmak için kullanılır. Çeşitli türleri arasında istinat duvarları, yerçekimi istinat duvarları yaygın olarak kullanılmaktadır. Stabilesi kendi ağırlığına bağlıdır. İstinat yapısı, güvenlik koşulları için kontrol edilir. Ayrıca istinat duvarının optimizasyonu da tasarımında bir diğer önemli görevdir. Burada güvenlik koşullarını, optimum maliyet ve ağırlığı dikkate alan bir yapı tasarlanmıştır. Lineer programlama tekniği açısından MATLAB, güçlü bir araç sunmaktadır. Burada istinat duvarının stabilesini analiz etmek için MATLAB'da bir algoritma geliştirilmiştir ve bu algoritma optimizasyon da yapmaktadır. MATLAB'de OPTIMTOOL kullanarak. Gerekli optimizasyonu da gerçekleştirmektedir (Url-8, 2021).

Bir başka Matlab kullanılan uyguma örneği olarak sıvılaşmaya ilişkin Soilique uygulaması gösterilebilir. Bilindiği gibi zemin sıvılaşması, depremlerin neden olduğu en önemli zemin hasarlarından biridir. Güvenlik faktörünün ve oturmaların belirlenmesi, sıvılaşmaya bağlı hasar ve tehlikeleri azaltmak için en yaygın analiz yöntemlerinden biridir. Araştırmacılar, sıvılaşmaya dayalı riskleri tespit etmek ve azaltmak için çok sayıda ampirik formül önermişlerdir ve bu yaklaşım onlarca yıldır kullanılmaktadır. Bu çalışmada ise, deterministik zemin sıvılaşma analizleri için MATLAB ile kullanıcı dostu ve etkileşimli bir program geliştirmek amaçlanmaktadır. Bu çalışmada sunulan algoritma olan soilique, formüllerle verilen parametrelerin

hesaplanması ile deterministik sıvılaşma analizi sağlayan bir grafik kullanıcı arayüzü içeren ilk MATLAB programıdır. SoiLique'in temel özellikleri, kullanımı kolay yapısı ve çeşitli deterministik sıvılaşma analizleriyle donatılmış olmasıdır. Bunlara ek olarak program, MATLAB sayesinde belirli görsel sonuçlar verilerek, kullanıcılar için sıvılaşma olgusunu anlamayı kolaylaştırır. Sonuç olarak, soiLique'in sıvılaşma ile tetiklenen oturmaların ve kısa hesaplama süresi ile SF'nin belirlenmesi açısından yararlı olduğu kanıtlanmıştır (Url-8, 2021).

Benzer şekilde sıvılaşma konusunda yapacağımız bu çalışma ile, sıvılaşma riskinin parametrik analizleri için Yapay Sinir Ağları kullanılarak sıvılaşma riskinin belirlenmesi ve buna katkısı olan etkenler belirlenecektir.



3. METODOLOJİ

İncelenen zemin sıvılaşma potansiyellerine ait verileri kullanarak oluşturulmuş veri tabanı yardımıyla bir bilgi işleme metodu olan Yapay Sinir Ağları (YSA) ile bir tahmin modeli oluşturulmuştur. Bu tahmin modeli ile zeminlerde oluşacak sıvılaşma potansiyelleri öngörülmesi hedeflenmektedir. Bu bölümde, geliştirilen YSA modelinin özellikleri tanıtılacak, modelin eğitiminde 651 farklı sıvılaşma verilerini YSA modeli ile tahmin edilecektir. Tahmin edilen sıvılaşma verileri ile sahada ölçülen sıvılaşma verileri grafik ortamında sunulacaktır.

3.1 Zemin Sıvılaşmasındaki Parametreler

Geoteknik rapor hazırlama aşamasında zeminin sıvılaşma analizi değerlendirilirken yaygın olarak kullanılan TMMOB Jeoloji Mühendisleri Odasının hazırladığı “Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği (2018) İle Uyumlu Basitleştirilmiş Zemin Sıvılaşma Potansiyeli Analizi” tablosu kullanılmaktadır. Bu tabloda sıvılaşmaya dair tüm parametreler belirtilmiş olup, analiz sonucu zeminin sıvılaşma potansiyeli değerini göstermektedir. Verilerin bazıları programa araziden elde edilen sayısal değerler olarak dışarıdan girilirken, hesap aşamasında sıvılaşma tablosunda hücrelerde önceden oluşturulmuş sıvılaşma formülasyonu neticesinde kendi hesaplamaktadır.

A. Arazi ve Laboratuvar Deneylelerinden Alınan Veriler

1. Sıra No: Sıvılaşıma analizinde verilen satır numaralarıdır.
2. Derinlik: Standart Penetrasyon Deneyleinin yapıldığı ve serbest zemin yüzeyinden ölçülen başlangıç derinliğini belirtmektedir.
3. SPT (N): Arazide her 1,5 m'de bir yapılan Standart Penetrasyon Deneylei (SPT) sonucunda elde edilen ham SPT (N) verileridir.
4. Zemin Tipi(USCS) : Malzemenin tanımıdır. Laboratuvarda yapılan testler sonucu belirlenir.
5. Zemin Tipi(TSE-EN ISO 14688-2) : Malzemenin tanımıdır. Laboratuvarda yapılan testler sonucu belirlenir.
6. Plastisite İndisi(PI): SPT derinliğinde Atterberg kıvam limitleri deneyleine bağılı olarak likit limit ve plastik limitin belirlenmesi sonucu bulunan sayısal değıerdir.
7. Kil İçeriğı (%): SPT derinliğinde alınan numunelerde yer alan kil içeriğıdir. Yüzde (%) cinsinden ifade edilir. Bu değıer laboratuvarda yapılan hidrometre deneylei sonucunda elde edilir.
8. Zeminin Tabii Birim Hacim Ağırlığı (γ_n): SPT derinliğinde bulunan zeminin doğıal birim hacim ağırlığıdır. Birimi kN/m^3 'tür.
9. Zeminin Suyu Doymun Birim Hacim Ağırlığı (γ_d) : SPT derinliğinde bulunan zeminin suya doymun birim hacim ağırlığıdır. Birimi kN/m^3 'tür.
10. İnce Dane İçeriğı (IDI) : Her bir SPT derinliğinde bulunan zeminde yer alan "ince dane içeriğıdir". Yüzde (%) cinsinden ifade edilir. İnce dane miktarı (kil+silt) laboratuvarda elek analizinden belirlenir.

B. Ham SPT Verilerinin Düzeltilmesi

11. Toplam Düşey Zemin Gerilmesi (σ_{v0}): SPT derinliğindeki düşey zemin gerilmesidir. Birimi kN/m^2 'dir.

$$\sigma_{v0} = \gamma \times h \quad (3.1)$$

12. Efektif Düşey Zemin Gerilmesi (σ'_{v0}): SPT derinliğindeki efektif düşey zemin gerilmesidir. Birimi kN/m^2 'dir.

$$\sigma'_{vo} = \sigma_{vo} - (\gamma_{su} \times YASS) \quad (3.2)$$

YASS : Yeraltı su seviyesi (m)

13. Örtü Yükü Düzeltme Katsayısı (C_N): Kohezyonsuz zeminlerde uygulanan jeolojik gerilme (derinlik) düzeltme katsayısıdır. (birimsiz).

$$C_N = 9.78 \sqrt{\frac{1}{\sigma_{vo}}} \leq 1.70 \quad (3.3)$$

14. Tij Boyu Düzeltme Katsayısı (C_R): SPT tij boyu düzeltme katsayısıdır. Yapılan hesaplamada SPT tij kılavuz borusunun yerden uzunluğu SPT yapılan seviyeye kadar olan tij uzunluğuna ilave edilmiştir. (birimsiz).

15. Numune Alıcı Tipi Düzeltme Katsayısı (C_S): SPT numune alıcı tipi düzeltme katsayısıdır. (birimsiz).

16. Sondaj Delgi Çapı Düzeltme Katsayısı (C_B): SPT sondaj delgi çapı düzeltme katsayısıdır. (birimsiz).

17. Enerji Oranı Düzeltme Katsayısı (C_E): SPT enerji oranı düzeltme katsayısıdır.

18. Düzeltilmiş SPT Darbe Sayısı ($N_{1,60}$): Düzeltilmiş SPT darbe sayısı TBDY-2018 Denklem 3.4 ve 3.5'de belirtilmiştir (birimsiz). Sıvılaşma analizlerinde her zaman $N_{1,60}$ kullanılır. N_{60} 'da C_N düzeltmesi yoktur.

$$N_{60} = N C_R C_S C_B C_E \quad (3.4)$$

$$N_{1,60} = N_{60} \cdot C_N = N C_N C_R C_S C_B C_E \quad (3.5)$$

19. İnce Dane İçeriğine Göre Düzeltilmiş SPT Darbe Sayısı ($N_{1,60f}$): İnce dane içeriğine göre düzeltilmiş SPT darbe sayısı, ince dane içeriğine göre α ve β katsayıları kullanılarak TBDY-2018 Denklem 3.6'da belirtilmiştir (birimsiz) [Youd vd., 2001].

$$N_{1,60f} = \alpha + \beta \cdot N_{1,60} \quad (3.6a)$$

$$\alpha = 0 ; \beta = 1 \quad (IDI \leq \%5)$$

$$\alpha = \exp[1.76 - (190/IDI^2)] ; \beta = 0.99 + IDI^{1.5}/1000 \quad (\%5 < IDI < \%35) \quad (3.6b)$$

$$\alpha = 5.0 ; \beta = 1.2 \quad (IDI \geq \%35) \quad (3.6c)$$

C. Sıvılaşma Direncinin Hesaplanması

20. Moment Büyüklüğü 7.5 Olan Depreme Karşı Gelen Çevrimsel Dayanım Oranı ($CRR_{M7.5}$):

Moment büyüklüğü 7.5 olan depreme karşı gelen çevrimsel dayanım oranıdır. İnce dane içeriğine göre düzeltilmiş SPT darbe sayısı TBDY Denklem 16B.4b’de belirtilmiştir (birimsiz) [Youd vd. 2001].

$$CRR_{M=7,5} = \frac{1}{34-N_{1,60f}} + \frac{N_{1,60f}}{135} + \frac{50}{(10N_{1,60f}+45)^2} - \frac{1}{200} \quad (3.7)$$

21. Tasarım Depremi Moment Büyüklüğü Düzeltme Katsayısı (C_M): Tasarım depremi moment büyüklüğü düzeltme katsayısıdır. Tasarım deprem büyüklüğüne (M_w) göre TBDY-2018 Denklem 3.8’de belirtilmiştir (birimsiz). 7.5 büyüklüğündekinden farklı büyüklükteki olası depremler için uygulanacak düzeltme faktörü için Seed ve Idriss (1971) tarafından verilen aşağıdaki eşitlik kullanılmıştır.

$$C_M = \frac{10^{2.24}}{M_w^{2.56}} \quad (3.8)$$

22. Sıvılaşma Direnci (τ_R): Zeminde oluşan sıvılaşma direncidir. TBDY-2018 Denklem 3.9 ile hesaplanacaktır. Birimi kPa ’dır.

$$\tau_R = CRR_{M7.5} \cdot C_M \cdot \sigma'_{vo} \quad (3.9)$$

C. Depremde Oluşan Kayma Gerilmesinin Hesaplanması

23. Gerilme Azaltma Katsayısı (r_d): Gerilme azaltma katsayısıdır. İncelenen derinliğe (z) bağlı olarak TBDY-2018 Denklem 3.10 ile hesaplanacaktır (birimsiz).

$$r_d = 1.0 - 0.00765 \cdot z \quad z \leq 9.15m \quad 3.10a$$

$$r_d = 1.174 - 0.0267 \cdot z \quad 9.15m < z \leq 23m \quad 3.10b$$

$$r_d = 0.744 - 0.008 \cdot z \quad 23m < z \leq 30m \quad 3.10c$$

$$r_d = 0.50 \quad z > 30m \quad 3.10d$$

24. Zeminde Depremden Kaynaklanan Ortalama Tekrarlı Kayma Gerilmesi (τ_{deprem}):

Zeminde depremden oluşan ortalama tekrarlı kayma gerilmesidir. TBDY-2018 Denklem 3.11 ile hesaplanacaktır. Birimi kPa 'dır.

$$\tau_{deprem} = 0.65 \cdot \sigma_{vo} \cdot (0.4 \cdot S_{DS}) \cdot r_d \quad (3.11)$$

S_{DS} : Kısa periyot (0.2s) tasarım spektral ivme katsayısıdır (boyutsuz). S_{DS} 'nin S 'si Spektral ivme, alt indis "D" si Design/tasarım, alt indis küçük "s" Short/kısa anlamına gelmektedir.

D. Sıvılaşma Güvenlik Koşulu

25. Sıvılaşmaya Karşı Güvenlik Koşulu (τ_R / τ_{deprem}):

Sıvılaşmaya karşı güvenlik koşulu (FS_L) TBDY-2018 Denklem 3.12 ile hesaplanacaktır. Denklem 3.12 ile verilen koşul sağlanmaz ise "Sıvılaşma Beklenir", koşul sağlanır ise "Sıvılaşma Yok" olarak ifade edilmektedir (birimsiz).

$$FS_L = \frac{\tau_R}{\tau_{deprem}} \geq 1.10$$

3.1.1 Yapay sinir ağı algoritması için sıvılaşma parametreleri

Çalışmada, 651 farklı zemin sıvılaşma verileri kullanılmıştır. Yapay sinir ağı modeli oluşturulurken Deprem manyitüdü $M_w=7,5$ alınmıştır. Diğer parametreler; hangi derinlikten numune alınıyorsa o derinlikte zeminin toplam düşey gerilme, σ_{vo} (kPa) , efektif düşey gerilme σ'_{vo} (kPa), arazide yapılan SPT deneyinden elde edilen, İnce Dane İçeriğine Göre Düzeltilmiş SPT Darbe Sayısı ($N_{1,60f}$) değerleri, arazideki sondaj kuyularından derinliğe(z) bağlı olarak gerilim azaltma katsayısı(r_d) değerleri, kısa periyot (0.2s) tasarım spektral ivme katsayısı S_{DS} değerleri (Türkiye Deprem Tehlike Haritası'ndan deprem yer hareketi düzeyi, yerel zemin sınıfı, enlem ve boylama göre hesaplanır ve AFAD Başkanlığının ((www. tdth.afad.gov.tr) web sayfasından alınır.) kullanılmıştır.

Kısacası ağ oluşturulurken girdi veri setlerimiz toplam düşey gerilme (), efektif düşey gerilme (σ'_{vo}), ince Dane İçeriğine Göre Düzeltilmiş SPT Darbe Sayısı ($N_{1,60f}$), gerilim azaltma katsayısı(r_d) ve tasarım spektral ivme katsayısı S_{DS} değerleri

iken çıktı veri setimiz sıvılaşmaya karşı güvenlik koşulu olan ($\tau_R / \tau_{\text{deprem}}$) değerleridir.

Bir zeminin sıvılaşma potansiyelleri değerlendirilirken Bölüm 3.1 de belirtilen parametreler göz önüne alınır. İlk olarak zeminin toplam gerilmesi (σ) ve efektif gerilmelerini (σ'_{vo}) dikkate aldık. Çünkü çalışma kapsamında sisteme girilen veriler Sakarya/Kocaeli/İstanbul bölgelerinden derlenmiştir ve farklı topoğrafyalar olması zemin profillerinde farklı olacağını da gösterir. Sıvılaşma olayına doğrudan etkisi olması sebebiyle girdi parametresi olarak seçilmiştir.

Sıvılaşma analizi yapılırken bir arazide en önemli olay arazide yapılan deneydir. TBDY-2018 sıvılaşma tayininde Standart penetrasyon deneyini esas alınmıştır. Bu sebeble SPT bazlı parametreleri için İnce Dane İçeriğine Göre Düzeltilmiş SPT Darbe Sayısı ($N_{1,60f}$) değerleri seçilmiştir.

Gerimelerin derinliğe bağlı olarak azaltılması için kullanılan parametre Gerilme azaltma katsayısı (R_d) diğer seçilen parametredir.

Kısa periyot tasarım spektral ivme katsayısını (S_{DS}), inceleme yapılan bölgeye özel ivme ve etki değerleri olduğu için ayrı olarak bir parametre olarak seçilmiştir.

Sahadaki zeminin sıvılaşmaya karşı kayma dayanımının depremin o sahada oluşturacağı olasılıksal kayma gerilmesine oranı olan $\tau_R / \tau_{\text{deprem}}$ de bizim çıktı verimiz olarak analizde sıvılaşma değeri olarak tanımlanmıştır.

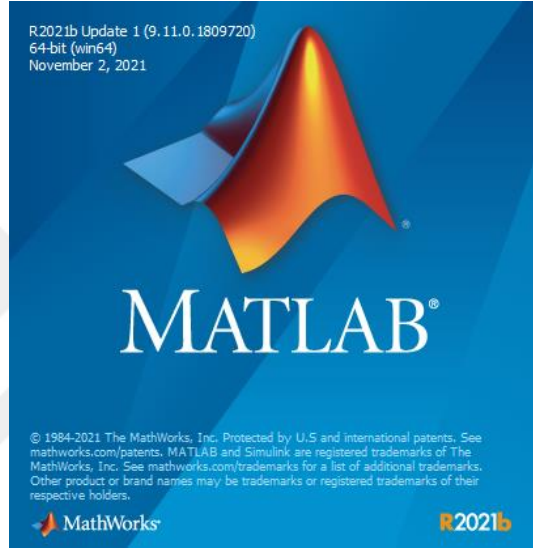
Çizelge 3.1 de Ağ modeli oluşturulurken girdi ve çıktı verilerimiz gösterilmiştir. Toplam veri setimiz 651 adettir.

Çizelge 3.1: Yapay Sinir Ağları Girdi ve Çıktı verileri

σ_{vo} (kN/m ³)	σ'_{vo} (kN/m ³)	Düzeltilmiş SPT - N değeri ($N_{1,60f}$)	r_d	S_{DS}	$\tau_R / \tau_{\text{Deprem}}$
74,4	59,7	23,8	0,97	1,326	0,648
94,1	64,7	24,4	0,95	1,326	0,588
113,7	69,6	27,7	0,94	1,326	0,680
153	79,5	31,7	0,89	1,326	1,126
76,5	61,8	13,5	0,97	1,409	0,330
99	69,6	14,4	0,95	1,409	0,311
121,5	77,4	12,6	0,94	1,409	0,253

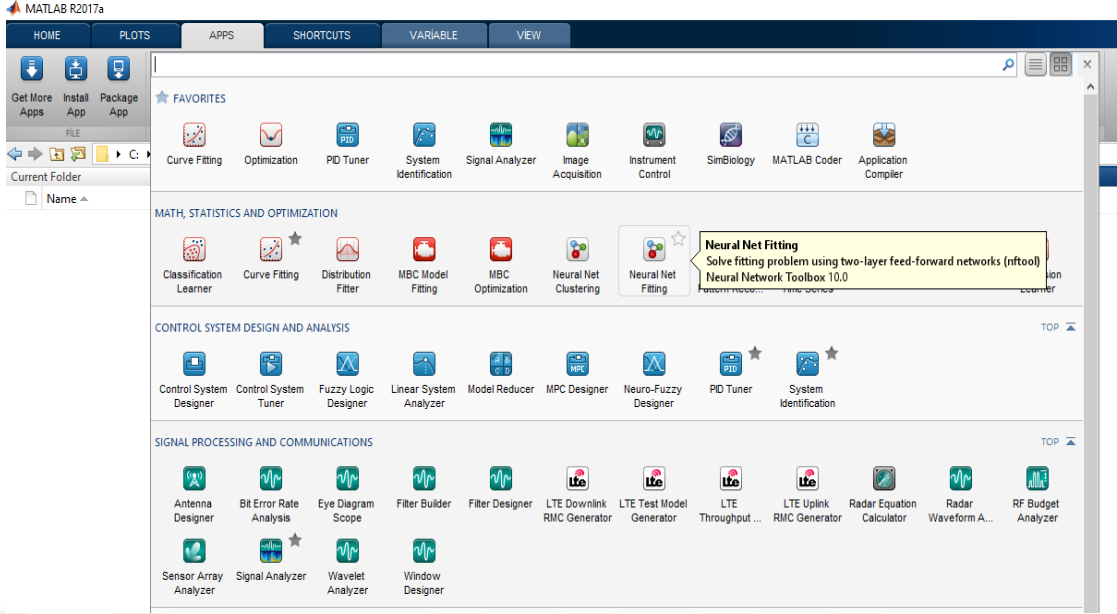
3.2 Modelin Geliştirilmesi

Zeminlerde sıvılaşma riskinin tahmin edilebilmesi için son yıllarda popüler olarak kullanılan ve doğrusal olmayan karmaşık problemlerin çözümündeki başarısıyla tanınan, insan beyin hücrelerinin öğrenme yeteneğini taklit eden Yapay Sinir Ağları (YSA) metodu kullanılmıştır. Model, bilgisayar ortamında ve MathWorks firmasına ait MATLAB isimli program ile geliştirilmiştir. MATLAB, içerisindeki metod arayüzleri ile birçok akademik çalışmada kullanılan, popüler ve bilindik bir yazılımdır.



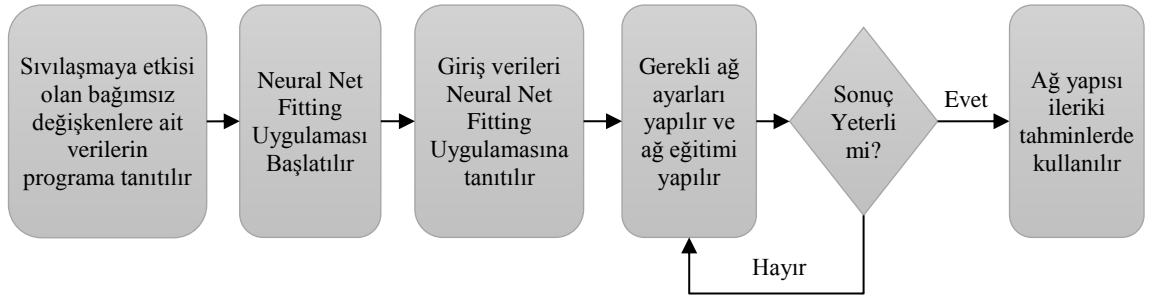
Şekil 3.2: YSA modelinin oluşturulduğu MATLAB yazılımı ve versiyon bilgileri

MATLAB yazılımı kapsamındaki arayüzlerden “Deep Learning Toolbox 14.3” grubu altında “Neural Net Fitting” isimli, iki katmanlı ileri beslemeli ağ analizi için oluşturulmuş arayüz kullanılmıştır (Şekil 3.2). Bu arayüz, sigmoid aktivasyon hücrelerinden oluşan bir gizli katman ve doğrusal hücreden oluşan bir çıkış katmanından oluşur.



Şekil 3.3: Neural Net Fitting

Bu uygulama arayüz kullanılarak yapılmış olup, uygulama esnasında herhangi bir kod kullanımı olmamıştır. Yapılan uygulamanın kod olarak ifade edildiği MATLAB çıktısı ekte verilmiştir. Arayüz işlemleri sırasında program dilinin geliştirdiği kodlar aşama aşama açıklanmaktadır. Ayrıca uygulamanın iş akışı aşağıda Şekil 3.4'te verilmiştir.



Şekil 3.4: YSA uygulaması iş akışı

Yapay Sinir Ağ modelini oluşturmaya başlarken ilk önce veri girişleri yapılır. Bu veriler önceden oluşturulmuş EXCELL dosyası içinden çekilir. Matlab uygulamasının, Workspace alanında New komutuyla veri dosyaları oluşturulur. Girdi olarak seçilen σ'_{vo} , $N_{1,60f}$, r_d , S_{DS} parametreleri 510×5 matrisi şeklinde tanımlanır. Çıktı olarak seçtiğimiz ve zeminin 1,1 eşik değerine göre sıvılaşır veya sıvılaşamaz olduğunu gösteren τ_R / τ_{deprem} parametresi ise t = çıktı olarak 510×1 matrisi şeklinde gösterilir. (Şekil 3.5).

x = Train;
t = Results;

The image displays two MATLAB workspace windows. The left window, titled 'Variables - x', shows a 510x5 double matrix 'x' with the following data (rows 1-24):

	1	2	3	4	5	6
1	74.4000	59.7000	23.8000	0.9700	1.3260	
2	94.1000	64.7000	24.4000	0.9500	1.3260	
3	113.7000	69.6000	27.7000	0.9400	1.3260	
4	153	79.5000	31.7000	0.8900	1.3260	
5	76.5000	61.8000	13.5000	0.9700	1.4090	
6	99	69.6000	14.4000	0.9500	1.4090	
7	121.5000	77.4000	12.6000	0.9400	1.4090	
8	144	85.1000	16.4000	0.9300	1.4090	
9	234	116.3000	4.2000	0.7700	1.4090	
10	256.5000	124.1000	6.1000	0.7300	1.4090	
11	279	131.9000	6	0.6900	1.4090	
12	301.5000	139.6000	6	0.6500	1.4090	
13	157.5000	54.5000	1.3000	0.8900	1.6730	
14	180	62.3000	1.2000	0.8500	1.6730	
15	202.5000	70.1000	1.2000	0.8100	1.6730	
16	225	77.9000	1.1000	0.7700	1.6730	
17	247.5000	85.6000	1.1000	0.7300	1.6730	
18	270	93.4000	1	0.6900	1.6730	
19	292.5000	101.2000	1	0.6500	1.6730	
20	51.5000	46.6000	23	0.9800	1.2680	
21	78.5000	58.8800	22	0.9700	1.2680	
22	105.5000	71.1700	23	0.9500	1.2680	
23	132.5000	83.4500	18	0.9400	1.2680	
24	159.5000	95.7400	19	0.9300	1.2680	

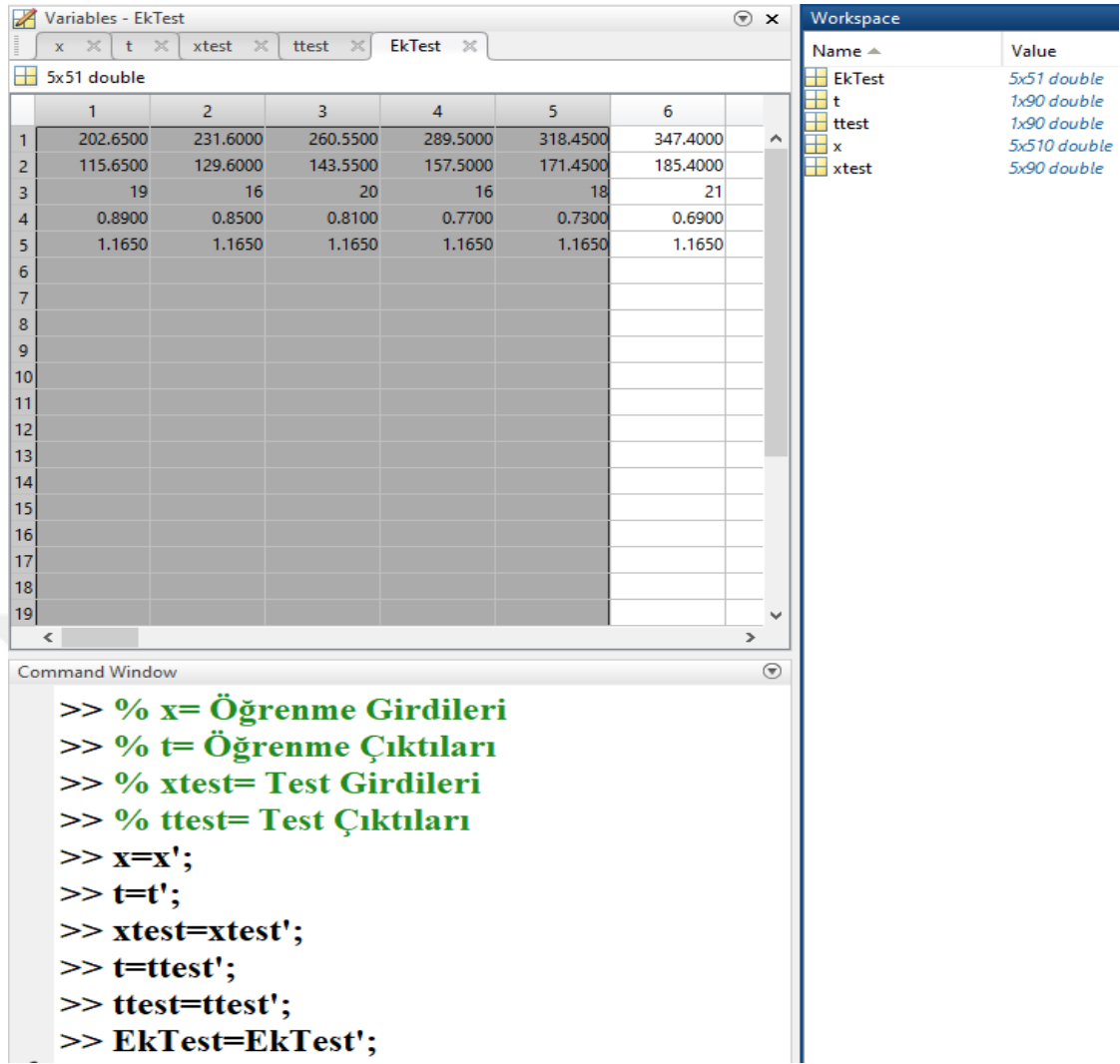
The right window, titled 'Variables - t', shows a 510x1 double matrix 't' with the following data (rows 1-24):

	1	2	3	4	5	6
1	0.6480					
2	0.5880					
3	0.6800					
4	1.1260					
5	0.3300					
6	0.3110					
7	0.2530					
8	0.3020					
9	0.1160					
10	0.1450					
11	0.1500					
12	0.1560					
13	0.0450					
14	0.0470					
15	0.0490					
16	0.0520					
17	0.0530					
18	0.0560					
19	0.0600					
20	0.7280					
21	0.5630					
22	0.5600					
23	0.3960					
24	0.3920					

Şekil 3.5: Veri dosyalarının oluşturulması

Model de 510 adet veri ağın öğrenmesinde ve 90 adet veri ağın test edilmesinde kullanılacaktır. Model belli bir doğruluk değerine ulaşip eğitimini tamamladıktan sonra ise ek test olarak girilen 51 adet girdi parametrelerinin sonuçlarının tahminini gerçekleştirecektir.

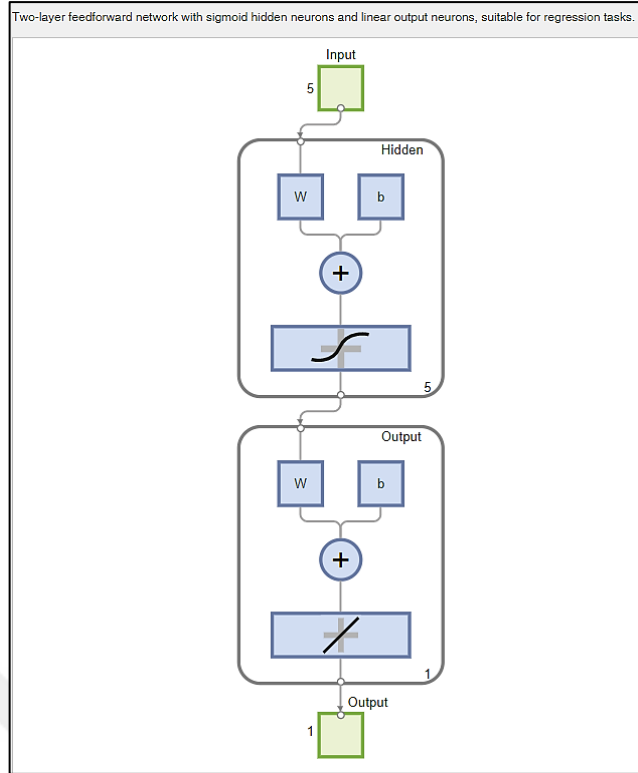
Ağ modeli arayüzde oluşturulduğu için uygulamaya her satırı girdi olarak tanımlamaktadır. Bu sebeble programın öğrenme, test etme ve ek test aşaması için sisteme girilen verilerin transpozu alınır (Şekil 3.6).



Şekil 3.6: Verilerin transpozu alınması

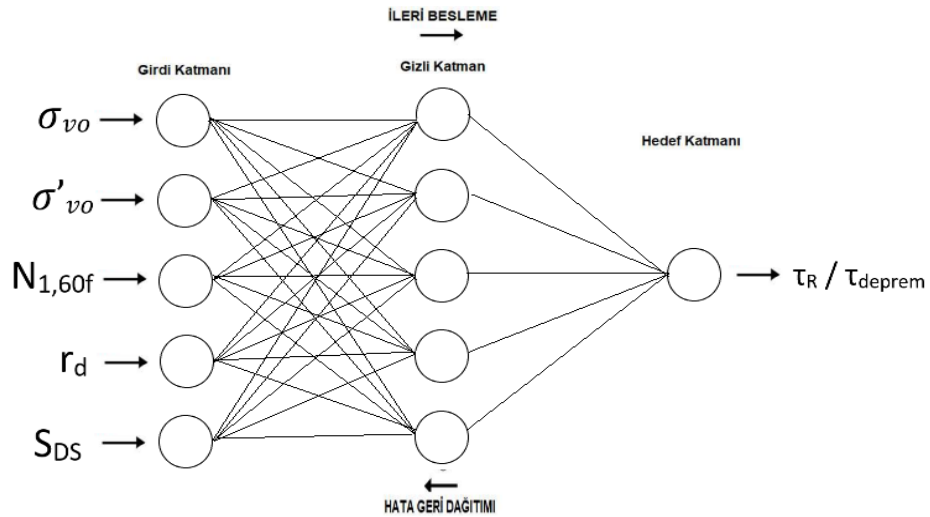
Yapay sinir ağları, insanlardaki sinir sistemindeki sinir hücrelerinin öğrenme faaliyetlerini taklit ederek öğrenme işlemi gerçekleştirirler. Her bir hücre kendinden bir önceki katmandan gelen verileri toplayarak bir aktivasyon fonksiyonu ile bir sonraki katmana aktarırlar. Katmanlar arasındaki hücrelerin bağlandığı bağlantılarda ise ağırlıklar bulunur. Bu ağırlıklar, öğrenme işleminin hafızası niteliğindedir.

Yapay sinir ağı topolojisi için giriş katmanı hariç iki katmanlı ileri beslemeli ağ (two-layer feed-forward network) yapısı kullanılmıştır (Şekil 3.7). Bu katmanlar; bir giriş katmanı, bir gizli katman, bir çıkış katmanıdır.



Şekil 3.7: Kurulan yapay sinir ağı topolojisi

Giriş katmanında beş bağımsız değişken, gizli katmanda yapılan ön denemeler sonucunda beş yapay hücre, çıkış katmanında ise sınıvlaşmayı ifade eden sonuç değeri bulunmaktadır(Şekil 3.8).



Şekil 3.8: Yapay sinir ağı modelinin şematik gösterimi

Gizli katmanda kullanılan yapay hücrelerde sigmoid fonksiyonu kullanılmıştır. Uygulamalarda en çok kullanılan bu aktivasyon fonksiyonu, ağırlıklı ortalama değerini 0-1 arasında bir değere dönüştürür. (Sigmoid Symmetric Transfer Function).

$$F(\text{Net}) = \frac{1}{1 + e^{-\text{Net}}} \quad (3.13)$$

Öğrenme algoritması için yapılan denemeler sonucunda en verimli öğrenme Levenberg-Marquardt ile sağlanmıştır. Bu algoritmada ağırlık ve sapma değerleri Levenberg-Marquardt optimizasyonuna göre olmaktadır. Levenberg-Marquardt eğitimi, diğer tekniklerden daha fazla bellek gerektirmesine rağmen, genellikle en hızlı eğitim algoritmasıdır. Matlab kod çıktısında

“trainFcn = 'trainlm';” olarak gösterilir.

Yapay sinir ağlarının giriş verilerini doğru bir şekilde algılanabilmesi için belirli bir ölçekte normalize etmesi gerekmektedir. MATLAB bu normalizasyon işlemini kendi içerisindeki *mapminmax* fonksiyonu ile sağlamaktadır. Bu fonksiyonun aşağıdaki eşitlik ile veri setini -1 ile +1 aralığında normalize eder.

$$y = (y_{\max} - y_{\min}) * \frac{x - x_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}} + y_{\min} \quad (3.14)$$

Bu eşitlikte y_{\max} ve y_{\min} ölçek sınırlarını temsil eden +1 ve -1'dir. x , normalize olacak değer, x_{\max} veri setindeki en yüksek değer, x_{\min} veri setindeki minimum değeri temsil etmektedir.

Matlab kod çıktısında

“ net.input.processFcns = {'removeconstantrows','mapminmax'};

net.output.processFcns = {'removeconstantrows','mapminmax'};” olarak gösterilir.

Öğrenme performansının ölçülmesi için Ortalama Kare Hatası (Mean Squared Error, MSE) kullanılmıştır ve sonuçlar buna göre raporlanmıştır. Matlab kod çıktısında

“net.performFcn = 'mse';” olarak gösterilir.

Toplanan 651 adet veri, çeşitli kombinasyonlarda öğrenme, test etme ve ek test olarak kullanılmıştır. Optimum performans; 600 veri adedinin 510 tanesi (%85) öğrenmede, 90 tanesi (%15) test edilmesinde kullanılmıştır. Son olarak ta 51 verinin de ek test aşamasında kullanılması ile elde edilmiştir. Modeli özetleyen veriler Şekil 3.9'te verilmiştir.

Matlab kod çıktısında

```
“net.divideFcn = 'dividerand';
```

```
net.divideMode = 'sample';
```

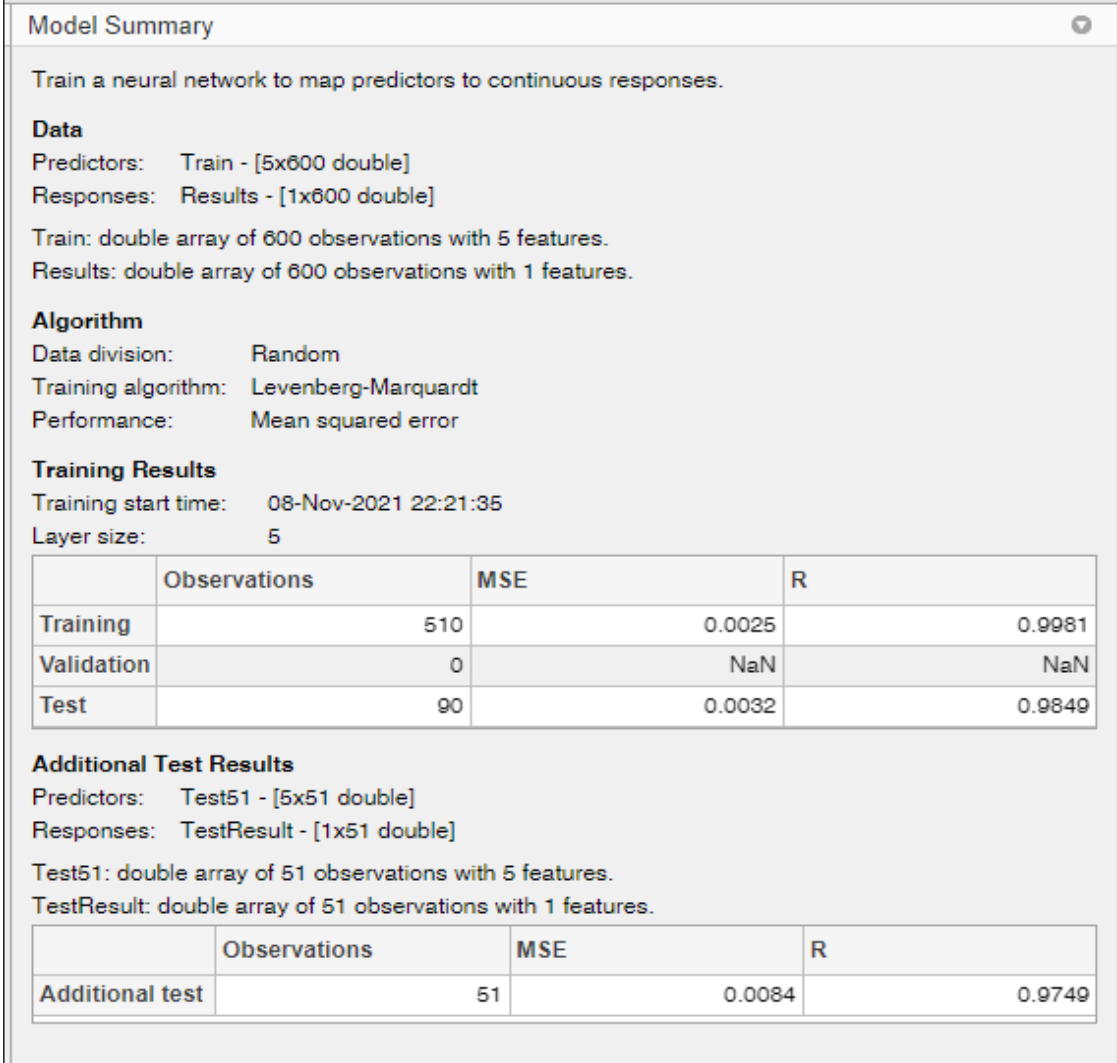
```
net.divideParam.trainRatio = 85/100;
```

```
net.divideParam.testRatio = 15/100;” olarak gösterilir.
```

Model; girdi katmanı (input layer), 5 adet nörondan oluşan gizli katman (hidden layer) ile çıktı katmanından (output layer) oluşmaktadır. Modelin en iyi sonucu verecek şekilde gizli katman sayısı belirlenir. 5 gizli katmanı belirlerken dikkat edilen husus minimum parametre sayısında olmasıdır. Matlab kod çıktısında

```
“hiddenLayerSize = 5;
```

```
net = fitnet(hiddenLayerSize,trainFcn);” olarak gösterilir.
```



Model Summary

Train a neural network to map predictors to continuous responses.

Data
Predictors: Train - [5x600 double]
Responses: Results - [1x600 double]
Train: double array of 600 observations with 5 features.
Results: double array of 600 observations with 1 features.

Algorithm
Data division: Random
Training algorithm: Levenberg-Marquardt
Performance: Mean squared error

Training Results
Training start time: 08-Nov-2021 22:21:35
Layer size: 5

	Observations	MSE	R
Training	510	0.0025	0.9981
Validation	0	NaN	NaN
Test	90	0.0032	0.9849

Additional Test Results
Predictors: Test51 - [5x51 double]
Responses: TestResult - [1x51 double]
Test51: double array of 51 observations with 5 features.
TestResult: double array of 51 observations with 1 features.

	Observations	MSE	R
Additional test	51	0.0084	0.9749

Şekil 3.9: YSA için kullanılan verilerin dağılımı

Yapay sinir ağlarına ait öğrenme algoritması her çalıştırıldığında farklı ve rastgele başlangıç değerler ile bağladığı için, doğru öğrenme elde edilene kadar denemeler yapılır. Bu çalışmada yaklaşık 100 deneme yapılarak öğrenme performansı istenilen düzeyde elde edilmiştir. Her bir denemede 1000 kere tekrar ederek analiz kendini sonlandırmıştır. Programın optimizasyon değerini sağlayıp sağlamadığını kullanıcı kendi belirlemektedir.

Ağ tasarlanıp eğitime başladığında bu eğitimin ne zaman biteceği önemli bir konudur.

Burada eğitimin nasıl biteceğini, ağa önceden tanımladığımızda durdurma kriterlerine göre belirli itersyonlar yaparak sonlandırır. Bunun için belirli bir iterasyon sayısına göre, belirli bir süreye göre ya da hedeflenen doğruluğu elde edince program eğitimi sonlandırır.

Öğrenme ağına ait eğitim sonucu aşağıda Şekil 3.10'te gösterilmiştir.

Training Results			
Training finished: Reached maximum number of epochs ✓			
Training Progress			
Unit	Initial Value	Stopped Value	Target Value
Epoch	0	1000	1000
Elapsed Time	-	00:00:05	-
Performance	755	0.00247	0
Gradient	944	1.69e-06	1e-07
Mu	0.001	1e-08	1e+10
Validation Checks	0	0	6

Şekil 3.10: Yapay sinir ağları MATLAB eğitim sonuçları

3.3 Başarı Oranı Hesaplaması

Ağın eğitimi yapılan denemeler sonucunda istenilen performansta tamamlanmıştır. Ağ eğitiminin performansının ölçülmesi için genellikle MATLAB, Mean Square Error (MSE) yöntemini kullanır. MSE, aşağıdaki denklem ile hesaplanır (Mehr vd., 2015)

$$MSE = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i^{göz.} - x_i^{tah.})^2}{n} \quad (3.15)$$

Bu denklemde;

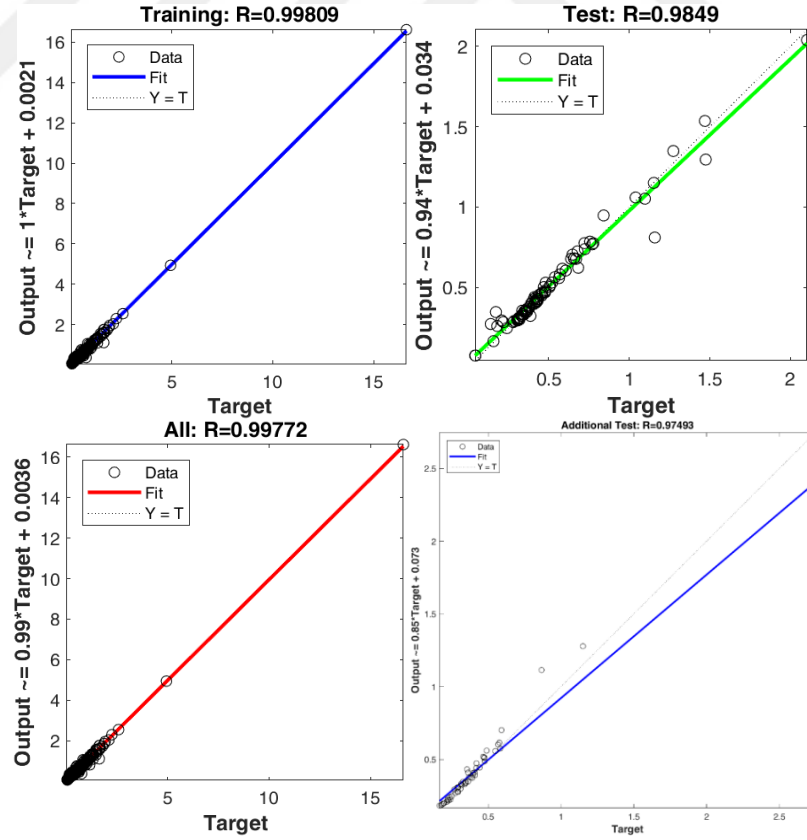
- n, toplam veri sayısını
- $x_i^{göz.}$, i. verinin gözlem değeri
- $x_i^{tah.}$, i. verinin tahmin değerini

temsil etmektedir.

Ayrıca yapılan analiz neticesinde Regresyon R-Değeri de hesaplanmıştır. Bu hesaplama aşağıdaki denkleme göre yapılmaktadır (Mehr vd., 2015).

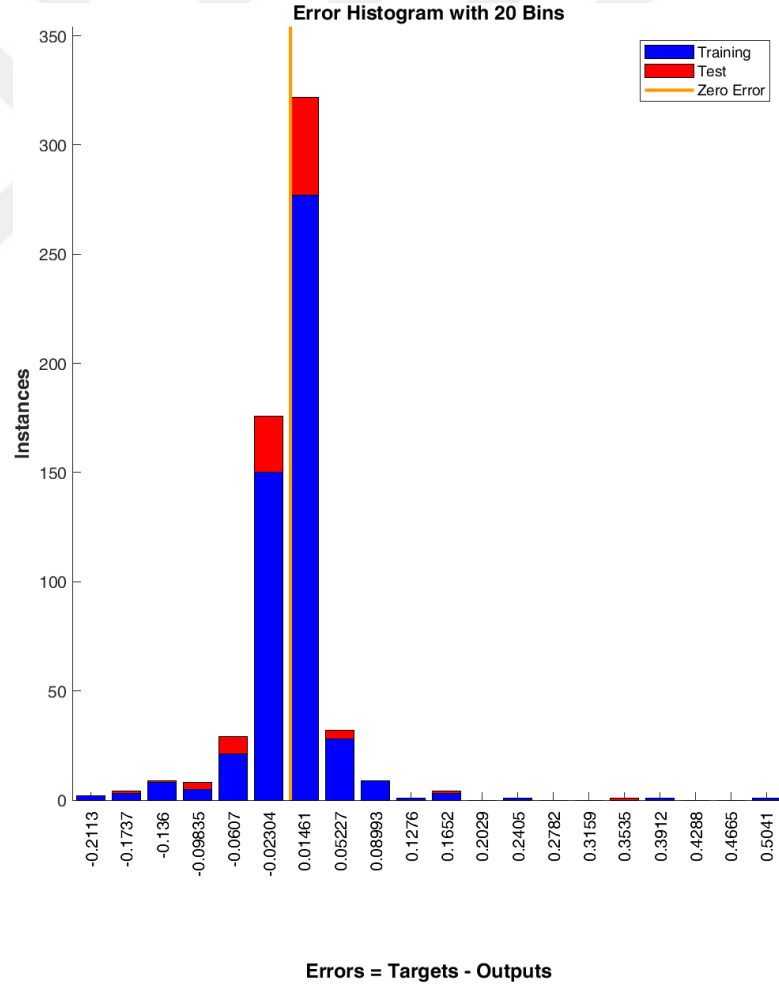
$$R = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n ((x_i^{göz.} - x_{ort}^{göz.})(x_i^{tah.} - x_{ort}^{tah.}))^2}{\sum_{i=1}^n (x_i^{göz.} - x_{ort}^{göz.})^2 \sum_{i=1}^n (x_i^{tah.} - x_{ort}^{tah.})^2}} \quad (3.16)$$

MATLAB ile yapılan YSA analizi sonucunda regresyon çıktıları aşağıda verilmiştir. Regresyon grafiği, eğitim, doğrulama ve test kümeleri için yanıtlara (hedef) göre ağ tahminlerini (çıkıtısını) görüntüler.



Şekil 3.11: YSA Regresyon grafikleri

Mükemmel bir uyum için veriler, ağ çıktılarının yanıtlara eşit olduğu 45 derecelik bir çizgi boyunca düşmelidir. Ağ performansının ek doğrulamasını elde etmek için hata histogramı aşağıda şekil 3.12’de verilmiştir. Burada mavi çubuklar eğitim verilerini kırmızı çubuklar test verilerini temsil eder. Histogram, uyumun verilerin çoğundan önemli ölçüde daha kötü olduğu veri noktaları olan aykırı değerlerin bir göstergesini sağlar. Verilerin zayıf olup olmadığını veya bu veri noktalarının veri kümesinin geri kalanından farklı olup olmadığını belirlemek için aykırı değerleri kontrol edilmesi gerekir. Aykırı değerler geçerliyse ancak verilerin geri kalanından farklıysa, ağ bu noktalar için tahmin yapıyor demektir. Böyle durumlarda aykırı noktalara benzeyen daha fazla veri toplanmalı ve ağı yeniden eğitilmelidir. Herbir grafiği gösteren kod dizilimi, matlab kod çıktısında “net.plotFcns = {'plotperform', 'plottrainstate', 'ploterrhist', 'plotregression', 'plotfit'};” olarak gösterilir.



Şekil 3.12: YSA Hata histogramı

3.4 Oranların Grafiklerle Karşılaştırılması

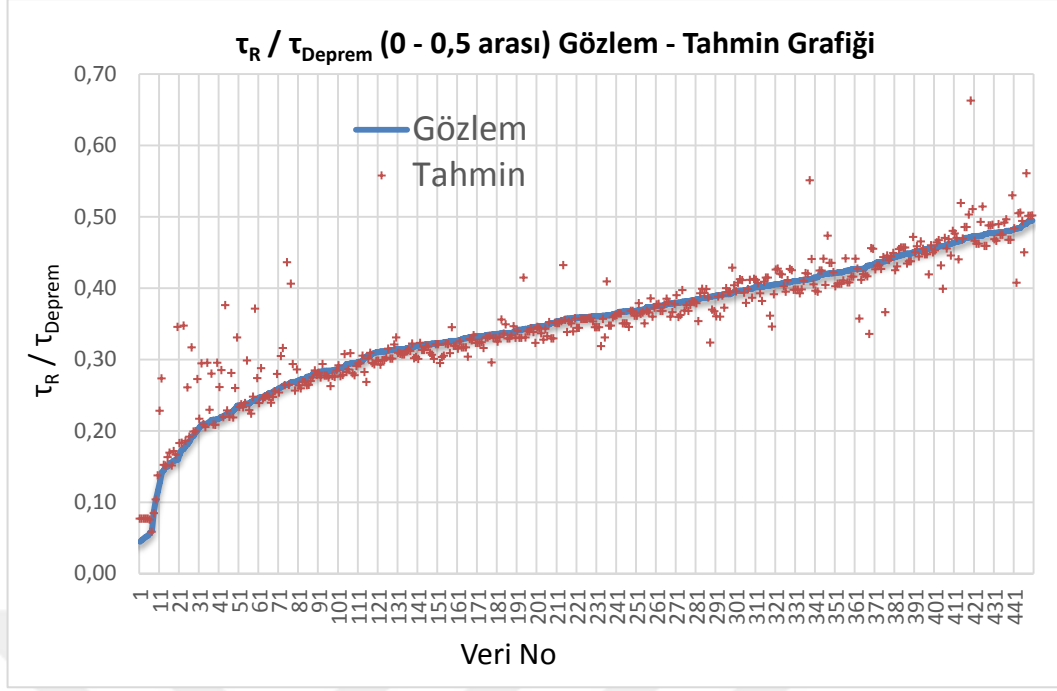
Eğitilen ağ yapısı ile tahmin edilen sonuçlar ve arazide deneyler neticesinde gözlem yapılmış sonuçlar arasında farklı açılardan değerlendirmek mümkündür. Zeminin sıvılaşmaya karşı güvenlik koşulu değerini belirten $\tau_R / \tau_{\text{Deprem}}$ parametresinin sahada ki gözlem değerleri ve YSA geliştirilen modelin tahmin değerlerinin karşılaştırılması, YSA modelinde girdi parametrelerimiz olan toplam düşey gerilme (σ_{vo}), efektif düşey gerilme (σ'_{vo}), ince Dane İçeriğine Göre Düzeltilmiş SPT Darbe Sayısı ($N_{1,60f}$), gerilim azaltma katsayısı (r_d) ve tasarım spektral ivme katsayısı S_{DS} değerleri ile zeminin sıvılaşmaya karşı güvenlik koşulu değerini belirten $\tau_R / \tau_{\text{Deprem}}$ tahmin sonuçları arasında ki ilişkiden bahsedilecektir.

3.4.1 $\tau_R / \tau_{\text{Deprem}}$ değerlerinin karşılaştırılması

Bu çalışmada YSA ile eğitilen ağ yapısı ile tahmin edilen değerler, gözlem değerleri ile kıyaslanmıştır. Tek bir tablo ile bütün verilerin kıyaslanması yerine, sıvılaşma oranı belirli aralıklara bölünmüş ve tahmin performansları MATLAB programından bağımsız olarak hesaplanmıştır ve alt başlıklar halinde verilmiştir. Bütün veri seti ve tahmin değerleri ekte verilmiştir.

3.4.1.1 $\tau_R / \tau_{\text{Deprem}}$ değeri; 0 – 0,5 arasındaki gözlemlerin tahminleri

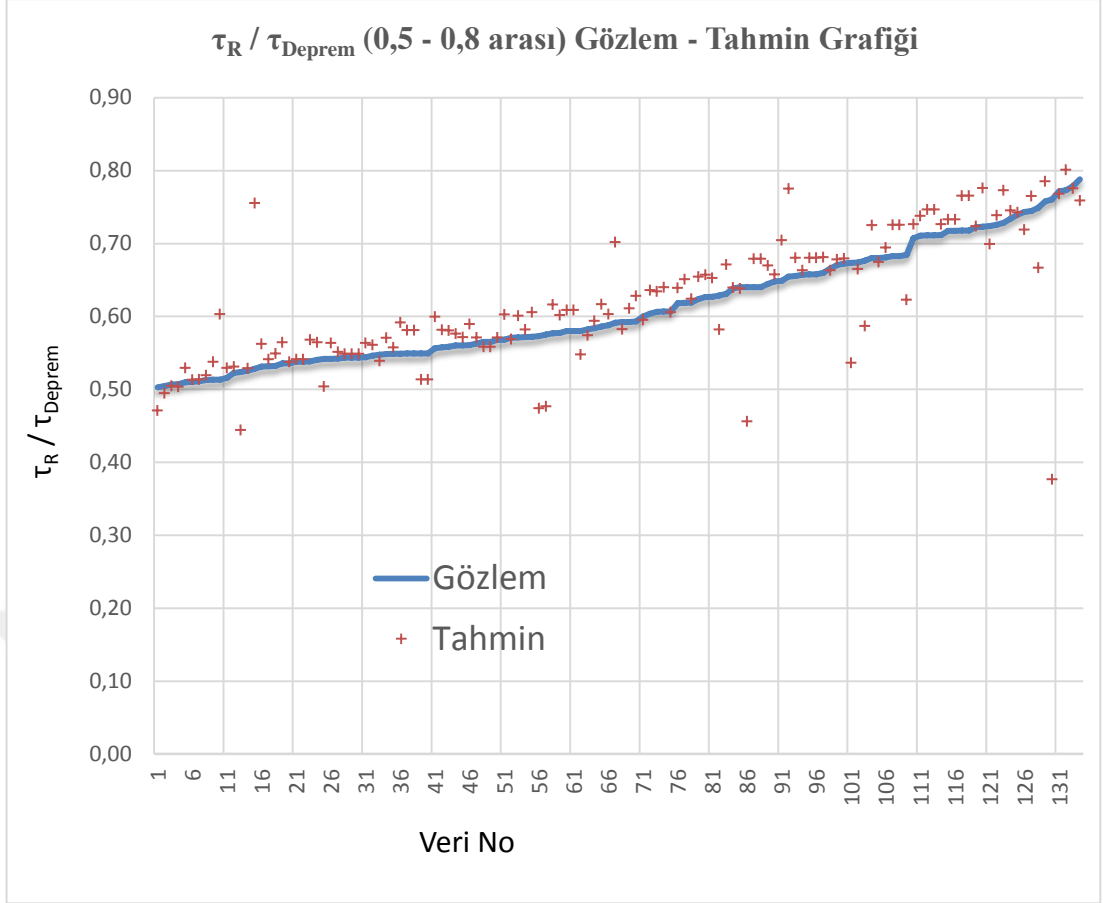
$\tau_R / \tau_{\text{Deprem}}$ değeri 0 ile 0,5 arasında olan tam 450 gözlem verisi vardır. Bu verilerin gözlem – tahmin grafiği aşağıda verilmiştir. 450 veri için korelasyon katsayısı R: 0.9380 olmuş olup, MSE: 0.0010 olmuştur.



Şekil 3.13: $\tau_R / \tau_{\text{Deprem}}$ değeri 0 – 0,5 arasındaki gözlemlerin tahminleri
 Grafiğe göre mavi hat gözlemlenen gerçek değerler olmakla birlikte kırmızı noktalar tahmin edilen değerler olmuştur.

3.4.1.2 $\tau_R / \tau_{\text{Deprem}}$ değeri; 0,5 – 0,8 arasındaki gözlemlerin tahminleri

$\tau_R / \tau_{\text{Deprem}}$ değeri 0,5 ile 0,8 arasında olan tam 134 gözlem verisi vardır. Bu verilerin gözlem – tahmin grafiği aşağıda verilmiştir. 134 veri için korelasyon katsayısı R: 0.7859 olmuş olup, MSE: 0.0030 olmuştur.

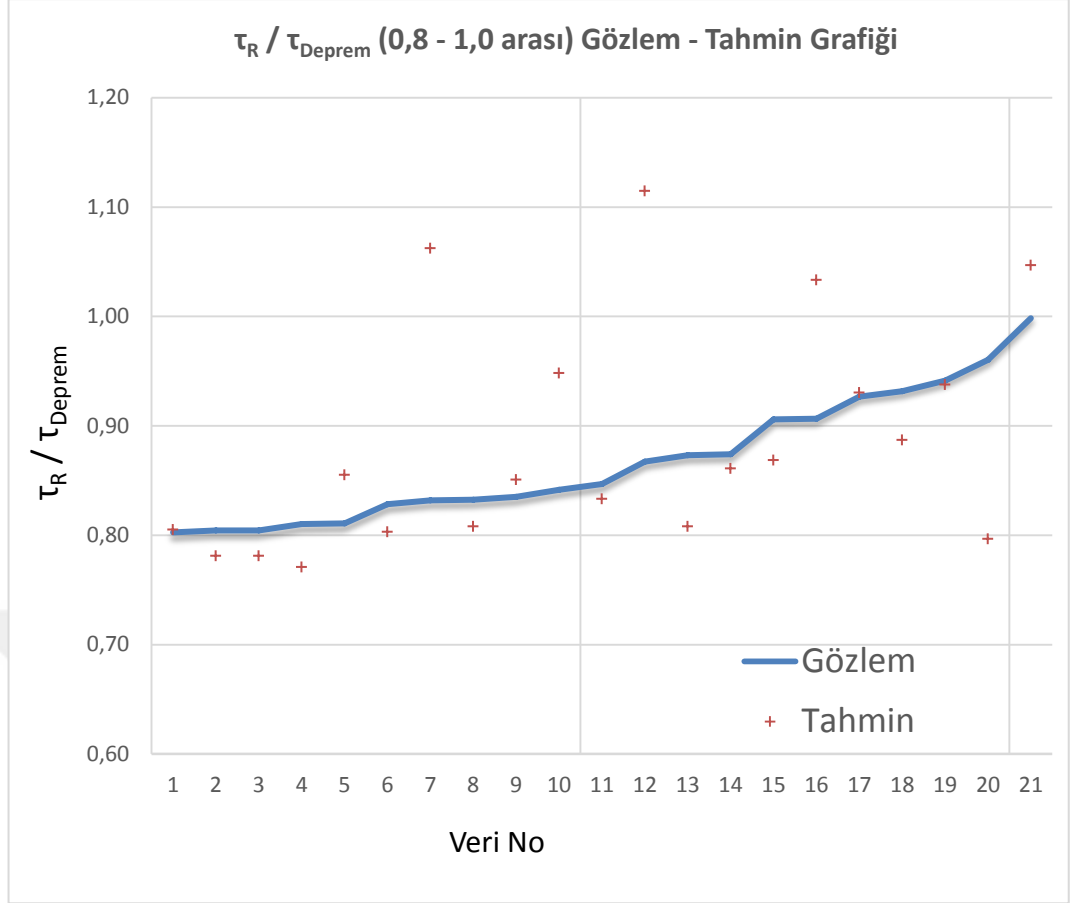


Şekil 3.14: $\tau_R / \tau_{\text{Deprem}}$ değeri 0,5 – 0,8 arasındaki gözlemlerin tahminleri

Grafiğe göre mavi hat gözlemlenen gerçek değerler olmakla birlikte kırmızı noktalar tahmin edilen değerler olmuştur.

3.4.1.3 $\tau_R / \tau_{\text{Deprem}}$ değeri 0,8 – 1,0 arasındaki gözlemlerin tahminleri

$\tau_R / \tau_{\text{Deprem}}$ değeri 0,8 ile 1,0 arasında olan tam 21 gözlem verisi vardır. Bu verilerin gözlem – tahmin grafiği aşağıda verilmiştir. 21 veri için korelasyon katsayısı R: 0.4256 olmuş olup, MSE: 0.0088 olmuştur.

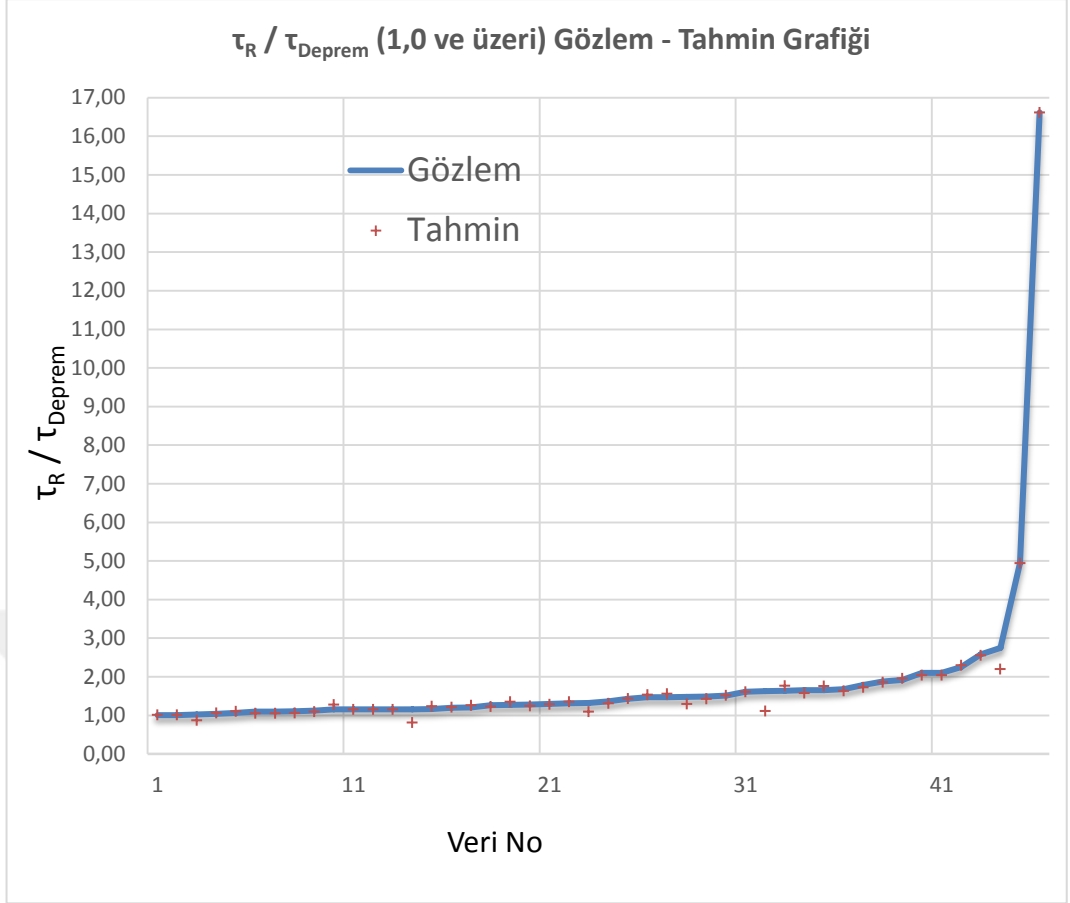


Şekil 3.15: $\tau_R / \tau_{\text{Deprem}}$ değeri 0,5 – 1,0 arasındaki gözlemlerin tahminleri

Grafiğe göre mavi hat gözlemlenen gerçek değerler olmakla birlikte kırmızı noktalar tahmin edilen değerler olmuştur.

3.4.1.4 $\tau_R / \tau_{\text{Deprem}}$ değeri; 1,0 ve üzeri gözlemlerin tahminleri

$\tau_R / \tau_{\text{Deprem}}$ değeri 1,0 üzeri olan tam 46 gözlem verisi vardır. Bu verilerin gözlem – tahmin grafiği aşağıda verilmiştir. 46 veri için korelasyon katsayısı R: 0.9982 olmuş olup, MSE: 0.0201 olmuştur.



Şekil 3.16: $\tau_R / \tau_{\text{Deprem}}$ değeri 1,0 ve üzeri gözlemlerin tahminleri

Grafiğe göre mavi hat gözlemlenen gerçek değerler olmakla birlikte kırmızı noktalar tahmin edilen değerler olmuştur.

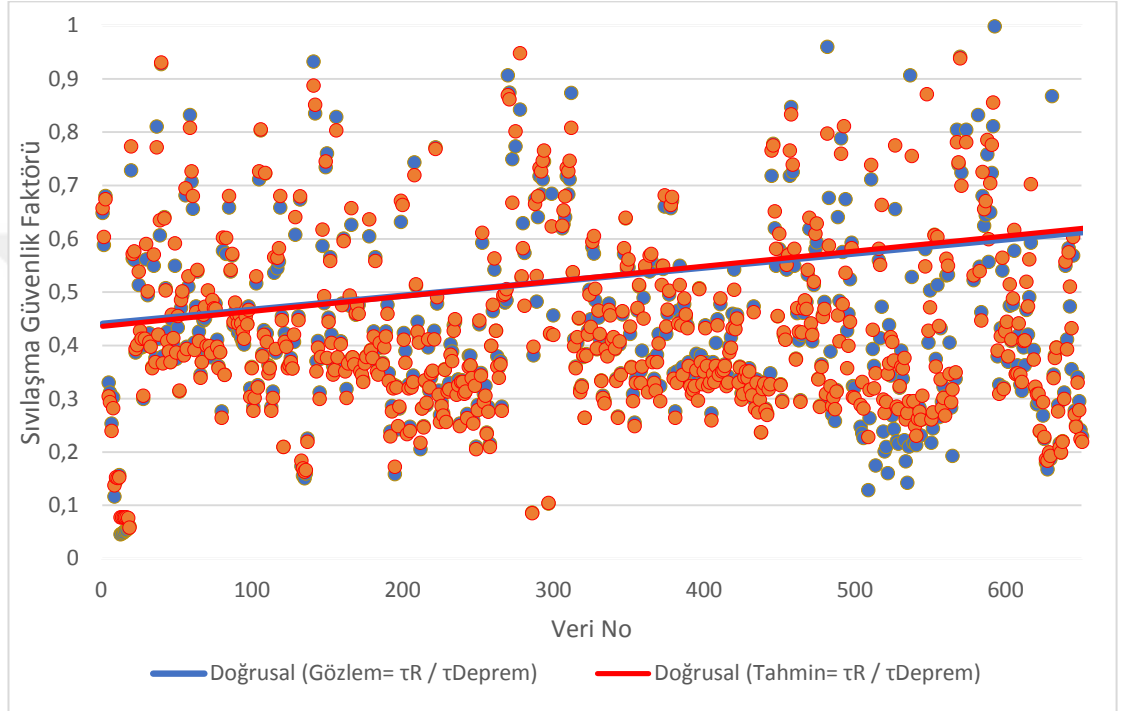
3.4.2 Girdi parametleri ile $\tau_R / \tau_{\text{Deprem}}$ karşılaştırılması

Bu bölümde YSA modelinde girdi parametrelerimiz olan toplam düşey gerilme (σ_{vo}), efektif düşey gerilme (σ'_{vo}), ince dane içeriğine göre düzeltilmiş SPT darbe sayısı ($N_{1,60f}$), gerilim azaltma katsayısı (r_d) ve tasarım spektral ivme katsayısı S_{DS} değerleri ile zeminin sıvılaşmaya karşı güvenlik koşulu değerini belirten $\tau_R / \tau_{\text{Deprem}}$ grafiksel olarak karşılaştırılmıştır.

Grafikte 651 gözlem verisi ile Sıvılaşma güvenlik faktörü olan $\tau_R / \tau_{\text{Deprem}}$ arasındaki ilişki gösterilmiştir. Arazide yapılan deneysel sonuçlar ışığında zeminin gözlemsel sonuçları ile YSA modelinin geliştirdiği tahmin sonuçları aşağıda ki Şekil 3.17 de belirtilmiştir. Gözlem sonuçları mavi renkte noktasal olarak belirtilirken aynı şekilde kırmızı renkte olanlar ise tahmin sonuçlarını göstermektedir. Noktasal olarak

belirtilen veri koordinatlarının gözlem ve tahmin sonuçlarının elde edilmesi neticesinde doğrusal olarak iki farklı fonksiyon doğrusu oluşturulmuştur.

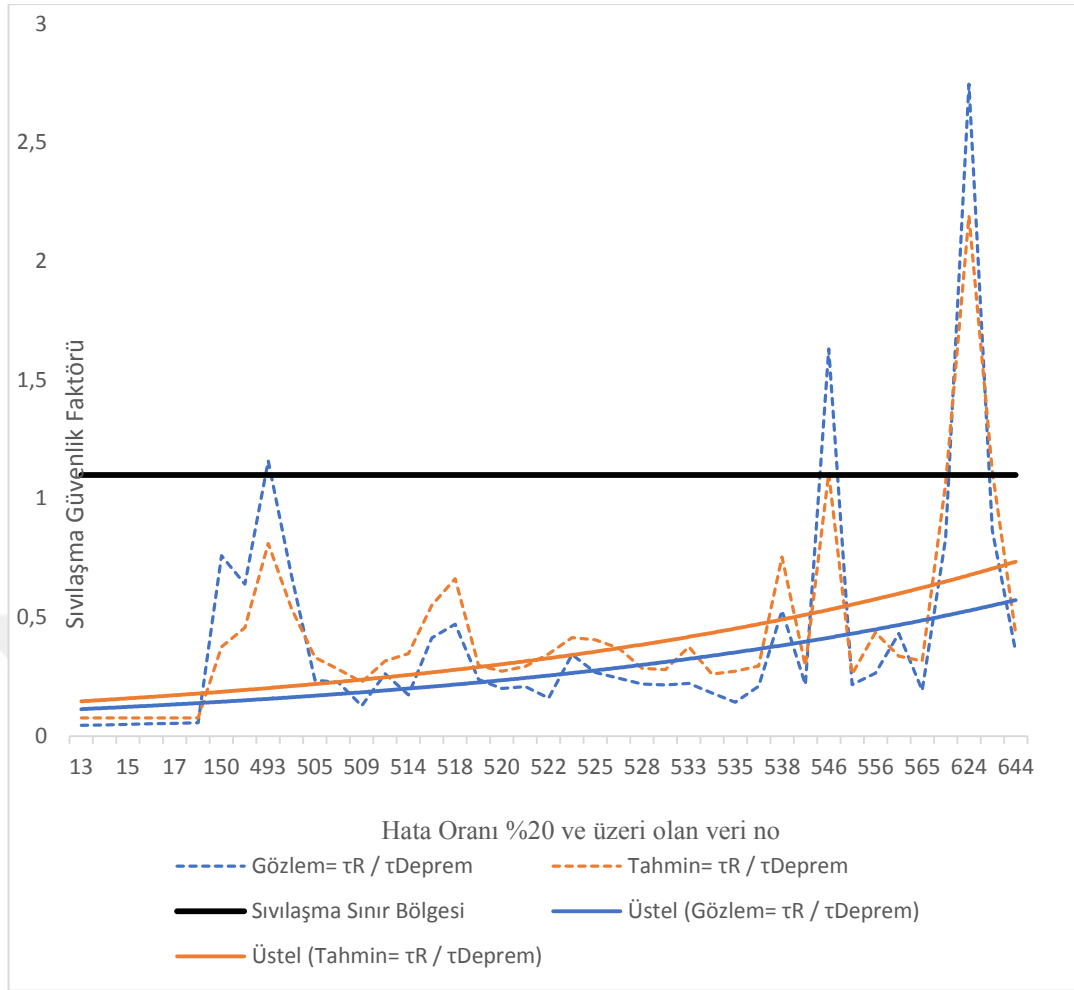
Grafikte de görüldüğü gibi 1 numaralı veri setinin bulunduğu bölgede gözlem doğrusu, tahmin doğrusunun üzerinde iken son veri seti olan 651 numaralı bölgede tersi bir durum gerçekleşmiştir. Gözlem ve tahmin doğrularının 300 numaralı veri bölgesinde kesiştiği gözlenmektedir.



Şekil 3.17: 651 veri ile Sıvılaşma güvenlik faktörü olan arasındaki ilişki

Şekil 3.18 de ki grafikte arazideki gözlem sonucu ile YSA modelinde tahmin edilen sonuçlara ait sıvılaşma güvenlik faktörü olan τ_R / τ_{Deprem} ile parametre verileri arasındaki ilişki gösterilmiştir. 651 veri grubu içinde hata oranları %20 ve üzerisine ait veriler esas alınarak grafik oluşturulmuştur. Çizelge 3.2 belirtilmiştir.

Gözlem sonuçları mavi renkte noktasal olarak belirtilirken aynı şekilde kırmızı renkte olanlar ise tahmin sonuçlarını göstermektedir. Noktasal olarak belirtilen veri koordinatlarının gözlem ve tahmin sonuçlarının elde edilmesi neticesinde üstel olarak iki farklı fonksiyon eğrileri oluşturulmuştur. Model tahmin analizi sonucunda tahmin eğrisi, gözlem eğrisinin üzerinde kaldığı ve 1.1 olan sıvılaşma güvenlik faktörü değerine yaklaştığı gözlemlenmiştir.



Şekil 3.18: Hata Oranı %20 ve üzeri olan veriler ile Sıvılaşma güvenlik faktörü olan arasındaki ilişki

Çizelge 3.2: hata oranları %20 ve üzerisine ait veriler

GK Sırası	Veri Sırası	Gözlem= $\tau R / \tau_{Deprem}$	Tahmin= $\tau R / \tau_{Deprem}$	Göz. - Tah.	hata oranı
1	13	0.045	0.077	-0.03	-71.111
2	14	0.047	0.077	-0.03	-63.830
3	15	0.049	0.077	-0.028	-57.143
4	16	0.052	0.077	-0.025	-48.077
5	17	0.053	0.077	-0.023	-43.396
6	18	0.056	0.076	-0.019	-33.929
580	150	0.76	0.376	0.384	50.526
536	489	0.64	0.456	0.184	28.750
619	493	1.159	0.811	0.348	30.026
551	494	0.674	0.536	0.137	20.326
50	505	0.235	0.331	-0.095	-40.426

Çizelge 3.2: hata oranları %20 ve üzerisine ait veriler

GK Sırası	Veri Sırası	Gözlem= $\tau R / \tau_{Deprem}$	Tahmin= $\tau R / \tau_{Deprem}$	Göz. - Tah.	hata oranı
47	506	0.226	0.281	-0.055	-24.336
11	509	0.128	0.228	-0.1	-78.125
73	510	0.263	0.316	-0.053	-20.152
23	514	0.174	0.347	-0.173	-99.425
338	517	0.413	0.551	-0.138	-33.414
419	518	0.472	0.663	-0.191	-40.466
55	519	0.238	0.298	-0.06	-25.210
30	520	0.201	0.273	-0.071	-35.323
32	521	0.209	0.294	-0.086	-41.148
20	522	0.16	0.346	-0.186	-116.250
194	524	0.343	0.415	-0.072	-20.991
77	525	0.268	0.406	-0.138	-51.493
59	526	0.243	0.371	-0.128	-52.675
42	528	0.22	0.285	-0.065	-29.545
37	529	0.215	0.28	-0.065	-30.233
44	533	0.222	0.376	-0.154	-69.369
25	534	0.182	0.261	-0.079	-43.407
12	535	0.142	0.273	-0.132	-92.958
35	536	0.21	0.295	-0.085	-40.476
465	538	0.528	0.755	-0.227	-42.992
40	539	0.217	0.295	-0.079	-36.406
637	546	1.631	1.108	0.52	32.066
41	551	0.217	0.261	-0.044	-20.276
75	556	0.265	0.436	-0.172	-64.906
368	557	0.432	0.336	0.096	22.222
27	565	0.192	0.317	-0.125	-65.104
591	582	0.832	1.062	-0.23	-27.644
649	624	2.746	2.192	0.553	20.138
596	631	0.867	1.115	-0.247	-28.489
214	644	0.355	0.432	-0.077	-21.690

3.4.3 Analiz sonucu zeminin sınıflama durumunu değiştiren kritik veriler

YSA modelini analizi sonucunda 651 veri içinden 6 veri grubunda zeminin sınıflaşılabirlik potansiyelinde farklılıklar gözlenmiştir. Araziye gözlem sonucu 4 verinin sınıflaşılabir durumda ve 2 verinin de sınıflaşamayan zemin durumunda olduğu

gözlemlenirken YSA modeli analizi sonucunda tahmin edilen sonuçlarda tersi durum olduğu saptanmıştır.

Çizelge 3.3: Kritik 6 veri grubu

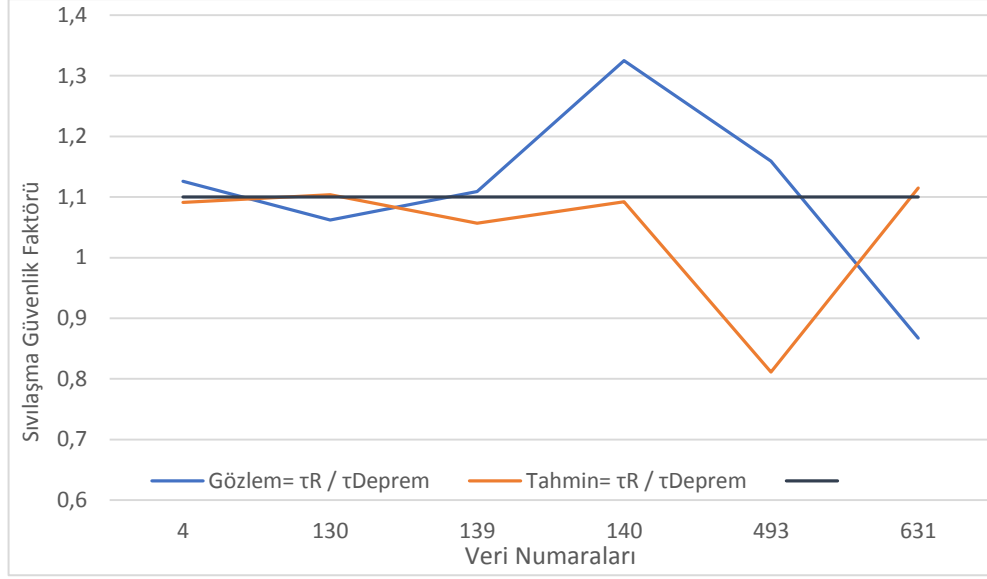
GK Sırası	Veri Sırası	Gözlem= $\tau R / \tau \text{Deprem}$	Tahmin= $\tau R / \tau \text{Deprem}$	hata oranı
614	4	1.126	1.091	3.108
610	130	1.062	1.104	-3.861
613	139	1.109	1.057	4.779
628	140	1.325	1.092	17.509
619	493	1.159	0.811	30.026
596	631	0.867	1.115	-28.489

6 veri grubu 651 veri grubunda yaklaşık %0,92 hata oranını ifade etmektedir. YSA modeli oluşturulurken analiz sonucunda %15-20 aralığın da bir hata payını göz önüne alacak olursak %0,92 olan bu değer programın hassas sonuçlar verdiğini göstermektedir.



Şekil 3.19: Kritik veri dairesel gösterimi

TBDY 2018’de zeminin sıvılaşma potansiyeli için güvenlik koşulu 1.1’dir. Aşağıda şekil 3.20 da 6 veriye ait gözlem ve tahmin sonuçları grafikte gösterilmiştir.

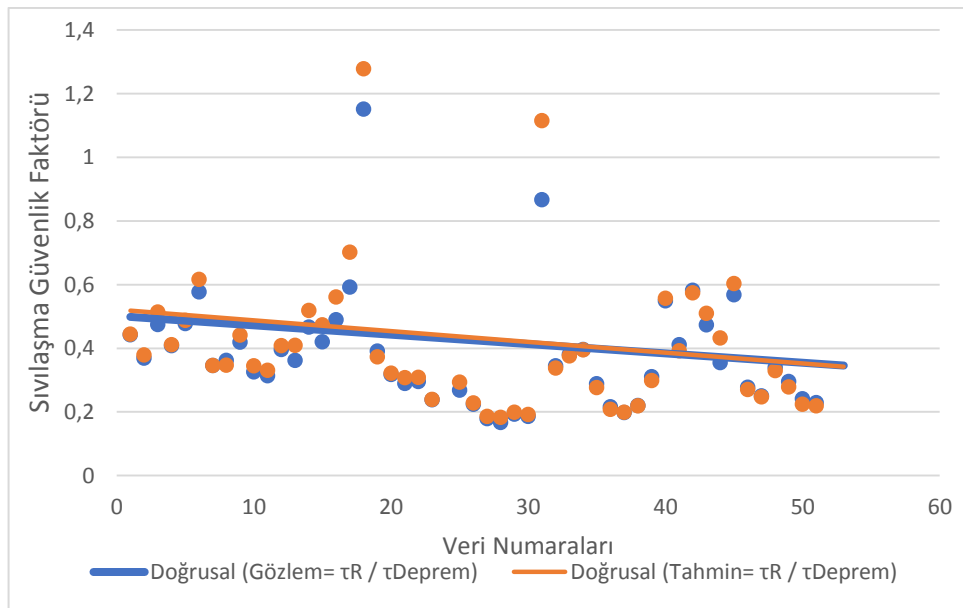


Şekil 3.20: Kritik veriler ile Sıvılaşma güvenlik faktörü olan arasındaki ilişki

3.4.4 Ektest sonuç analizleri

Model belirli bir öğrenme ile belirli bir doğruluğa eriştikten sonra geliştirdiği algoritma ile ek test olarak tanımladığımız 51 adet girdi verilerinin sonuçlarını tahmin etmesiyle son bulmuştur. Şekil 3.11 de Ek testler aşamasında bulunduğu sonuçlar neticesinde R-Değeri 0,9749 olarak bulmuştur.

Şekil 3.21 den de anlaşılacağı üzere tahmin sonucu zeminin sıvılaşabilirlik değerleri, gözlem sonuçlarına göre artışlar olmuştur. Ek test için girilen veriler Ekler kısmında mevcut olup GK sırası 600 den başlayıp 651 e kadar olan verilerdir.



Şekil 3.21: 51 ektest verisi ile Sıvılaşma güvenlik faktörü olan arasındaki ilişki

4. SONUÇLAR, TARTIŞMA, ÖNERİLER VE GELECEKTEKİ ÇALIŞMALAR

Yapılan analiz sonucu elde edilen veriler aşağıdaki çizelgede özetlenmiştir. Tahmin verileri için, başarı oranı hesaplamaları başlığı altında belirtilen denklemler kullanılarak belirli aralıklarda MSE ve R değerleri hesaplanmıştır.

Çizelge 4.1: YSA analizi ve tahmin sonuçlarının belirli aralıklarda performansları

AŞAMA	VERİ TÜRÜ	VERİ	MSE	R-DEĞERİ
MATLAB ile YSA Öğrenmesi	Öğrenme	510	0,0025	0,9981
	Test	90	0,0032	0,9849
	Ek Test	51	0,0084	0,9749
Tahminlerin belirli aralıklarda incelenmesi	τ_R / τ_{Deprem} 0,00-0,50 arası	450	0,0010	0,9380
	τ_R / τ_{Deprem} 0,50-0,80 arası	134	0,0030	0,7859
	τ_R / τ_{Deprem} 0,80-1,00 arası	21	0,0088	0,4256
	τ_R / τ_{Deprem} 1,00 üzeri	46	0,0201	0,9982

Bu sonuçlara göre zemin sıvılaşma durumlarının gözleme ve hesaplama dayalı hesapları, yapay sinir ağları tarafından öğrenilip ileriki çalışmalarda kullanılabilir. Bütün veriler kapsamında tahmin gücü yüksek ve hata oranı düşük ağ sonuçları elde edilmiş olup daha mikro bir bakış açısıyla zemin sıvılaşma oranlarının hangi aralıkta ne derece doğru tahmin edildiği araştırılmıştır. τ_R / τ_{Deprem} değeri 1,00 üzeri ve 0,00-0,50 arası gözlem verilerine ait tahminler en yüksek tahmin edilebilir bölgeler olmuş olup, 0,80-1,00 arası bölgedeki gözlemlere ait tahminler düşük tahmin oranına sahip olmuştur. Bunun nedeni veri sayısının azalması ile R sayısının değeri düşmektedir. Daha iyi bir öğrenme için yüksek veri sayısı ile çalışılmalıdır.

Şekil 3.17 de görüldüğü üzere 651 verinin tahmin sonucu belirli bir bölgeye kadar gözlem sonucunun altında kalırken kesişim bölgesinden sonra tahmin sonuçlarının sıvılaşma değerleri gözlem sonuçlarının üzerinde görülmektedir. Her veri için tek tek hata oranlarını değerlendirdiğimizde çok büyük farklılıkların olmadığı görülmektedir.

Şekil 3.18 de görüldüğü üzere 651 veri grubu içerisinde gözlem ve tahmin sonuçları farkının %20 ve üzeri olan very grupları belirlendiğinde tahmin edilen sonuçların gözlem sonuçlarının üzerinde olduğu ve 1.1 değeri olan sıvılaşma doğrusuna yaklaştığı görülmektedir.

Şekil 3.20 da ki grafikte zeminin gözlem sonucuna göre sıvılaşır veya sıvılaşamaz durumda olduğu gözlemlenirken YSA tahmin sonucuna göre zemin davranışının tersi durumda davrandığı söz konusu olduğu görülmektedir. Burada 4,139,140 ve 493 numaralı veriler gözlem değeri zeminin sıvılaşmadığını gösterirken YSA tahmini sonucu zeminin sıvılaşmadığı yönünde görülmektedir. Aynı şekilde 130 ve 631 numaralı veri grupları ise sıvılaşamaz durumda iken tahmin sonucu sıvılaşabileceği yönünde eğilim göstermiştir.

Şekil 3.21 de YSA modelinin öğrenme ve test aşamasını tamamladıktan sonra 51 verinin analiz aşamasında sonuç değerleri girimeksizin tamamen YSA geliştirdiği algoritma sayesinde tahmin sonuçlarını göstermektedir. Burada gözlem ve tahmin sonuçlarının hata paylarının kabul edilebilir düzeyde olduğu gözlemlenmiştir. Başlangıçta tahmin değerleri gözlem değerlerinin üzerinde olsada 51. Veriye kadar tahmin değerleri gözlem değerlerinin altına düşmüştür.

Epoch olarak belirtilen devir sayısını 1000 olarak yani maximum iterasyon eşliğimizdir. Literatürlerden yapılan araştırmalarda ve YSA ile yapılan analiz çalışmalarında veri sayılarının fazla olduğu durumlarda tercih edilen bir durum olduğunu görülmüştür. İterasyon sayısını farklı değerler olarak belirlediğimizde doğruluk değerlerinde daha fazla hata oranları çıktığı gözlenmiştir.

Model oluşturulurken katman sayısı için minimum girdi hücremiz kadar gizli katman olan 5 sayısı seçilmiştir. Çok karmaşık bir model oluşturulmamasından ötürü gizli katman sayısını minimum şartları sağlayacak şekilde belirlenmiştir.

Modelin, eğitim ve test aşamalarında veri setinden veri seçerken random olarak veri seçme kriterinin belirlenmiş olması analizin daha doğru ve daha iyi öğrenme yaptığını göstermiştir.

Bu çalışmada, günümüzde araştırmacıların sıklıkla kullandığı, doğrusal olmayan karmaşık problemlerin çözümünde tercih edilen yapay sinir ağları uygulaması, ticari bir yazılım olan MATLAB programı aracılığıyla kullanılmış olup, gözleme ve hesaplara dayalı sıvılaşmaya etki eden parametreler bağımsız değişken giriş verisi

olarak, sıvılaşma oranları ise bağımlı değişken çıkış verileri olarak kullanılmıştır. Toplamda 651 adet veri ağın eğitilmesi ve test edilmesinde kullanılmıştır. Tahmin verileri elde edilerek sıvılaşma oranlarının belirli aralıklardaki tahmin edilebilirliği araştırılmıştır ve bazı aralıklarda sıvılaşmanın diğer aralıklara göre daha iyi tahmin edilebilir olduğu gözlemlenmiştir. Daha sağlıklı bir ağ yapısı oluşturmak ve ağ öğrenmesini daha kontrollü yapmak için tahmin edilecek sıvılaşma oranlarının belirli aralıklarda ve birbirine yakın sayıda veriler kullanılması gerekmektedir. Analiz sonucunda gerçekten çok uzak veriler incelenerek sebepleri araştırılmalı ve gerektiği takdirde sıvılaşma oranına etki eden diğer parametrelerin de dikkate alınarak analizin tekrar uygulanması gerekmektedir. Bu durumda görülecektir ki, aykırı veriler de tahmin grafiğine yaklaşmaya başlayacaktır. Bu işlem bütün aykırı tahminlerin hesaba katılmadığı ek özelliklerinin eklenerek öğrenmenin tam teşekkürlü sağlanması için sürekli tekrarlanır.

Veri setinin tahmin değerlerinin doğruluğunun arttırılabilmesi için aykırı verilerin azaltılması gerektiği öngörölmüştür.

Daha sağlıklı bir ağ yapısı oluşturmak ve ağ öğrenmesini daha kontrollü yapmak için tahmin edilecek sıvılaşma oranlarının belirli aralıklarda ve birbirine yakın sayıda veriler kullanılması gerekmektedir.

Bu çalışma sonucunda etkin parametrelerin saptanması hususunda yaşanan model geliştirme zorlukları olmuştur. Ancak ileriki çalışmalarda etkin parametrelerin ilave edilmesiyle arazide yapılan SPT çalışmalarında kalite ve kontrol süreçlerinin geliştirilmesi anlamında faydalı olacağı düşünölmektedir.

Arazide yapılan SPT çalışmalarında kalite ve kontrol süreçlerinin disiplinize edilmesi ve elde edilen parametrelerinin doğruluğuna olan güvenin artırılması, yapay sinir ağları ile kurulacak olan modellerde daha genellenebilir ve güvenilir sonuçlar doğuracağı düşünölmektedir.

Yapay Sinir Ağları günümüzde istatistiksel anlamda çok önemli bir yere sahiptir. Mühendislik, sağlık, ekonomi, turizm vb. gibi alanlarda kullanılmaktadır. İnşaat mühendisliğinde farklı konular üzerinde de YSA ile çalışmalar yapılmaktadır. İnşaat mühendisliğinin Geoteknik disiplininin de zemin sıvılaşma potansiyelleri üzerine yapılmış bu çalışmada zemin verilerinin kısıtlı olduğu durumlarda fayda sağlayacağı ön görölmektedir.

İnşaat mühendisliğinde farklı konular üzerinde de YSA ile çalışmalar yapılmaktadır. Bundan sonraki yapılacak olan sıvılaşma analizlerinde deneysel sonuçlara ihtiyaç duyulmadan YSA ile geliştirilecek olan modellerle sıvılaşma tahmini yapılabilir. Böylelikle zaman ve maliyetten tasarruf sağlanmış olunacaktır.

Bu çalışma bize göstermiştir ki Geoteknik raporlarda Tasarım mühendisinin Sıvılaşma analizi yaparken yardımcı kaynak olarak yapay sinir ağlarına başvurabileceği düşünülmektedir.

Farklı bölgelerden oluşturduğumuz bu data havuzu bize pratikte kısıtlı veriler olsa bile çok yönlü bir ağ modeli geliştirmemize olanak sağlayacaktır.

Ayrıca bu çalışmayla akademik alanda sıvılaşma potansiyeli gösteren farklı zeminlerin olduğu bir data havuzu oluşturmamızı sağlamış olup, hangi tür zeminlerde ne kadar sıvılaşma potansiyeli olduğunu görebiliriz.

Bu çalışma kapsamında Tasarım deprem büyüklüğüne (M_w), 7.5 olarak sabit tutulmuş olup, farklı deprem büyüklük değerleri için kapsamlı bir çalışma yapılabilir.

Bu çalışma kapsamında veri setinde sıvılaşmayan bölgede yer alan veri adedinin az olmasından ötürü (46 gözlem verisi) aralıksal çalışma yapılmamıştır. İlerleyen süreçlerde bu tarz çalışmalar yapılması ve veri dağılımının incelenmesi tavsiye edilir.

KAYNAKLAR

- Ağyar, Z.** (2015). Yapay Sinir Ağlarının Kullanım Alanları ve Bir Uygulama. *Mühendis ve Makine* 56(662), 22-23.
- Al Bawwab W. M. K.** (2005). Probabilistic Assessment Of Liquefaction-Induced Lateral Ground Deformations, A Thesis Submitted To The Graduate School Of Natural And Applied Sciences Of Middle East Technical University, (Doctoral dissertation), Middle East Technical University, Turkey.
- Amit, G.** (2002). *Evaluation of Liquefaction Potential Using Adaptive Resonance Theory Based Neural Networks*, (Master's thesis). Massachusetts Lowell University.
- Andrews, D. C. A. and Martin, G. R.** (2000). Criteria for Liquefaction of Silty Soils, *Proceedings of the 12th World Conference on earthquake Engineering*, Auckland, New Zealand.
- Bardet JP, Mace N, Tobita T** (1999) Liquefaction-induced ground deformation and failure. A report to PEER/PG&E, Task 4A – Phase 1, Civil Engineering Department, University of Southern California, Los Angeles.
- Boser, B. E., Guyon, I. M., and Vapnik, V. N.** (1992). "A training algorithm for optimal margin classifiers." *Proceedings 5th Annual ACM Workshop on COLT*, Pittsburgh, PA, 144–152.
- Boulanger, R. W. and Idriss, I. M.** (2004). Evaluating the Potential for Liquefaction or Cyclic Failure of Silts and Clays, (Report No. UCD/CGM-04/01), Center for Geotechnical Modeling, Department of Civil and Environmental engineering, University of California, Davis, 129.
- Boulanger, Ross W. and Idriss, I.M.** (1936). New criteria for distinguishing between silts and clays that are susceptible to liquefaction versus cyclic failure. In *technologies to enhance dam safety and the environment, 25th Annual USSD conference*, (pp. 357-366). Denver, CO. U.S. Society of Dams.
- Casagrande, A.** (1975). Characteristics of cohesionless soils affecting the stability of slopes and earth fills, *Journal of the Boston society of civil engineering*.
- Casagrande, A.** (1975). Liquefaction and cyclic deformation of sand: a critical review. *Proc. Fifth Pan-American Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, pp. 79-133.
- Castro, G.** (1969). *Liquefaction of sands* (Doctoral dissertation). Harvard University, Cambridge, Massachusetts.

- Chadi S., Mohtar E.** (2008). *Pore Fluid Engineering: An Auto adaptive Design For Liquefaction Mitigation*, Purdue University, (Doctoral dissertation), Purdue University, West Lafayette, Indiana.
- Das, S. K., and Samuai, P.** (2008). "Prediction of liquefaction potential based on CPT data: A relevance vector machine approach." Proceedings of 12th International Conference of International Association for Computer Methods and Advances in Geomechanics (IACMAG), Goa, India.
- Doğan, O.** (2016). Yapay Sinir Ağları.
- Egrioglu, E., Aladag, C. H., Yolcu, U., Uslu, V. R., & Basaran, M. A.** (2009). A new approach based on artificial neural networks for high order multivariate fuzzy time series. *Expert Systems with Applications*, 36(7), 10589-10594.
- Erken, A., Özay, R., Kaya, Z., Ülker, M., B., Elibol, B.** (2001). Depremler sırasında zeminlerin sıvılaşması ve taşıma gücü kayıpları, Tmh - Türkiye Mühendislik Haberleri Sayı 431 - 2004/3.
- Faris AT, Seed RB, Kayen RE, Wu J** (2006) A semi-empirical model for the estimation of maximum horizontal displacement due to liquefaction-induced lateral spreading. YIn: Proceedings of the 8th US national conference on earthquake engineering, San Francisco, CA, USA, Paper No. 1323.
- Gandomi, A. H., and Alavi, A. H.,** (2012). "A new multi-gene genetic programming approach to nonlinear system modeling, Part I: materials and structural Engineering Problems." *Neural Computing and Application*, 21 (1), 171-187.
- Girsang C. H.** (2001). A Numerical Investigation Of The Seismic Response Of The Aggregate Pier Foundation System (Master's thesis). Faculty Of The Virginia Polytechnic Institute And State University, December 20, Blacksburg, Virginia.
- Giustolisi, O., Doglioni, A., Savic, D. A., and Webb, B.W.** (2007). "A multi-model approach to analysis of environmental phenomena." *Environmental Modelling and Software*, 5, 674 – 682.
- Goh, T. C., and Goh, S. H.** (2007). "Support vector machines: Their use in geotechnical engineering as illustrated using seismic liquefaction data." *Journal of Computers and Geomechanics.*, 34, 410-421.
- Hagan, M.T. & Menhaj, M.B.,** (1994). Training feed forward techniques with the Marquardt Algorithm, *IEEE Transactions on Neural Networks*, 5, 6, 989–993.
- Ham, F. & Kostanic, I.,** (2001). Principles of Neurocomputing for Science and Engineering, Macgraw-Hill. USA.
- Hamada M, Yasuda S, Isoyama R, Emoto K** (1986) Study on liquefaction induced permanent ground displacement. Report for the Association for the Development of Earthquake Prediction, Japan.
- Hanzawa, H., Itoh, Y., and Suzuki, K.** (1979). Shear characteristics of a quick sand in the Arabian gulf, *Soils and Foundations, Japanese Society of Soil Mechanics and Foundation Engineering*, 19(4): 1-15.

- Hashash, Y.M.A., Musgrove, M.I., Harmon, J.A., Ilhan, O., Groholski, D.R., Phillips, C.A., and Park, D.,**(2017) DEEPSOIL 7.0, User Manual. 2017.
- Holzer T. L., S. Jayko A., Hauksson E., Fletcher J.P.B., Noce T. E., Bennett M. J., Dietel C.M., Kenneth W. H.** (2010). Liquefaction caused by the 2009 Olanca, California (USA), M5.2 earthquake, Engineering Geology, 5 sheets.
- Huang Y.** (2008). *Performance-Based Design and Evaluation for Liquefaction-Related Seismic Hazards*, (Doctoral dissertation). University of Washington.
- Idriss, I. M. and Boulanger, R. W.** (2006). Semi-empirical procedures for evaluating liquefaction potential during earthquakes, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 115-130.
- Ishihara K, Lysmer J, Yasuda S, ve Hirao H** (1976). “ Prediction of Liquefaction in Sand Deposits During Earthquakes”, *Soils and Foundations*, Japanese Society of Soil Mechanics and Foundation Engineering, Vol.16, No.1.
- Ishihara, K.** (1985). Stability of natural deposits during earthquakes, *Proc. 11th Int. Conf. on Soil Mech. and Found. Eng.*, Vol. 1, 321-376.
- Itasca** (2009). *FLAC3D- Fast Lagrangian Analysis of Continua*, Version 6.0. Minneapolis, Minnesota: Itasca Consulting Group, Inc.
- Japan National Committee on Earthquake Engineering.,** (1965), "Niigata earthquake of 1964", Proc, Third World Conference on Earthquake Engineering, New Zealand, Feb (1965).
- Kabalıcı, E.** (2014). Yapay Sinir Ağları. Ders Notları <https://ekblc.files.wordpress.com/2013/09/ysa.pdf>.
- Kanibir A** (2003) Investigation of the lateral spreading at Sapanca and suggestion of empirical relationships for predicting lateral spreading. M.Sc. thesis, Department of Geological Engineering, Hacettepe University, Ankara.
- Keskenler, M. F., & Keskenler, E. F.** (2017). Geçmişten Günümüze Yapay Sinir Ağları ve Tarihçesi. *Takvim-i Vekayi*, 5 (2), 8-18.
- Kramer, S. L.** (1996). *Geotechnical Earthquake Engineering*, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ, 653.
- Kramer, S. L.** (1996). *Geotechnical Earthquake Engineering*. International Series in Civil Engineering and Engineering Mechanics, Prentice-Hall, Inc., Upper Saddle River, NJ 07458, first edition.
- Kramer, S. L. and Seed, H. B.** (1988). Initiation of soil liquefaction under static loading condition. *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, 114(4):412-430.
- Kramer, S.L.** (1996). *Earthquake Geotechnical Engineering*, Prentice-Hall International Series in Civil Engineering Mechanics, New Jersey, USA.
- Kurnaz, K.** (2014). Yapay Sinir Ağları İle Makine Öğrenmesi Uygulaması, Bitirme Tezi <http://kubrakurnaz34.blogspot.com/>

- Liao, S. S. C. and Whitman, R. V.**, (1986), Overburden Correction Factors for SPT in Sand, *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, March ,112(3), p. 373-377.
- Lin C. T. and Lee C. S. G.** (1996). *Neural fuzzy systems*, Prentice Hall Inc.
- Maltarollo, V. G., Honório, K. M., & Da Silva, A. B. F.** (2013). *Applications of Artificial Neural Networks in Chemical Problems*. London: Intechopen.
- Manav, Y.**, (2019). “Sıvılaşma Şiddet Parametreleri ile Bina Deprem Performansı İlişkilerinin Değerlendirilmesi ve Deneysel Zemin İyileştirme Uygulaması”, Doktora Tezi, Pamukkale Üniversitesi, Denizli.
- McCullock W. S. and Pitts W.H.** (1943). A Logical calculus at the ideas imminent in nervous activity. *Bull. Math. Biophy* 5:115-133.
- Mogami, H., Kubo, T.** (1953). The behavior of soil during vibration. *Proceedings of the 3rd International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Vol. 1, pp. 152-153.
- Mollamahmutoğlu, M., Babuççu, F.**, (2021). *Zeminlerde Sıvılaşma Analiz ve İyileştirme Yöntemleri*, ISBN: 9786257679879, Akademisyen Kitapevi, Istanbul, Turkey.
- Navaee, S., & Das, N.** (2002), *Utilization Of Matlab In Structural Analysis Paper* presented at
- Negnevitsky, M.**, (2002). *Artificial Intelligence, A Guide to Intelligent Systems*. Addison- Wesley, 1st edition.
- Nishi K, Kanatani M** (1986) “Evaluation of Stability of Foundation Ground During Earthquake (Part 2)- Settlement and Bearing Capacity of Sandy, Gravely Ground Structure Under Erathquake Motion”, CRIEPI Report, No. U86003.
- Nishi K, Kanatani M, Matsui I, Tohma J** (1986) “Evaluation of Stability of Foundation Ground During Earthquake (Part 1)- Development of Estimation Method of Stability of Sandy , Gravely Ground Based on Dynamic Analysis”, CRIEPI Report, No. U86002.
- Nurhan E.** (2008). *Effects Of Permeability And Compressibility On Liquefaction Screening Using Cone Penetration Resistance*, The State University Of New York, Buffalo.
- Okkan, U. & Mollamahmutoğlu, A.**, (2010). Yiğitler Çayı günlük akımlarının yapay sinir ağları ve regresyon analizi ile modellenmesi, *Dumlupınar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 23, 33-48
- Özaydın, K.** (2007). Zeminlerde sıvılaşma, *Altıncı Ulusal Deprem Mühendisliği Konferansı*, 16-20 Ekim 2007, İstanbul Sixth National Conference on Earthquake Engineering, 16-20 October 2007, Istanbul, Turkey.
- Öztemel, E.** (2003). *Yapay Sinir Ağları*. İstanbul: Papatya, s.15-18.
- Pal, M.** (2006). “Support vector machines-based modeling of seismic liquefaction potential.” *Journal of Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 30, 983-996.

- Qiang X., Bin H., Zhuoyuan Z., Runqiu H.,**(2002). Development of Pre-Processing Package for FLAC3D and Verification of Its Simulating Effects. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, Vol.21 No.9, Sept. 1387-1391.
- Raghudeep B.** (2008). Liquefaction Induced Lateral Spreading In Large-Scale Shake Testing, State University Of New York At Buffalo, USA.
- Rauch AF** (1997) An empirical method for predicting surface displacements due to liquefaction-induced lateral spreading in earthquakes. Ph.D. dissertation, Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg, Virginia
- Robertson, P.K., and Wride, C.E.** (1997). Cyclic Liquefaction Potential and Its Evaluation Based on the SPT and CPT, Proceedings, Workshop on Evaluation of Liquefaction Resistance, NCEER-97-0022, Buffalo, NY, 41-87.
- Seed H. B.** (1979). Considerations in the earthquake-resistance design of earth and rock-fill dams. *Geotechnique* 29, No. 3, pp. 215-263.
- Seed H. B., and Lee, K. L.** (1966). Liquefaction of saturated sands during cyclic loading. *Journal of Soil Mechanics and Foundations*, November, pp. 105-134.
- Seed H.B. and Kramer S.L.** (1998). Initiation of soil liquefaction under static loading condition. *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, 114(4), 412-430.
- Seed H.B., Idriss I. M., Arango I.,** (1983). "Evaluation of liquefaction potential using filed performance data", *Journal of Geotechnical&Geoenvironmental Engineering*, ASCE, 109(3):458-482.
- Seed R. B., Cetin, K. O., Moss, R. E. S., Kammerer, A. M., Wu, J., Pestana, J. M., Riemer, M. F., Sancio, R. B., Bray, J. D., Kayen, R. E., and Faris, A.** (2003). Recent Advances in Soil Liquefaction Engineering: A Unified and Consistent Framework, *26th Annual ASCE Los Angeles Geotechnical Spring Seminar*, CA, April.
- Seed, H. B. and Idriss, I. M.** (1971). Simplified procedure for evaluating soil liquefaction potential. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, ASCE, 107:1249-1274.
- Seed, H. B., Tokimatsu, K., Harder, L. F. and Chung, R. M.** (1985). The influence of SPT procedures in soil liquefaction resistance evaluations *Journal of Geotechnical Eng., ASCE*, Vol. 111(12), 1425-1445.
- Seed, H.B. and Idriss, I.M.** (1982). Ground motions and soil liquefaction during earthquakes. *Technical report*, Earthquake Engineering Research Institute, Berkeley, California.
- Seed, H.B., Martin, P.P., and Lysmer, J.** (1975). The generation and dissipation of pore water pressures during soil liquefaction. *Earthquake Engineering Research Center*, (Report No: UCB/EERC 75-26).
- Seed, H.B., Mori, K., and Chan C.K.,** (1977). Influence of seismic history in liquefaction of sands. *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, ASCE, Vol 103, no GT4, 246-270.

- Shamoto Y, Zhang JM, Tokimatsu K** (1998) Methods for evaluating residual post-liquefaction ground settlement and horizontal displacement. Special Issue on the Geotechnical Aspects of the January 17 1995 Hyogoken-Nambu Earthquake, No. 2, pp 69–83
- Sivakugan N.** (2006). A Flac Premier, School of Engineering James Cook University, Australia.
- Terzaghi, K., Peck, R.B.** (1948). Soil Mechanics in Engineering Practice. John Wiley and Sons, Inc., 2nd Edition.
- Tipping,** (2001). “Machine learning modelling for predicting soil liquefaction susceptibility.” Natural Hazards and Earth Sciences, 11, 1-9.
- Tolon, M.** (2013), A Comparative Numerical Analysis for Liquefaction, Phd Thesis, ITU, Graduate School of Science Engineering and Technology, August 2013.
- Ural, D. N., Bayrak, M.B., and Saygili, G.** (2003). Liquefaction potential assessment by neural networks based on the Kocaeli, Turkey earthquake. Soil Dyn. Earth. Engr.
- Url-1,** (2021) <<http://www.ce.washington.edu/~liquefaction>>, alındığı tarih: 10.01.2011.
- Url-2,** (2021) <<https://www.movea.com.tr/zeminde-sivilasma-nedir/>>, alındığı tarih: 08.09.2021.
- Url-3,** (2021) < <https://muhendistan.com/zemin-sivilasmasi-nedir/>>, alındığı tarih: 09.09.2021.
- Url-4,** (2021) < <http://www.ggsd.com> >, date retrieved 29.06.2006.
- Url-5,** (2021) <<http://kod5.org/yapay-sinir-aglari-ysa-nedir/>>, Erişim tarihi 22.10.2021
- Url-6,** (2021) <https://en.wikipedia.org/wiki/Wolfgang_von_Kempelen>, Erişim tarihi 22.10.2021
- Url-7,** (2021) <<https://tr.wikipedia.org/wiki/MATLAB>>, Erişim tarihi: 22.10.2021
- Url-8,** (2021) <<https://www.matlabassignmentexperts.com/how-is-matlab-useful-in-civil-engineering.html>>, Erişim tarihi: 22.10.2021.
- Vapnik, V.** (1998). Statistical learning theory. Wiley, New York.
- Wang, J. G., Rahman, M. S.** (1999), “A Neural Network Model for Liquefaction-Induced Horizontal Ground Displacement”, Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 1999, Vol. 18, pp. 555-568.
- Whitman R. V.** (1985). On Liquefaction. *Proceedings, 11th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Vol. 4, 1923-1926.
- Widrow, B., & Hoff, M.E.,** (1962).“ Associative Storage and Retrieval of Digital Information in Networks of Adaptive Neurons”, Biological Prototypes ve Synthetic Systems, 1:160, 1962.

- Wu, J., Seed H.B., Raymond B.** (2004). Estimation of liquefaction induced ground settlement. *In proceedings: 5th international conference on case histories in geotechnical engineering*. Vol 1, 8.
- Yoshimi Y, Tokimatsu K** (1978) “Two-dimensional pore pressure changes in sand deposits during earthquakes” Proc., 2nd International Conf. on Microzonation, 2, 853-863.
- Youd TL, Perkins JB** (1987) Map showing liquefaction susceptibility of San Mateo County. U.S. Geological Survey,
- Youd, T. L. and Carter, B.** (2003). Influence of soil softening and liquefaction on response spectra for bridge design, Technical Report (UT-03.07), Utah Department of Transportation.
- Youd, T. L. Hansen, C. M., and Bartlett, S. F.** (2002). Revised Multilinear Regression Equations for Prediction of Lateral Spread Displacement. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, December, 1007-1017.
- Youd, T. L., & Idriss, I. M.,** (2001) Liquefaction resistance of soils: summary report from the 1996 NCEER and 1998 NCEER/NSF workshops on evaluation of liquefaction resistance of soils. *Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering*, 127(4),297-313, 2001.
- Youd, T.L.** (1984). Recurrence of liquefaction at the same site. *In proceedings, 8th World conference on earthquake engineering*, Vol 3, 231-238.
- Youd, T.L.** (1991). Mapping of earthquake induced liquefaction for seismic zonation. *In proceedings, 4th international conference on seismic zonation*. (Vol. 1, pp. 11-147). Earthquake engineering research institute, Stanford University.
- Zadeh, L.A.** (1994). Soft Computing and Fuzzy Logic, *IEEE Software*, 11 (6), pp. 48-56.
- Ziotopoulou A.** (2010). Evaluating Model Uncertainty against Strong Motion Records at Liquefiable Sites, (Master’s thesis). Civil And Environmental Engineering, University Of California Davis.

EKLER

MATLAB programında YSA için uygulama kodları;

```
% Solve an Input-Output Fitting problem with a Neural Network
```

```
% Script generated by Neural Fitting app
```

```
% Created 08-Nov-2021 22:45:19
```

```
%
```

```
% This script assumes these variables are defined:
```

```
%
```

```
% Train - input data.
```

```
% Results - target data.
```

```
x = Train;
```

```
t = Results;
```

```
% Choose a Training Function
```

```
% For a list of all training functions type: help ntrain
```

```
% 'trainlm' is usually fastest.
```

```
% 'trainbr' takes longer but may be better for challenging problems.
```

```
% 'trainscg' uses less memory. Suitable in low memory situations.
```

```
trainFcn = 'trainlm'; % Levenberg-Marquardt backpropagation.
```

```
% Create a Fitting Network
```

```
hiddenLayerSize = 5;
```

```
net = fitnet(hiddenLayerSize,trainFcn);
```

```
% Choose Input and Output Pre/Post-Processing Functions
```

```
% For a list of all processing functions type: help nnprocess
```

```

net.input.processFcns = {'removeconstantrows','mapminmax'};
net.output.processFcns = {'removeconstantrows','mapminmax'};
% Setup Division of Data for Training, Validation, Testing
% For a list of all data division functions type: help nndivision
net.divideFcn = 'dividerand'; % Divide data randomly
net.divideMode = 'sample'; % Divide up every sample
net.divideParam.trainRatio = 90/100;
net.divideParam.testRatio = 10/100;
% Choose a Performance Function
% For a list of all performance functions type: help nnperformance
net.performFcn = 'mse'; % Mean Squared Error
% Choose Plot Functions
% For a list of all plot functions type: help nnplot
net.plotFcns = {'plotperform','plottrainstate','ploterrhist', ...
    'plotregression', 'plotfit'};
% Train the Network
[net,tr] = train(net,x,t);
% Test the Network
y = net(x);
e = gsubtract(t,y);
performance = perform(net,t,y)
% Recalculate Training, Validation and Test Performance
trainTargets = t .* tr.trainMask{1};
valTargets = t .* tr.valMask{1};
testTargets = t .* tr.testMask{1};
trainPerformance = perform(net,trainTargets,y)

```

```

valPerformance = perform(net,valTargets,y)

testPerformance = perform(net,testTargets,y)

% View the Network

view(net)

% Plots

% Uncomment these lines to enable various plots.

%figure, plotperform(tr)

%figure, plottrainstate(tr)

%figure, ploterrhist(e)

%figure, plotregression(t,y)

%figure, plotfit(net,x,t)

% Deployment

% Change the (false) values to (true) to enable the following code blocks.
% See the help for each generation function for more information.

if (false)

    % Generate MATLAB function for neural network for application

    % deployment in MATLAB scripts or with MATLAB Compiler and Builder

    % tools, or simply to examine the calculations your trained neural

    % network performs.

    genFunction(net,'myNeuralNetworkFunction');

    y = myNeuralNetworkFunction(x);

end

if (false)

    % Generate a matrix-only MATLAB function for neural network code

    % generation with MATLAB Coder tools.

    genFunction(net,'myNeuralNetworkFunction','MatrixOnly','yes');

```

```
y = myNeuralNetworkFunction(x);  
end  
if (false)  
    % Generate a Simulink diagram for simulation or deployment with.  
    % Simulink Coder tools.  
    gensim(net);  
end
```



ÖZGEÇMİŞ

Öğrenim Durumu

- Lisans : 2018, Kocaeli Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü

