



**ŞEVE OTURAN ŞERİT TEMELLERİN TAŞIMA
GÜCÜNÜN İSTATİSTİKSEL YAKLAŞIMLA
İRDELENMESİ**

Alper GÜCÜYENER

Yüksek Lisans Tezi

İnşaat Mühendisliği

Ana Bilim Dalı

Doç. Dr. Hakan Alper KAMILOĞLU

2025

(Her Hakkı Saklıdır)

T.C.
BAYBURT ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ TEZLİ YÜKSEK LİSANS PROGRAMI

ŞEVE OTURAN ŞERİT TEMELLERİN TAŞIMA GÜCÜNÜN İSTATİSTİKSEL
YAKLAŞIMLA İRDELENMESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Alper GÜCÜYENER

Danışman: Doç. Dr. Hakan Alper KAMILOĞLU

BAYBURT - 2025

KABUL VE ONAY

Doç. Dr. Hakan Alper KAMILOĞLU danışmanlığında, Alper GÜCÜYENER tarafından hazırlanan “Şeve Oturan Şerit Temellerin Taşıma Gücünün İstatistiksel Yaklaşımla İrdelenmesi” başlıklı bu çalışma, 24.03.2025 tarihinde yapılan savunma sınavı sonucunda oy birliği ile başarılı bulunarak jürimiz tarafından Yüksek Lisans Tezi olarak kabul edilmiştir.

Başkan : Prof. Dr. Erol ŞADOĞLU

Üye : Doç. Dr. Hakan Alper KAMILOĞLU

Üye : Doç. Dr. Fatih YILMAZ

Bu tezin kabulü Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Yönetim Kurulu’nun/...../20... tarih ve 20...../.....-..... sayılı kararıyla onaylanmıştır.

Doç. Dr. Bünyamin ALIM
Enstitü Müdürü

BEYANNAME

Bayburt Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü tez yazım kılavuzuna göre Doç. Dr. Hakan Alper KAMILOĞLU danışmanlığında hazırlamış olduğum “Şeve Oturan Şerit Temellerin Taşıma Gücünün İstatistiksel Yaklaşımla İrdelenmesi” başlıklı tezimin bilimsel etik değerlere ve kurallara uygun, özgün bir çalışma olduğunu, aksinin tespit edilmesi halinde her türlü yasal yaptırımını kabul edeceğimi beyan ederim.

24.03.2025

Alper GÜCÜYENER



ÖN SÖZ

Şev Üstü Şerit Temellerin Taşıma Kapasitesinin İstatistiksel Yaklaşımla İncelenmesi başlıklı bu çalışma, Bayburt Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı'nda yüksek lisans tezi olarak yapılmıştır.

Çalışmamın her aşamasında benden bilgi ve deneyimlerini esirgemeyen danışman hocam Sayın Doç. Dr. Hakan Alper KAMILOĞLU'na;

İnşaat Mühendisliği Bölümü'nde görev yapmakta olan ve çalışmalarımın çeşitli aşamalarında yardımlarını esirgemeyen Sayın Öğretim Üyelerine ve Araştırma Görevlilerine;

Bu tez çalışmasında benimle birlikte olan, tüm çalışmam boyunca desteğini hissettiğim SNG Madencilik Çevre Müş. Müh. Ltd. Şti ailesine;

Çalışma hayatıma başladığım ilk günden beri desteğini esirgemeyen, yaptığım işi sevdiren ve Geoteknik Mühendisliği'nde büyük önem arz eden arazi çalışmalarının önemini öğreten değerli büyüğüm M. Kenan KAYA'ya;

Bana sonsuz destek olan ve her zaman yanımda olan eşim Sibel GÜCÜYENER'e, çocuklarım Defne ve Gökâl GÜCÜYENER'e;

Eğitim hayatımın her aşamasında sağladıkları maddi ve manevi destekten dolayı annem Günay GÜCÜYENER'e, babam Sacit GÜCÜYENER'e ve değerli abilerim Sertaç, Enis, Abidin GÜCÜYENER'e;

Teşekkürlerimi sunar, bu çalışmanın bilim ve uygulama alanlarına faydalı olmasını dilerim.

Alper GÜCÜYENER

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

ŞEVE OTURAN ŞERİT TEMELLERİN TAŞIMA GÜCÜNÜN İSTATİSTİKSEL YAKLAŞIMLA İRDELENMESİ

Alper GÜCÜYENER

Bayburt Üniversitesi

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Hakan Alper KAMILOĞLU

Bayburt-2025, Sayfa: 55

Bu tez çalışması, şeve oturan şerit temellerin taşıma gücünü istatistiksel yöntemlerle incelemeyi amaçlamaktadır. Şevli zeminlerde temellerin taşıma kapasitesi, geleneksel düz zemin temellerine kıyasla daha karmaşık bir yapıya sahiptir ve birçok faktörden etkilenmektedir. Bu nedenle, mevcut analitik yaklaşımların sınırlılıklarını aşmak ve daha güvenilir tahminler yapmak için istatistiksel modelleme yöntemleri kullanılmaktadır.

Çalışma kapsamında içsel sürtünme açısı, kohezyon, temel genişliği, gömülme derinliği, temelin şeve uzaklığı, şev yüksekliği ve şev eğim açısı bağımsız değişkenler olarak belirlenmiştir. Bağımsız değişkenlerin yanıt olarak belirlenen taşıma gücü katsayısı üzerindeki etkileri istatistiksel olarak incelenmiştir. Bu kapsamda Yanıt Yüzey Yöntemi (YYY) kullanılmıştır. Merkezi kompozit tasarım yaklaşımı ile bağımsız değişkenlerin farklı değer aldığı 142 durum oluşturulmuştur. Her durum için temel monotonik yükleme yapılarak sonlu elemanlar yöntemi ile taşıma gücü belirlenmiştir. Elde edilen yük, boyutsuz taşıma gücü katsayısına çevrilerek yanıt olarak deney matrisinde tanımlanmıştır. Yapılan istatistiksel analiz sonucunda, uygun model belirlenmiş, doğrulaması yapılmıştır. Model doğruluğu, deney setinde olmayan bağımsız değişkenlerin bulunduğu yeni veri seti ile kontrol edilmiştir. Elde edilen istatistiksel model kullanılarak, bağımsız değişkenlerin taşıma gücü katsayısı üzerindeki tekil etkileri incelenmiştir. Bunun yanında, bağımsız değişkenler arasında etkileşimin de olabileceği dikkate alınarak parametre etkisi Pareto diyagramları ile incelenmiştir. Pareto diyagramları ANOVA sonucunda her bir bağımsız değişken için belirlenen F-değerleri dikkate alınarak hazırlanmıştır.

Elde edilen sonuçlar, şevli zeminlerde temellerin taşıma kapasitesinin, zemin özellikleri ve şev geometrisi ile doğrudan ilişkili olduğunu göstermiştir. Ayrıca, Yanıt Yüzey Yönteminin, karmaşık geoteknik sistemlerin davranışlarını modelleme ve tahmininde etkili bir yöntem olduğu ortaya konmuştur.

Anahtar Kelimeler: Şerit temeller, taşıma gücü, şevler, cevap yüzeyleri.

ABSTRACT

M. SC. THESIS

INVESTIGATION OF THE BEARING CAPACITY OF STRIP FOUNDATIONS RESTING ON SLOPE WITH STATISTICAL APPROACH

Alper GÜCÜYENER

Bayburt University

Institute of Graduate Studies

Department of Civil Engineering

Thesis Advisor: Assoc. Prof. Dr. Hakan Alper KAMILOĞLU

Bayburt-2025, Pages: 55

This thesis aims to statistically investigate the bearing capacity of strip foundations resting on slopes. The bearing capacity of foundations on slopes is more complex compared to foundations on flat surfaces and is influenced by numerous factors. Therefore, statistical modeling techniques are employed to overcome the limitations of existing analytical approaches and make more reliable predictions.

Within the scope of the study, internal friction angle, cohesion, foundation width, depth of embedment, distance of the foundation to the slope, slope height, and slope inclination angle were determined as independent variables. The effects of the independent variables on the bearing capacity coefficient determined as a response were analyzed statistically. In this context, the Response Surface Method (RSM) was used. With the central composite design approach, 142 cases with different values of the independent variables were created. For each case, basic monotonic loading was applied, and the bearing capacity was determined by the finite element method. The load obtained was converted into a dimensionless bearing capacity coefficient and defined in the test matrix as a response. As a result of the statistical analysis, the appropriate model was determined and validated. Using the obtained statistical model, the individual effects of the independent variables on the bearing capacity coefficient were analyzed. In addition, considering that there may be an interaction between the independent variables, the parameter effect was analyzed with Pareto diagrams. Pareto diagrams were prepared by considering the F-values determined for each independent variable as a result of ANOVA.

The results obtained show that the bearing capacity of foundations resting on slope is directly related to the soil properties and slope geometry. Additionally, it was demonstrated that the Response Surface Method is an effective technique for modeling and optimizing the behavior of complex geotechnical systems.

Keywords: Strip foutings, bearing capacity, slopes, response surfaces.

İÇİNDEKİLER

KABUL VE ONAY.....	II
BEYANNAME	III
ÖN SÖZ	IV
ÖZET	V
ABSTRACT	VI
İÇİNDEKİLER.....	VII
TABLOLAR.....	IX
ŞEKİLLER.....	X
KISALTMALAR.....	XII
SİMGELER.....	XIII
GİRİŞ.....	1
Araştırmanın Konusu ve Problemi	1
Araştırmanın Amacı	2
Araştırmanın Önemi ve Gerekçesi	2
Araştırmanın Sınırlılıkları	3
Varsayımlar	3
Terim ve Tanımları	4
BİRİNCİ BÖLÜM.....	5
1. KURAMSAL ÇERÇEVE	5
1.1. ŞEVE OTURAN TEMELLERDE TAŞIMA GÜCÜ HESAPLAMALARI.....	5
İKİNCİ BÖLÜM	13
2. YÖNTEM	13
2.1. MODEL KURULUMU VE POLİNOMLAR	13
2.2. OPTİMİZASYON İÇİN YANIT YÜZEY YÖNTEMİ.....	15
2.2.1. Yanıtın Maksimizasyonu veya Minimizasyonu	15
2.2.2. Yanıtın Spesifik Bir Hedefe Ulaştırılması.....	15
2.3. YANIT YÜZEY YÖNTEMİNİN UYGULAMA ADIMLARI	16
2.4. DENEY TASARIMLARI	17
2.4.1. Tam Faktöriyel Tasarım	17
2.4.2. Yarı Faktöriyel Tasarım	17
2.4.3. Merkez Bileşik Tasarım (CCD).....	17
2.5. MODEL PARAMETRELERİNİN TAHMİNİ VE İSTATİSTİKSEL TESTLER	17
2.6. YANIT YÜZEYLERİNİN GÖRSELLEŞTİRİLMESİ.....	18
2.7. SONUÇLARIN YORUMLANMASI	18
2.8. GEOTEKNİK MÜHENDİSLİĞİNDE YYY’NİN KULLANIM ALANLARI.....	19
2.8.1. Temel Tasarımında YYY’nin Kullanımı.....	19
2.8.2. Zemin İyileştirme Uygulamalarında Yyy’nin Kullanımı	19
2.8.3. Zemin-Yapı Etkileşiminde YYY’nin Kullanımı	19
2.8.4. Risk Analizlerinde YYY’nin Kullanımı.....	20
2.9. İSTATİSTİKSEL İNCELEMEAMACIYLA YYY KULLANAN ÇALIŞMALAR.....	22
ÜÇÜNCÜ BÖLÜM.....	24
3. BULGULAR	24
3.1. YYY İLE TASARIM MATRİSİNİN ÇIKARILMASI.....	24

3.2. SONLU ELEMENLAR YÖNTEMİ İLE YANITLARIN BELİRLENMESİ.....	25
3.3. UYGUN İSTATİSTİKSEL MODELİN BELİRLENMESİ VE DOĞRULANMASI.....	30
3.4. LİMİT TAŞIMA GÜCÜ DEĞERİNE ETKİ EDEN PARAMETRELERİN BELİRLENMESİ.....	39
3.4.1. OLUŞTURULAN MODEL KULLANILARAK GERÇEKLEŞTİRİLEN PARAMETRİK ANALİZLER.....	39
3.4.2. PARETO ANALİZİ İLE TAŞIMA GÜCÜNE ETKİ EDEN PARAMETRELERİN İNCELENMESİ.....	42
SONUÇ, TARTIŞMA VE ÖNERİLER.....	45
Sonuç	45
Tartışma.....	45
Öneriler.....	46
KAYNAKÇA.....	47
EKLER.....	51
Ek 1: YYY Kapsamında Oluşturulan Tasarım Matrisi	51
ÖZ GEÇMİŞ	55

TABLÖLAR

Tablo 1: Bağımsız Değişkenlerin Minimum, Maksimum ve Ortalama Değerleri	25
Tablo 2: Modellemede Dikkate Alınan Parametreler	26
Tablo 3: İstatistiksel Analizlerde Kullanılan Model Sonuçları	31
Tablo 4: Modeller İçin Elde Edilen Anova Sonuçları	32
Tablo 5: Modellerin Tahmin Güçlerinin Değerlendirilmesinde Dikkate Alınan Bağımsız Değişken Değerleri.....	33
Tablo 6: Square Root Dönüşümüne Tabi Tutulan, 2fı Modelin Anova Sonuçları	37
Tablo 7: Düzeltilmiş Modelin Karşılaştırmasında Dikkate Alınan Bağımsız Değişkenler.....	38



ŞEKİLLER

Şekil 1: Şevin Üzerine ve Şev Yüzeyine İnşa Edilen Şerit Temelin Yakınında Plastik Bölgeler ve Kayma Yüzeyleri	6
Şekil 2: Meyerhof'a Göre Kohezyonsuz Şevli Zemin Tepesine İnşa Edilen Şerit Temelin $N_{\gamma q}$ Katsayısının B , ϕ , B/B ve D_f/B İle İlişkisi	7
Şekil 3: Çalışmada Dikkate Alınan Parametreler	24
Şekil 4: Zemin Yüzeyine Etkiyen Gerilme Artışının Derinlikle Değişimi	27
Şekil 5: a: Düz Yüzeyde Ko Prosedürünün Uygulanması, b: Eğimli Yüzeyde Ko Prosedürünün Uygulanması	27
Şekil 6: a: Ağ Analizi Sonucunda Elde Edilen Optimum Eleman Sayısı, b: Ağ Analizi Sonucunda Elde Edilen Optimum Eleman Boyu	28
Şekil 7: a: Hazırlanan Sonlu Elemanlar Modelinin Liv D (2020) Tarafından Önerilen Sonlu Elemanlar Modeli ile Karşılaştırılması, b: Hazırlanan Sonlu Elemanlar Modelinin Liv D (2020) Tarafından Önerilen Sonlu Elemanlar Limit Analizi Yönetmi ile Karşılaştırılması	29
Şekil 8: Dönüşümünün Farklı Diyagonistik Grafiklerle Kontrolü (a) Normal Olasılık-Dışsal Student Türü Artıklar, (b) Dışsal Student Türü Artıklar-Tahmin Edilen Değer.....	34
Şekil 9: Farklı Dönüşüm Yöntemleri ve Modeller Kullanılarak Elde Edilen Eşitliklerle Gerçekleştirilen Tahminlerin Se Yöntemi Sonuçları ile Karşılaştırılması a: Square Root-2fi Model, b: Square Root-Lineer, c: Natural Log-2fi, d: Natural Log-Lineer, e: Base 10 Log-2fi, f: Base10 Log-Lineer Model	35
Şekil 10: Square Root Dönüşümünün Farklı Diyagonistik Grafiklerle Kontrolü a: Normal Olasılık-Dışsal Student Türü Artıklar, b: Dışsal Student Türü Artıklar-Tahmin Edilen Değer	36
Şekil 11: Bias Dönüşümü Sonrası Tahmin Edilen Sonuçlarla Hesaplanan Sonuçların Karşılaştırılması	39
Şekil 12: Bağımsız Değişkenlerin Alt, Ortalama ve Üst Değerleri İçin, Parametre-Limit Taşıma Gücü Katsayısı İlişkisi a: Bağımsız Değişkenlerin Alt Sınır Değeri İçin $P_u/\gamma B^2-\phi$, b: Bağımsız Değişkenlerin Ortalama Değeri İçin $P_u/\gamma B^2-\phi$, c: Bağımsız Değişkenlerin Üst Sınır Değeri İçin $P_u/\gamma B^2-\phi$, d: Bağımsız Değişkenlerin Alt Sınır Değeri İçin $P_u/\gamma B^2-B$, e: Bağımsız Değişkenlerin Ortalama Değeri İçin $P_u/\gamma B^2-B$, f: Bağımsız Değişkenlerin Üst Sınır Değeri İçin $P_u/\gamma B^2-B$, g: Bağımsız Değişkenlerin Alt Sınır Değeri İçin $P_u/\gamma B^2-D_f/H$, h: Bağımsız Değişkenlerin Ortalama Değeri İçin $P_u/\gamma B^2-D_f/H$, i: Bağımsız Değişkenlerin Üst Sınır Değeri İçin $P_u/\gamma B^2-D_f/H$, j: Bağımsız Değişkenlerin Alt Sınır Değeri İçin $P_u/\gamma B^2-D/B$, k: Bağımsız Değişkenlerin Ortalama Değeri İçin $P_u/\gamma B^2-D/B$, l: Bağımsız Değişkenlerin Üst Sınır Değeri İçin $P_u/\gamma B^2-D/B$, m: Bağımsız Değişkenlerin Alt Sınır Değeri İçin $P_u/\gamma B^2-H/B$, n: Bağımsız Değişkenlerin Ortalama Değeri İçin $P_u/\gamma B^2-H/B$, o: Bağımsız Değişkenlerin Üst Sınır Değeri İçin $P_u/\gamma B^2-H/B$, p: Bağımsız Değişkenlerin Alt Sınır Değeri İçin $P_u/\gamma B^2-\beta$, r: Bağımsız Değişkenlerin Ortalama Değeri İçin $P_u/\gamma B^2-\beta$, s: Bağımsız Değişkenlerin Üst Sınır Değeri İçin $P_u/\gamma B^2-\beta$, ş: Bağımsız Değişkenlerin Alt Sınır Değeri İçin $P_u/\gamma B^2-C$, t: Bağımsız Değişkenlerin Ortalama Değeri İçin $P_u/\gamma B^2-C$, u: Bağımsız Değişkenlerin Üst Sınır Değeri İçin $P_u/\gamma B^2-C$	42

Şekil 13: Bağımsız Değişkenlerin Yanıt Üzerindeki Etkisi İçin Elde Edilen Pareto Diyagramı
Y=Pu/γB İçin Elde Edilen Diyagram, Y=Pu İçin Elde Edilen Diyagram44



KISALTMALAR

YYY	: Yanıt Yüzey Yöntemi
SEY	: Sonlu Elemanlar Yöntemi
SFM	: Sonlu Farklar Yöntemi
CCD	: Merkezi Bileşik Tasarım (Central Composite Design)
GP	: Genetik Programlama
EPR	: Evrimsel Polinom Regresyonu
YSA	: Yapay Sinir Ağı
SEM	: Sonlu Elemanlar Yöntemi (İngilizce: Finite Element Method)
CPT	: Koni Penetrasyon Testi
ANOVA	: Varyans Analizi (Analysis of Variance)



SİMGELER

q_u	: Nihai taşıma kapasitesi (zeminin taşıyabileceği maksimum yük)
C	: Zeminin kohezyonu (zemin parçacıkları arasındaki bağlanma kuvveti)
N_c	: Kohezyon için taşıma kapasitesi katsayısı
q	: Temel seviyesindeki etkili sürşarj yükü
N_q	: Sürşarj yükü için taşıma kapasitesi katsayısı
γ	: Zeminin birim hacim ağırlığı
B	: Temelin genişliği
N_g	: Zeminin kendi ağırlığı için taşıma kapasitesi katsayısı
f	: Zeminin içsel sürtünme açısı
D_f	: Temel derinliği
s_c, s_q, s_g	: Şekil faktörleri (temelin şeklini hesaba katar)
d_c, d_q, d_g	: Derinlik faktörleri (temelin derinliğini hesaba katar)
i_c, i_q, i_g	: Eğim faktörleri (eğimli yükleri hesaba katar)
b_c, b_q, b_g	: Eğim faktörleri (eğimli taban yüzeyini hesaba katar)
g_c, g_q, g_g	: Zemin eğimi faktörleri (zemin yüzeyinin eğimini hesaba katar)
Q_{max}	: Temel taşıma kapasitesi
$s \nsubseteq$	: Efektif gerilme
b	: Şevin eğim açısı
a	: Taban yüzeyinin eğim açısı
FS	: Güvenlik faktörü
$q_{\{ult\}}$	: Zeminin nihai taşıma kapasitesi
$q_{\{all\}}$	: Temele etkiyen izin verilen yük
Y	: Bağımlı değişken (yanıt)
x_i	: Bağımsız değişkenler (faktörler)
b_0	: Sabit terim
b_i	: Doğrusal terimlerin katsayıları
b_{ii}	: Karesel terimlerin katsayıları
b_{ij}	: Etkileşim terimlerinin katsayıları
$\bar{Y}$	: Tahmin edilen yanıt değeri
S_e	: Elastik oturma
n	: Poisson oranı
I_w	: Etki faktörü
E_s	: Zeminin elastisite modülü
S	: Toplam oturma
S_i	: Anlık oturma
S_c	: Konsolidasyon oturması
S_s	: İkincil oturma
P_a	: Rankine Aktif Zemin Basıncı
K_a	: Aktif zemin basıncı katsayısı
H	: Zemin yüksekliği
g_d	: Kuru birim hacim ağırlığı
g_w	: Islak birim hacim ağırlığı

W	: Su içeriği
D_r	: Göreceli sıkılık
e_{max}	: Maksimum boşluk oranı
e_{min}	: Minimum boşluk oranı
E	: Mevcut boşluk oranı
P_i	: Enjeksiyon basıncı
Q_i	: Enjeksiyon malzemesi miktarı



GİRİŞ

Zemin mekaniği ve temel inşaatı, yapıların güvenli ve ekonomik bir şekilde inşa edilmesini sağlayan inşaat mühendisliğinin kritik alt disiplinleridir. Temel sistemleri, yapıların taşıyıcı yüklerini zemine güvenli bir şekilde aktararak dengeli bir şekilde durmasını sağlar. Şerit temeller, özellikle çok katlı binalar ve endüstriyel tesisler gibi büyük yapılar için yaygın olarak kullanılan bir temel türüdür. Şevli zeminlere temellerin taşıma gücü davranışı, zeminin eğimi nedeniyle düz zemindeki temellerden farklılık gösterir ve bu nedenle tasarım açısından önemli zorluklar ortaya çıkarır. Şevli zeminlerde, geleneksel analitik yaklaşımlar, zemin ve temel davranışının karmaşıklığını tam olarak yansıtamayabilir. Bu nedenle, şevli zeminlere oturan şerit temellerin taşıma gücü davranışını daha iyi anlamak ve modellemek için istatistiksel analiz ve modelleme yöntemleri büyük önem taşımaktadır.

Araştırmanın Konusu ve Problemi

Bu çalışmanın odak noktası, şevli zeminlere oturan şerit temellerin taşıma gücü davranışının istatistiksel yaklaşımlarla incelenmesidir. Şevli zeminlerdeki temeller, zemin stabilitesi ve yük aktarımı açısından karmaşık davranışlar sergiler ve bu da geleneksel hesaplama yöntemlerinin yetersiz kalmasına neden olabilir. Geleneksel yöntemler, şev eğimi, zemin kayma mukavemeti ve temel geometrisindeki karmaşıklıkları tam olarak yansıtamayabilir. Bu da tasarım sürecinde hem güvenlik hem de ekonomik açıdan yanıltıcı sonuçlara yol açabilir. Bu nedenle, daha doğru ve kapsamlı istatistiksel modellerin geliştirilmesi gerekmektedir.

Yüzeysel temellerin taşıma gücünü belirlemek için kullanılan yöntemler çeşitli zorluklar ortaya koymaktadır. Küçük ölçekli deneyler, boyut etkisi nedeniyle doğru sonuçlar vermeyebilirken, büyük ölçekli deneyler genellikle maliyetli ve uygulanması zordur. Analitik yaklaşımla geliştirilen, konvansiyonel yöntemler ise, basitleştirici varsayımlar gerektirdiğinden, analitik tahminler ile deneysel sonuçlar arasında tutarsızlıklara yol açabilir. Sayısal yaklaşımlar, bu sorunları ele almak için alternatif bir çözüm sunabilir. Sonlu elemanlar yöntemi (SEY), şerit temellerin taşıma gücünü belirlemede oldukça etkili bir yöntemdir ve birçok çalışma SEY sonuçlarının geleneksel yöntemlere göre deneysel bulgulara daha yakın olduğunu göstermektedir. Ancak, SEY'in de uygun yazılıma erişim, yeterli modelleme uzmanlığı ve yeterli işlemci kapasitesi gibi zorlukları vardır.

Geleneksel yaklaşımların yanı sıra, geoteknik mühendisliğinde istatistiksel ve yapay zekâ tabanlı yöntemlerin kullanımı giderek artmaktadır. Bu yöntemler, sonuçların doğru tahmin edilmesini sağlamanın ötesinde, sistemi etkileyen parametreleri tanımlar, etki derecelerini belirler ve sistemin ayrıntılı bir analizine olanak tanır. Yanıt yüzey yöntemi

(YYY), bu tür istatistiksel yaklaşımlardan biridir ve geoteknik mühendisliğinde yanıt değerlerini optimize etmek, sistemlerin kapsamlı bir şekilde anlaşılmasını sağlamak ve karmaşık sayısal analizlerin hesap yükünü azaltmak gibi amaçlar için kullanılmaktadır. YYY, birçok mühendislik disiplininde yaygın olarak kullanılmasına rağmen, yüzeysel temellerin taşıma gücünün tahmin edilmesinde kullanımı nispeten sınırlı kalmıştır.

İstatistiksel yaklaşımları sonlu eleman yöntemleri (SEM) ile birleştiren hibrit yöntemler, her iki tekniğin güçlü yönlerinden yararlanarak yanal toprak basıncı katsayılarının hesaplanmasında kayda değer avantajlar sunar. SEM, hassas sonuçlar verebilmesine rağmen, karmaşık sistemleri modellemek için genellikle kapsamlı hesaplama kaynakları ve çok sayıda analiz gerektirir. Öte yandan, yanıt yüzeyi metodolojisi (YYY), sınırlı sayıda SEM simülasyonu kullanarak girdi değişkenleri (örneğin, zemin özellikleri ve sınır koşulları) ile çıktı değişkenleri (örneğin, yanal toprak basıncı) arasındaki ilişkiyi verimli bir şekilde modeller ve hesaplama yükünü önemli ölçüde azaltır. Ayrıca, YYY, en etkili tasarım değişkenlerinin belirlenmesine yardımcı olarak mühendislerin tasarımın kritik yönlerine odaklanmasını sağlar ve bağımsız değişkenlerin göreceli önemini de değerlendirir. YYY, enterpolasyon yetenekleri sağlayarak, ek SEM analizlerine gerek kalmadan farklı girdi kombinasyonlarında yanal toprak basıncının doğru tahmin edilmesine olanak tanır ve verimliliği artırır.

Araştırmanın Amacı

Bu tezin amacı, f-c zemin için şev üzerine oturan bir şerit temelin taşıma gücünü etkileyen faktörlerin istatistiksel yöntemlerle analiz edilmesi ve bu faktörlerin etkilerinin nicel olarak belirlenmesidir. Bu bağlamda, temel genişliği (B), zemine ait kayma mukavemeti parametreleri (c , ϕ), temel derinliği (D_f), temelin şeve uzaklığı (D), şev yüksekliği (H), şev eğimi (β), bağımsız değişkenler olarak belirlenmiştir. Farklı koşullar için yapılan sonlu elemanlar analizi sonucu elde edilen taşıma gücü değeri yanıt olarak kabul edilmiştir. Yapılan çalışma kapsamında bağımsız değişkenlerle yanıt arasında istatistiksel ilişki kurularak taşıma gücü tahmininin yapılabirliği ve bağımsız değişkenlerin sonuç üzerindeki etkileri irdelenmiştir.

Araştırmanın Önemi ve Gerekçesi

Geoteknik mühendisliğinde, artan yapı talebi ve kapasitesine paralel olarak, mühendislik açısından yeterli temel zeminine rastlamak giderek zorlaşmaktadır. Modern şehirleşme ve altyapı projeleri, yapıların şevli arazilerde inşa edilmesini kaçınılmaz hale getirmekte ve bu durum geoteknik mühendisliği alanında yeni zorluklar doğurmaktadır.

Eğimli yüzeylerin yapı kullanımına açılmasıyla ortaya çıkan en önemli problemlerden biri, temel taşıma kapasitesinin doğru ve güvenilir bir şekilde belirlenmesidir.

Şevli zeminler üzerine tasarlanan temeller, şev stabilitesi kaynaklı problemler nedeniyle yapısal tasarımda önemli riskler oluşturmaktadır. Bu nedenle, bu tip temellerin davranışını anlamaya yönelik çalışmalar hem mühendislik uygulamalarında hem de literatürde giderek artan bir öneme sahiptir. Ancak, geleneksel yaklaşımlar şev eğimi ve zemin mukavemeti gibi kritik parametrelerin karmaşık etkileşimlerini tam anlamıyla ele alamamaktadır. Bu durum, yapı güvenliği açısından önemli sorunlara yol açabilir ve tasarım aşamasında istenmeyen sonuçlar doğurabilir.

Bu tez çalışması, şevli zeminler üzerindeki temellerin tasarımı için Sonlu Elemanlar Metodu (SEM) ve Yanıt Yüzey Yöntemi (YYY) tabanlı alternatif bir tahmin yöntemi sunmayı amaçlamaktadır. Önerilen bu yaklaşımla, nihai taşıma gücü tahmininin yanında temel taşıma gücünü etkileyen faktörlerin karmaşık etkileşimlerinin incelenmesi amaçlanmaktadır. Ayrıca, istatistiksel analiz yöntemleri kullanılarak taşıma gücü tahminlerinin yanı sıra, sistemi oluşturan bağımsız değişkenlerin sonuç üzerindeki etkileri de detaylı bir şekilde incelenecektir.

Araştırmanın Sınırlılıkları

Yapılan çalışmada, bağımsız değişken olarak belirlenen parametreler, analizin kapsamını ve doğruluğunu belirlemek amacıyla alt ve üst sınır değerler çerçevesinde kullanılmıştır. Bu sınırlandırma, incelenen problemin gerçekçi bir şekilde temsil edilmesini sağlamak ve istatistiksel modelin performansını gerçekçi bir aralıkta irdelenmek amacıyla belirlenmiştir. Bağımsız değişkenlerin alt ve üst sınırları, istatistiksel modelin tanımlanması kısmında detaylı olarak açıklanmıştır. Bu sınırlar, modelin geçerlilik aralığını ve tahmin gücünü belirlemek açısından önemlidir.

Varsayımlar

İstatistiksel analizlerde kullanılan yanıt parametresinin belirlenmesinde, sonlu elemanlar analizinden elde edilen taşıma gücü değeri temel alınmıştır. Bu analizler yapılırken, zemin ortamının düzlem-deformasyon koşullarına uygun olduğu varsayılmıştır. Bu varsayım, analizin basitleştirilmesi ve hesaplama sürecinin optimize edilmesi için yapılmıştır. Düzlem-deformasyon koşulları, zemin içerisindeki gerilme ve şekil değiştirmelerinin tek bir düzlemde gerçekleştiği durumları ifade etmektedir. Bu varsayım, çoğu geoteknik problem için kabul edilebilir bir yaklaşım sağlamaktadır.

Terim ve Tanımları

Tez çalışmasının açıklanmasında geoteknik literatüründe yaygın olarak kullanılan bir dizi terim kullanılmıştır. Bu terimlerin açıklamaları, ilgili bölümler içerisinde detaylı bir şekilde sunulmuştur.



BİRİNCİ BÖLÜM

1. KURAMSAL ÇERÇEVE

Geoteknik mühendisliği, yapıların zeminle etkileşimini inceleyerek güvenli ve ekonomik tasarımlar geliştirmeyi amaçlar. Temel tasarımı ve zemin taşıma gücünün analizi, geoteknik mühendisliğinin temel unsurlarıdır (Bowles, 1996). Yapıların güvenliği ve uzun ömürlülüğü, büyük ölçüde zemin taşıma kapasitesine bağlıdır. Bu nedenle, sıkı temellerin nihai taşıma kapasitesinin doğru bir şekilde belirlenmesi, temel mühendisliği için hayati önem taşır.

Yüzeysel temeller, yapı yüklerini zemine doğrudan ileten temel türleridir. Tasarım aşamasında iki temel kriter göz önünde bulundurulur: Yapı güvenliği için temel zemininin taşıma kapasitesi aşılmamalı ve temelde oluşacak oturmaların, yapının kullanım amacına uygun sınırlar içinde kalması sağlanmalıdır (Das, 2010). Yapıların stabilitesi ve performansı, temel zemininin yük taşıma kapasitesine bağlıdır. Bu nedenle, inşaat mühendisleri, zemin taşıma kapasitesini yapı tasarımında titizlikle değerlendirirler (Terzaghi ve Peck, 1967). Şevlere yakın temellerin taşıma gücü konusu, literatürde sınırlı sayıda çalışmayla incelenmiştir (Meyerhof, 1963; Menard, 1964; Chen, 1975; Shields vd., 1977; Bauer vd., 1981; Gemperline, 1988; Saran vd., 1989; Garnier vd., 1994). Bu alandaki araştırmalar, geoteknik mühendisliğine önemli katkılar sunacaktır.

1.1. ŞEVE OTURAN TEMELLERDE TAŞIMA GÜCÜ HESAPLAMALARI

İnşaat mühendisliğinde yapıların uzun ömürlü ve stabil olması esastır (Das, 2011). Ancak, topografik özellikler veya arazi kısıtları nedeniyle eğimli zeminler üzerine inşaat yapmak gerekebilir. Bu tür arazilerde temel tasarımı ve yapısal güvenliğin sağlanması önemli zorluklar ortaya koyar (Bowles, 1996).

Eğimli zeminlerde temel planlaması yapılırken, zeminin taşıma kapasitesi ve yerçekimi kuvveti gibi faktörler dikkatlice değerlendirilmelidir (Akçay ve Sivrikaya, 2023). Eğim, zemindeki gerilme dağılımını etkileyerek temelin kayma ve devrilme riskini artırabilir (Terzaghi, 1943). Ayrıca, eğimli zeminlerde oturma problemleri ve erozyon riski de daha yüksektir. Bu nedenle, eğimli zeminlerde temel tasarımı yaparken zemin etüdü ve analizleri önemlidir (Coduto, 2001).

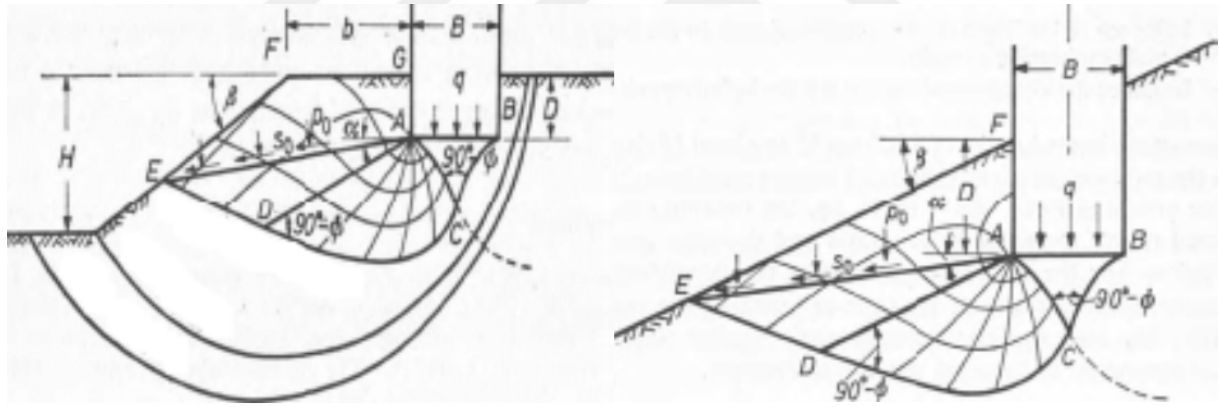
Eğimli zeminlerde güvenli ve stabil yapılar inşa etmek için farklı temel tipleri ve zemin iyileştirme teknikleri kullanılabilir. İstinat duvarları, kazık temeller ve zemin ankajları

sıklıkla tercih edilen çözümler arasındadır (Das, 2011). Zemin sıkıştırma, enjeksiyon ve drenaj gibi zemin iyileştirme yöntemleri de zeminin taşıma gücünü artırmak ve oturma problemlerini azaltmak için kullanılabilir (Bowles, 1996).

Düz zeminlerdeki temellerin taşıma kapasitesini etkileyen faktörler iyi anlaşılmıştır (Terzaghi, 1943; Meyerhof, 1951, 1963). Ancak, eğimli zeminlerde temellerin taşıma kapasitesi daha karmaşıktır ve bu konuda daha az çalışma bulunmaktadır (Sivrikaya, 2021).

Şevli zeminlerde, temelin altındaki gerilme dağılımı ve kayma yüzeylerinin oluşumu düz zeminlerden farklıdır. Bu nedenle, eğimli zeminlerde inşa edilen temellerin taşıma kapasitesini hesaplamak için özel yöntemler ve faktörler kullanılmalıdır. Meyerhof (1955), şevin tepesine veya şev yüzeyine inşa edilen şerit temellerin taşıma kapasitesini incelemiş ve bu durumlar için göçme yüzeylerini belirlemiştir (Leshchinsky, 2015).

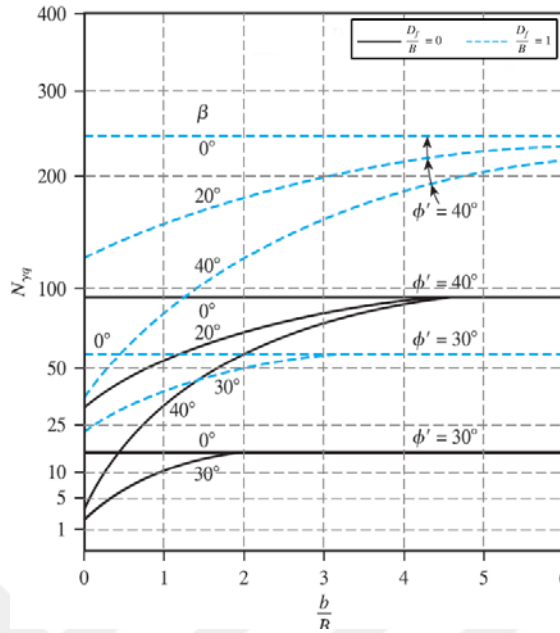
Şekil 1’de gösterilen göçme yüzeyleri, şevli zeminlerde temel davranışını anlamak için önemlidir ve temelin geometrisine, zemin özelliklerine ve yükleme koşullarına bağlı olarak değişebilir. Meyerhof’un çalışması, bu faktörlerin taşıma kapasitesine etkisini analiz etmek ve daha güvenli temel tasarımları yapmak için bir çerçeve sağlamaktadır.



Şekil 1: Şevin Üzerine ve Şev Yüzeyine İnşa Edilen Şerit Temelin Yakınında Plastik Bölgeler ve Kayma Yüzeyleri (Meyerhof, 1955)

Meyerhof (1955), şevli zeminlerde inşa edilen şerit temellerin nihai taşıma kapasitesini hesaplamak için özel bir formül geliştirerek zemin mekaniği alanına önemli bir katkı sağlamıştır. Bu formül, zeminin birim hacim ağırlığı (γ), temel genişliği (B) ve şevli durumdaki zeminin taşıma gücü faktörü gibi önemli parametreleri içerir. Formül şu şekildedir: $q_u = 0.5\gamma B N_{\gamma q}$. Bu formüldeki $N_{\gamma q}$ faktörü, şevin eğim açısı (β), zeminin içsel sürtünme açısı (ϕ), temel derinliğinin temel genişliğine oranı (D_f / B) ve temelin şev alt kotuna olan mesafesinin temel genişliğine oranı (b / B) gibi faktörlere bağlı olarak değişir.

Şekil 2’de, kohezyonsuz şevli zeminler için bu faktörlerin $N_{\gamma q}$ üzerindeki etkisi grafiksel olarak gösterilmektedir.



Şekil 2: Meyerhof’a Göre Kohezyonsuz Şevli Zemin Tepesine İnşa Edilen Şerit Temelin $N_{\gamma q}$ Katsayısının B , ϕ , b/B ve D_f/B İle İlişkisi (Das, 1999)

Şekil 2’yi incelediğimizde, şevin eğim açısı (β) arttıkça $N_{\gamma q}$ faktörünün azaldığını, yani zeminin taşıma kapasitesinin düştüğünü görürüz. Diğer taraftan, zeminin içsel sürtünme açısı (ϕ) arttıkça $N_{\gamma q}$ faktörü de artar, bu da daha yüksek içsel sürtünme açısına sahip zeminlerin daha yüksek taşıma kapasitesine sahip olduğunu gösterir. Ayrıca, temelin şevden uzaklaşmasıyla (b/B oranının artmasıyla) $N_{\gamma q}$ faktörü ve dolayısıyla taşıma kapasitesi artar. Meyerhof’un bu çalışması, şevli zeminlerdeki taşıma kapasitesini etkileyen faktörleri ve bunların etkileşimini analiz ederek, daha güvenli ve ekonomik temel tasarımları yapılmasına olanak tanır.

Meyerhof (1955), şevli zeminlerde inşa edilen şerit temellerin nihai taşıma kapasitesini hesaplamak için önemli bir adım atarak, zeminin birim hacim ağırlığı, temel genişliği ve şevli durumdaki zeminin taşıma gücü katsayıları gibi faktörleri içeren bir bağıntı geliştirmiştir. Bu bağıntıda, q_u , temelin taşıyabileceği maksimum yükü temsil eden nihai taşıma kapasitesini ifade eder ve kN/m^2 birimiyle ölçülür. γ sembolü, temel zeminin birim hacim ağırlığını (kN/m^3) ve B sembolü, temelin genişliğini (m) temsil eder. $N_{\gamma q}$ ise, şevli zemin koşullarını dikkate alan boyutsuz bir faktör olan zeminin taşıma gücü faktörünü temsil eder ve zeminin içsel sürtünme açısı, şevin eğim açısı ve temelin şevden olan uzaklığı gibi parametrelere bağlı olarak değişir.

Meyerhof'un bu öncü çalışması, Hansen (1970) ve Vesic (1973) gibi araştırmacılar tarafından daha da geliştirilmiştir. Hansen, Meyerhof'un bağıntısını temel alarak, temel taban eğim faktörlerini (b) ve zemin eğim faktörlerini (g) de hesaba katan daha kapsamlı bir formül geliştirmiştir. Bu sayede, taşıma gücü hesaplamaları daha detaylı ve gerçekçi hale gelmiştir. Vesic ise, Hansen'in yöntemine benzer bir yaklaşım önermiş, ancak taşıma gücü faktörü (N_γ) değerinin hesaplanmasında ve diğer bazı faktörlerin belirlenmesinde farklılıklar göstermiştir (Sivrikaya, 2021). Bu farklılıklar, Vesic'in yönteminin bazı durumlarda daha doğru sonuçlar vermesini sağlayabilir.

Hansen (1970) ve Vesic (1973), şevli zeminlerde temel tasarımı için önemli bir adım atarak, zeminin taşıma gücünü daha doğru ve kapsamlı bir şekilde hesaplamaya olanak tanıyan denklemler geliştirmişlerdir. Bu denklemler, zemin ve temel geometrisindeki çeşitli parametrelerin taşıma kapasitesi üzerindeki etkilerini değerlendirmede kullanılmaktadır.

$$q_u = cN_c s_c d_c i_c g_c b_c + \sigma_0 N_q s_q d_q i_q g_q b_q + 0.5\gamma B N_\gamma s_\gamma d_\gamma i_\gamma g_\gamma b_\gamma \quad (4)$$

Hansen (1970) tarafından geliştirilen taşıma gücü denkleminde, q_u sembolü temelin nihai taşıma kapasitesini (kPa) ifade eder. Denklemden ayrıca, B temel genişliğini (m), σ_0 temel tabanındaki efektif gerilmeyi (kPa), c temel zeminin kohezyonunu (kPa) ve (γ) zeminin birim hacim ağırlığını (kN/m³) temsil eder. N_c , N_q ve N_γ sembolleri ise temel zeminin içsel sürtünme direnci açısına bağlı taşıma kapasitesi katsayılarını gösterir. Denklemden ayrıca, şekil faktörleri (s_c, s_q, s_γ), yük eğim faktörleri (i_c, i_q, i_γ), derinlik faktörleri (d_c, d_q, d_γ), zemin eğim faktörleri (g_c, g_q, g_γ) ve taban eğim faktörleri (b_c, b_q, b_γ) de yer alır. Bu faktörler, temel geometrisi, yük durumu ve zemin koşulları gibi çeşitli etkenlerin taşıma kapasitesine etkisini hesaba katmak için kullanılır.

Şevli zeminlere inşa edilen temellerin nihai taşıma kapasitesi, geoteknik mühendisliğinde karmaşık bir problemdir ve bu nedenle kapsamlı araştırmalara konu olmuştur (Akbay vd., 2018). Taşıma kapasitesini etkileyen faktörleri analiz etmek ve zeminin davranışını daha iyi anlamak için farklı yöntemler kullanılmıştır.

Kayma Çizgisi Metodu, zeminin potansiyel göçme yüzeylerini belirleyerek limit denge analizleri yaparak taşıma kapasitesini tahmin eder (Sokolovski, 1960; Chen, 1975). Limit Analiz Yöntemleri ise üst ve alt sınır teoremlerini kullanarak taşıma kapasitesi için sınırlar belirler (Lysmer, 1970; Davis ve Booker, 1973; Chen, 1975; Kusakabe vd., 1981; Michalowski, 1989; Farzaneh vd., 2008; Shiau vd., 2011; Modifi vd., 2014). Limit Denge Analizleri, zeminin kayma direncini ve temelin üzerine etkileyen kuvvetleri dikkate alarak

güvenlik faktörlerini hesaplar (Narita ve Yamaguchi, 1990; Motta ve Castelli, 2008). Fiziksel Modelleme Teknikleri, ölçeklendirilmiş modeller kullanarak gerçek zemin koşullarını simüle eder ve taşıma kapasitesi ve oturma gibi parametreleri ölçer (Gemperline, 1988; Shields vd., 1990).

Bunların yanı sıra, Gerilme Karakteristikleri Yöntemi (Graham vd., 1987), Akma Tasarım Teorisi (Buhan ve Garnier, 1994, 1998) ve Sonlu Elemanlar Yöntemi (Kleeman ve Sloan, 1995; Krabbenhoft vd., 2005; Georgiadis vd., 2008; Shiau vd., 2011) gibi teknikler de kullanılmaktadır. Saha Uygulamaları ise bu alandaki teorik ve deneysel yaklaşımlara önemli katkılar sağlamıştır (Shields vd., 1977).

Şevli zeminlere inşa edilen temellerin nihai taşıma kapasitesini belirlemek için farklı yöntemler mevcuttur ve bu yöntemler, zeminin karmaşık davranışını anlamamıza ve daha güvenli temel tasarımları yapmamıza yardımcı olmaktadır.

Şevli zeminler üzerine inşa edilen temellerin taşıma kapasitesi üzerine yapılan çalışmalar, hem analitik hem de sayısal yöntemler kullanarak bu alanda önemli bir bilgi birikimi oluşturmuştur. Farklı zemin modelleri, temel geometrileri ve yükleme koşulları için yapılan analizler, şevli zeminlerde temel tasarımında daha güvenilir ve ekonomik çözümler elde edilmesini sağlamıştır. Bu sayede, mühendisler eğimli zeminlerde daha güvenli yapılar inşa edebilmekte ve zemin kaynaklı riskleri en aza indirebilmektedir.

Kusakabe vd. (1981), yüzeysel temellerin taşıma kapasitesi alanında önemli bir çalışma yaparak, kohezyonlu ve kohezyonsuz zeminler üzerinde, yatay zemine inşa edilen temellerin nihai taşıma kapasitesini araştırmışlardır. Üst sınır analiz yöntemini kullanarak, taşıma kapasitesindeki azalmalara odaklanan boyutsuz faktörlere dayalı yeni bir tasarım şeması geliştirmişlerdir.

Üst sınır analiz yöntemi, zeminin gerçek taşıma kapasitesinden daha yüksek bir değer veren bir yaklaşım sunarak tasarımda güvenli tarafta kalınmasını sağlar. Kusakabe vd. (1981), bu yöntemi kullanarak, zeminin kohezyonu, içsel sürtünme açısı, temelin boyutları ve şekli gibi parametrelerin taşıma kapasitesine etkisini daha doğru bir şekilde yansıtan boyutsuz faktörler türetmişlerdir.

Boyutsuz faktörler, farklı zemin ve temel koşullarını tek bir grafik veya tabloda göstermeyi mümkün kılarak, mühendislerin farklı durumlar için taşıma kapasitesini hızlı ve kolay bir şekilde tahmin etmelerini sağlar. Ayrıca, boyutsuz faktörler kullanılarak geliştirilen tasarım şeması, daha ekonomik temeller tasarlamak için de kullanılabilir.

Griffiths (1982), şevli zeminlerde $c'-\phi'$ zeminlerin (yani hem kohezyona hem de içsel sürtünmeye sahip zeminlerin) nihai taşıma kapasitesini incelemek için sonlu elemanlar yöntemi (SEY) kullanarak kapsamlı bir sayısal analiz çalışması gerçekleştirmiştir. Bu çalışma, eğimli zeminlerde temel davranışını anlamak ve taşıma kapasitesini daha doğru bir şekilde tahmin etmek amacıyla yapılmıştır.

Griffiths'in (1982) çalışmasında, farklı şev açıları, temel geometrileri ve zemin özellikleri için Sonlu Elemanlar Yöntemi (SEY) modelleri oluşturulmuş ve analizler yapılarak şevli zeminlerde inşa edilen temellerin taşıma kapasitesi ile ilgili makul sonuçlar elde edilmiştir. SEY ile elde edilen taşıma kapasitesi değerleri, deneysel veriler ve diğer teorik yöntemlerle uyumlu bulunmuştur.

Ancak, Griffiths'in (1982) çalışmasında, özellikle taşıma gücü faktörlerinden N_q değerinin hesaplanmasında yakınsama problemleri yaşanmıştır. N_q faktörü, zeminin sürşarj yüküne bağlı olarak taşıma kapasitesine katkıda bulunan bir faktördür. Yakınsama problemleri, SEY analizlerinde bazı durumlarda çözümün istenen doğrulukta elde edilememesi anlamına gelir.

Azzouz vd. (1983), kohezyonlu zeminlerden oluşan şevlere inşa edilen temellerin taşıma kapasitesini incelemek için kapsamlı bir araştırma yürütmüştür. Çalışmada, hem iki boyutlu (düzlem şekil değiştirme) hem de üç boyutlu analizler yaparak şerit ve kare temellerin davranışı incelenmiştir.

İki boyutlu analizlerde, sonsuz uzunluktaki bir şerit temel ele alınarak yük altında zeminin deformasyonu ve göçmesi incelenmiş ve limit analiz yöntemi kullanılarak göçmeye neden olan yükün büyüklüğü belirlenmiştir (Azzouz vd., 1983). Üç boyutlu analizlerde ise, kare temeller kullanılarak şevlerin stabilite analizi yapılmış ve temelin şeklinin ve boyutunun taşıma kapasitesine etkisi dikkate alınmıştır.

Araştırmanın önemli bir bulgusu, iki boyutlu analizlerin, üç boyutlu analizlere kıyasla daha kaba sonuçlar üretmesidir. Bu durum, iki boyutlu analizlerde yapılan basitleştirmeler ve gerçek zemin davranışının tam olarak yansıtılamaması nedeniyledir. Ancak, iki boyutlu analizlerin sonuçları, üç boyutlu analizlerin sonuçlarıyla tutarlılık göstermektedir. Bu da, iki boyutlu analizlerin, özellikle ön tasarım aşamasında, hızlı ve yaklaşık sonuçlar elde etmek için kullanılabileceğini göstermektedir.

Chen vd. (2007), şevli zeminlerde deprem kuvvetlerinin temel taşıma kapasitesi üzerindeki etkisini araştıran önemli bir çalışmaya imza atmışlardır. Eğimli bir zemine inşa edilen şerit temellerin deprem koşulları altındaki taşıma kapasitesi, yarı statik analiz yöntemi

kullanılarak incelenmiştir. Araştırmacılar, analizlerinde ara asal gerilmeleri de dikkate alarak daha gerçekçi ve hassas sonuçlar elde etmeyi hedeflemişlerdir. Çalışma sonucunda, statik ve dinamik taşıma kapasitesi faktörlerinin çeşitli parametrelerle ilişkilendirildiği eğriler elde edilmiştir. Bu eğriler, deprem ivmesi, şevim eğim açısı, zeminin içsel sürtünme açısı ve temelin derinliği gibi faktörlerin taşıma kapasitesine etkisini görselleştirmeye ve anlamaya yardımcı olur. Ayrıca, limit denge teorisine dayalı olarak, zeminlerin sürşarj, kohezyon ve öz ağırlığıyla ilişkili statik taşıma kapasitesi faktörleri (N_q , N_c , N_γ) ile dinamik taşıma kapasitesi faktörleri (N_{qd} , N_{cd} , $N_{\gamma d}$) hesaplamak için formüller sunulmuştur.

Yang vd. (2007), şevli zeminlere inşa edilen temellerin taşıma kapasitesini analiz etmek için enerji yayılım yöntemi ve model deneylerini bir araya getirmiştir. Çalışmada, temellerin yük altında nasıl enerji yaydığı ve bu enerji dağılımının taşıma kapasitesini nasıl etkilediği incelenmiştir.

Araştırmacılar, laboratuvar ortamında şerit temellerin yüklenmesiyle şevlerin performansını değerlendirmek için tam ölçekli zemin model deneyleri yapmışlardır. Ayrıca, sayısal analizler sonlu elemanlar yöntemi ile yapılmış ve elde edilen sonuçlar model deney sonuçları ile karşılaştırılarak sayısal modelin doğruluğu ve güvenilirliği değerlendirilmiştir.

Yang vd. (2007) çalışmasının en önemli bulgusu, limit analiz yöntemlerinin model deneylerle elde edilen sonuçlarla büyük ölçüde uyumlu olduğudur. Bu, limit analiz yöntemlerinin şevli zeminlerde temel taşıma kapasitesini tahmin etmede etkili bir şekilde kullanılabileceğini göstermektedir. Ayrıca, çalışma, enerji yayılım yönteminin de şevli zeminlere inşa edilen şerit temellerin taşıma kapasitesini tahmin etmede etkili bir yöntem olduğunu ortaya koymuştur.

Modifi vd. (2014), şevlere bitişik şerit temellerin davranışını anlamak ve güvenli tasarım parametreleri belirlemek amacıyla, temelin taşıma kapasitesini ve şev-temel sisteminin genel stabilitesini etkileyen faktörleri analiz etmişlerdir. Çalışmada, temelin zemine uyguladığı ortalama sınır basıncı ile şev geometrisi ve zemin özellikleri arasındaki ilişkiyi ortaya koymak için boyutsuz parametreler kullanılmıştır. Lineer sonlu elemanlar yöntemi ile zemin ve temel davranışı modellenmiş ve zeminin sürtünme açısı gibi kritik parametrelerin taşıma kapasitesine etkisi incelenerek elde edilen bulgular tablolar halinde düzenlenmiştir.

Yu (2018), şevli zeminlere inşa edilen temellerin taşıma gücünü araştırarak bu alanda yeni bir bakış açısı sunmuştur. Limit analiz ve limit denge yöntemlerini bir araya getirerek, üst sınır çözümüne odaklanarak zeminin taşıma kapasitesini güvenli tarafta tahmin etmeyi amaçlamıştır. Çalışmada, farklı temel derinlikleri için gerilme katsayıları belirlenmiş ve bu

katsayıların taşıma kapasitesine etkisi analiz edilmiştir. Ayrıca, zeminin içsel sürtünme açısı, şev eğimi, temelin şev tepesine olan mesafesi ve temel derinliği gibi faktörlerin nihai taşıma kapasitesine etkileri incelenmiştir. Yu'nun (2018) çalışmasının en önemli katkılarından biri, şev arkasındaki zemin eğiminin temel taşıma kapasitesi üzerindeki etkisini de dikkate almasıdır.

Ebid vd. (2021), şevli zeminlerde temel taşıma kapasitesini etkileyen faktörleri ve bu kapasitenin tahmininde yapay zekâ tekniklerinin kullanımını araştırmıştır. Çalışma, temel genişliği, temel derinliği, temelin şevden uzaklığı, zeminin birim hacim ağırlığı, şev eğimi, içsel sürtünme açısı, kohezyon ve aşırı yük basıncı gibi faktörlerin taşıma kapasitesine etkisini incelemiştir.

Araştırmacılar, şev üzerindeki veya şev bitişiğindeki temellerin taşıma kapasitesini tahmin etmek için genetik programlama (GP), evrimsel polinom regresyonu (EPR) ve yapay sinir ağı (YSA) gibi akıllı tekniklerden yararlanmışlardır. Çalışmada elde edilen modellerin performansları değerlendirilmiş ve sonuçlar Prandtl'ın hesaplama yöntemleri ile karşılaştırılmıştır. Karşılaştırma sonuçlarına göre, GP, EPR ve YSA tekniklerinin, Prandtl'ın klasik yaklaşımlarına kıyasla daha doğru ve üstün sonuçlar verdiği, özellikle YSA yönteminin daha yüksek doğrulukla sonuçlar ürettiği belirlenmiştir (Ebid vd., 2021).

İKİNCİ BÖLÜM

2. YÖNTEM

Yanıt yüzey yöntemi (YYY), karmaşık sistemlerin davranışlarını anlamak ve optimize etmek için kullanılan etkili bir istatistiksel araçtır. Özellikle birden fazla faktörün etkileşim halinde olduğu ve bu faktörlerin bir çıktı üzerindeki etkisinin incelenmesinin gerektiği durumlarda faydalıdır. YYY, mühendislik, kimya, biyoloji ve ekonomi gibi farklı disiplinlerde süreç optimizasyonu, kalite iyileştirme ve modelleme gibi amaçlar için yaygın olarak kullanılmaktadır.

Bu yöntemin temel prensibi, bağımsız değişkenlerin (faktörler) bir yanıt üzerindeki etkilerini ve bu faktörler arasındaki etkileşimleri matematiksel modeller kullanarak analiz etmektir. Bu modeller genellikle ikinci dereceden polinomlar şeklindedir ve sistemin doğrusal ve doğrusal olmayan ilişkilerini anlamaya yardımcı olur. Yanıt yüzeyi, faktörler arasındaki etkileşimleri ve faktörlerin kareli terimlerini de içerebilir, böylece faktörlerin bireysel ve birleşik etkilerini daha kapsamlı bir şekilde değerlendirme olanağı sağlar.

YYY'nin en önemli avantajlarından biri, araştırmacılara çok sayıda faktör ve etkileşim arasında en iyi çözümü bulma olanağı sağlamasıdır. Bu, özellikle deneysel çalışmaların maliyetli veya zaman alıcı olduğu durumlarda büyük bir avantajdır. YYY, deney sayısını azaltarak ve en uygun sonuçları elde etmek için faktörlerin hangi seviyelerde ayarlanması gerektiği konusunda bilgi sağlayarak verimliliği artırabilir.

YYY'nin kullanım alanları oldukça geniştir. Örneğin, bir üretim sürecinde ürün kalitesini etkileyen faktörleri optimize etmek, bir kimyasal reaksiyonun verimini artırmak veya bir ilaç tedavisinin en etkili dozunu belirlemek gibi amaçlar için kullanılabilir.

2.1. MODEL KURULUMU VE POLİNOMLAR

Yanıt yüzey yöntemi (YYY), deneysel verilerden elde edilen bilgileri kullanarak bir sistemin davranışını temsil eden matematiksel bir model oluşturur. Bu model, sistemin çıktısı (yanıt) ile girdileri (faktörler) arasındaki ilişkiyi tanımlar ve faktörlerin yanıt üzerindeki doğrusal, doğrusal olmayan ve etkileşimsel etkilerini dikkate alarak kapsamlı bir analiz sağlar.

YYY'de model oluşturmak için genellikle ikinci dereceden polinomlar kullanılır. Bu polinomlar, bağımlı değişkeni (Y) bağımsız değişkenler ($x_1, x_2, \dots, x_k$) cinsinden ifade eden bir fonksiyon şeklindedir. İkinci dereceden polinomlar, sistemdeki eğrisellikleri ve

etkileşimleri yakalayabilme yetenekleri sayesinde YYY'de sıklıkla tercih edilir. Model denklemi, genellikle şu şekilde ifade edilir.

$$Y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_k x_k + \beta_{11} x_1^2 + \beta_{22} x_2^2 + \dots + \beta_{kk} x_k^2 + \beta_{12} x_1 x_2 + \beta_{13} x_1 x_3 + \dots + \beta_{(k-1)k} x_{(k-1)} x_k \quad (5)$$

Bu denklemde, Y bağımlı değişkeni, x_i bağımsız değişkenleri, β_0 sabit terimi, β_i doğrusal terimlerin katsayılarını, β_{ii} kareli terimlerin katsayılarını ve β_{ij} etkileşim terimlerinin katsayılarını temsil eder.

Polinom modelinin oluşturulması, deneysel verilerin toplanması ve analiz edilmesiyle gerçekleştirilir. Deneyler, faktörlerin farklı seviyelerinde yapılarak yanıt değerleri elde edilir ve bu veriler regresyon analizi gibi istatistiksel yöntemler kullanılarak polinom modele uyarlanır. Elde edilen polinom model, sistemin davranışını anlamak ve optimize etmek için kullanılabilir. Model, faktörlerin yanıt üzerindeki etkisini ve faktörler arasındaki etkileşimleri gösterir. Ayrıca, model kullanılarak yanıtın maksimum veya minimum olduğu optimum faktör seviyeleri belirlenebilir.

Yanıt yüzey yönteminde (YYY) model kurulumunun temel amacı, faktörlerin değişimlerinin yanıt üzerindeki etkisini anlamak ve istenen çıktıyı elde etmek için faktörlerin en uygun kombinasyonunu belirlemektir. Model, sistemin nasıl çalıştığını ve farklı faktörlerin bir araya geldiğinde nasıl bir sonuç yarattığını anlamamızı sağlar. YYY'de model oluşturulurken, genellikle ikinci dereceden polinomlar kullanılır. Ancak, bazı durumlarda, faktörler ve yanıt arasındaki ilişki daha karmaşık olabilir ve ikinci dereceden polinom modelleri yeterince doğru olmayabilir.

Montgomery (2001) tarafından belirtildiği gibi, daha karmaşık ilişkileri modellemek için daha yüksek dereceden polinomlar veya diğer fonksiyonel formlar kullanılabilir. Örneğin, kübik veya kuartik polinomlar, sistemdeki daha karmaşık eğrileri ve etkileşimleri daha iyi temsil edebilir. Ayrıca, logaritmik, üstel veya trigonometrik fonksiyonlar gibi doğrusal olmayan fonksiyonlar da kullanılabilir.

Modelin karmaşıklığı, sistemin doğasına, mevcut verilere ve istenen doğruluk seviyesine bağlı olarak belirlenir. Daha karmaşık modeller, daha fazla parametre içerir ve bu nedenle daha fazla veri gerektirir. Ayrıca, karmaşık modellerin yorumlanması daha zor olabilir. Bu nedenle, model seçimi yapılırken, basitlik ve doğruluk arasında bir denge kurulması önemlidir.

Sonuç olarak, YYY'de model kurulumu, sistemin davranışını anlamak ve optimize etmek için önemli bir adımdır. Modelin karmaşıklığı, sistemin karmaşıklığına ve istenen doğruluk seviyesine göre belirlenir. İkinci dereceden polinomlar genellikle yeterli olsa da,

daha karmaşık ilişkileri modellemek için daha yüksek dereceden polinomlar veya diğer fonksiyonel formlar da kullanılabilir.

2.2. OPTİMİZASYON İÇİN YANIT YÜZEY YÖNTEMİ

2.2.1. Yanıtın Maksimizasyonu veya Minimizasyonu

Yanıt yüzey yöntemi (YYY), bir sistemin çıktısını optimize etmek, yani mümkün olan en iyi sonucu elde etmek için kullanılan güçlü bir tekniktir. Bu optimizasyon süreci, genellikle yanıtın maksimize veya minimize edilmesi ve yanıtın spesifik bir hedefe ulaştırılması gibi hedeflere odaklanır. Örneğin, bir üretim sürecinde ürün kalitesini maksimize etmek veya maliyetleri minimize etmek gibi. YYY, bu hedefe ulaşmak için faktörlerin yanıt üzerindeki etkilerini ve etkileşimlerini analiz ederek optimum faktör kombinasyonunu belirler.

Bu süreçte ilk adım, deneysel verilerden elde edilen bilgilerle faktörler ve yanıt arasındaki ilişkiyi temsil eden bir matematiksel model oluşturmaktır. Bu model genellikle ikinci dereceden bir polinom formunda olur ve şu şekilde ifade edilebilir:

$$Y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_k x_k + \beta_{11} x_1^2 + \beta_{22} x_2^2 + \dots + \beta_{kk} x_k^2 + \beta_{12} x_1 x_2 + \beta_{13} x_1 x_3 + \dots + \beta_{(k-1)k} x_{(k-1)} x_k \quad (6)$$

Bu denklemde, Y bağımlı değişkeni (yanıt), x_i bağımsız değişkenleri (faktörleri) temsil eder. β_0 sabit terim, β_i doğrusal terimlerin katsayıları, β_{ii} karesel terimlerin katsayıları ve β_{ij} etkileşim terimlerinin katsayılarıdır.

Model oluşturulduktan sonra, yanıtın maksimum veya minimum olduğu noktayı bulmak için matematiksel optimizasyon teknikleri kullanılır. Bu teknikler, model denkleminin türevini alıp sıfıra eşitleyerek veya grafiksel yöntemler kullanarak optimum faktör değerlerini bulmayı içerir.

$$\frac{\partial Y}{\partial x_1} = \beta_1 + 2\beta_{11}x_1 + \beta_{12}x_2 = 0 \quad (7)$$

$$\frac{\partial Y}{\partial x_2} = \beta_2 + 2\beta_{22}x_2 + \beta_{12}x_1 = 0 \quad (8)$$

Bu denklemleri çözerek, yanıtın maksimum veya minimum olduğu x_1 ve x_2 değerleri bulunur.

2.2.2. Yanıtın Spesifik Bir Hedefe Ulaştırılması

Yanıt Yüzey Yöntemi (YYY), belirli bir çıktı değerine ulaşmak için faktörlerin nasıl ayarlanması gerektiğini belirlemeyi amaçlar. YYY, bu hedefe ulaşmak için faktörler ve yanıt arasındaki ilişkiyi modellemek için kullanılır. Model genellikle ikinci dereceden bir polinom formunda olur ve şu şekilde ifade edilebilir:

$$\hat{Y} = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} x_i^2 + \sum_{i=1}^{k-1} \sum_{j=i+1}^k \beta_{ij} x_i x_j \quad (9)$$

Yanıt yüzey yönteminde (YYY) spesifik bir hedef değere ulaşmak için oluşturulan model genellikle ikinci dereceden bir polinom formunda ifade edilir. Bu polinom denklemde, $\hat{Y}$, tahmin edilen yanıt değerini temsil eder. Modelin temelini oluşturan β_0 , sabit terimi ifade ederken, β_i , doğrusal terimlerin katsayılarını, β_{ii} ise karesel terimlerin katsayılarını temsil eder. Faktörler arasındaki etkileşimleri yakalayan terimlerin katsayıları ise β_{ij} ile gösterilir. Son olarak, x_i ve x_j , modelde yer alan bağımsız değişkenleri, yani faktörleri temsil eder. Model oluşturulduktan sonra, istenen çıktı değerine (hedef değer) ulaşmak için gerekli faktör ayarlarını belirlemek amacıyla Newton-Raphson yöntemi veya Gradyan İniş yöntemi gibi çeşitli sayısal yöntemler kullanılabilir. Bu yöntemler, iteratif bir şekilde model denklemini kullanarak hedef değere en yakın yanıt değerini veren faktör kombinasyonunu bulmayı amaçlar.

2.3. YANIT YÜZEY YÖNTEMİNİN UYGULAMA ADIMLARI

Yanıt yüzey yöntemi (YYY), karmaşık sistemlerin analizinde ve optimizasyonunda kullanılan etkili bir yöntemdir ve belirli adımlar izlenerek uygulanır. İlk olarak, incelenecek problem için bağımlı ve bağımsız değişkenler belirlenir. Bağımlı değişken, sistemin çıktısıdır ve genellikle optimize edilmesi istenen değişkendir. Bağımsız değişkenler ise sistemi etkileyen faktörlerdir. Sonrasında, faktöriyel tasarım veya merkezi bileşik tasarım (CCD) gibi deney tasarımı teknikleri kullanılarak veri toplanır. Deney tasarımı, faktörlerin farklı seviyelerde nasıl değiştirileceğini ve hangi kombinasyonlarda deneylerin yapılacağını belirler.

Üçüncü adımda, toplanan deneysel veriler kullanılarak yanıt yüzey modeline uygulanır. Genellikle ikinci dereceden bir model tercih edilir, ancak daha karmaşık ilişkileri modellemek için daha yüksek dereceden polinomlar veya diğer fonksiyonel formlar da kullanılabilir.

Model oluşturulduktan sonra, modelin doğruluğu ve güvenilirliği varyans analizi (ANOVA) ve R^2 değeri gibi istatistiksel kriterler kullanılarak test edilir. Son adımda ise, model, bağımlı değişkenin maksimum, minimum veya hedef değere ulaşmasını sağlayacak şekilde optimize edilir. Optimizasyon sonucunda elde edilen faktör değerleri,

2.4. DENEY TASARIMLARI

Yanıt yüzey yönteminde (YYY) deney tasarımları, faktörlerin etkilerini ve etkileşimlerini etkili bir şekilde incelemek için kritik öneme sahiptir. Faktörlerin hangi seviyelerde ve hangi kombinasyonlarda test edileceğini belirleyen deney tasarımı, toplanan verilerin kalitesini ve modelin doğruluğunu doğrudan etkiler. YYY’de kullanılan başlıca deney tasarımları şunlardır:

2.4.1. Tam Faktöriyel Tasarım

Tüm olası faktör seviyelerinin kombinasyonlarını test ederek faktörlerin etkilerini ve etkileşimlerini kapsamlı bir şekilde incelemeyi sağlar. Özellikle az sayıda faktör bulunduğu tercih edilir. Avantajı, faktörlerin ana etkilerinin yanı sıra tüm etkileşimlerin de tahmin edilmesine olanak tanımasıdır. Ancak, faktör sayısı arttıkça, gerekli deney sayısı hızla artar (Box ve Draper, 2007).

2.4.2. Yarı Faktöriyel Tasarım

Faktör sayısının fazla olduğu durumlarda, tam faktöriyel tasarımın gerektirdiği tüm kombinasyonları test etmek pratik olmayabilir. Yarı faktöriyel tasarım, faktörlerin kombinasyonlarının sadece bir kısmını test ederek daha hızlı ve verimli sonuçlar elde etmeyi sağlar. Özellikle faktör sayısının çok olduğu ve bazı etkileşimlerin ihmal edilebilir olduğu durumlarda uygundur (Montgomery, 2001).

2.4.3. Merkez Bileşik Tasarım (CCD)

Daha fazla doğruluk sağlamak amacıyla merkez noktalar, köşe noktalar ve ara noktalar içerir. Merkez noktalar, faktörlerin ortalama seviyelerinde yapılan deneyleri temsil eder ve modelin doğrusal olmayan etkilerini daha iyi yakalamaya yardımcı olur. Özellikle ikinci dereceden modellerin doğru bir şekilde tahmin edilmesi için idealdir (Myers, Montgomery ve Anderson-Cook, 2016).

2.5. MODEL PARAMETRELERİNİN TAHMİNİ VE İSTATİSTİKSEL TESTLER

Yanıt yüzey yönteminde (YYY) kurulan modelin parametreleri, genellikle en küçük kareler yöntemi ile tahmin edilir. Bu yöntem, modelin tahmin ettiği değerler ile gerçek değerler arasındaki farkların karelerinin toplamını minimize ederek en uygun parametre değerlerini bulur.

$$b = (X'X)^{-1} X'Y \quad (10)$$

Bu formülde, b , tahmin edilen parametreler vektörüdür. X , deneysel tasarım matrisidir ve faktörlerin düzeylerinin kombinasyonlarını içerir. Y ise gözlemlenen yanıt değerleri vektörüdür (Wu ve Hamada, 2009).

Modelin doğruluğunu test etmek ve anlamlılık düzeylerini belirlemek için çeşitli istatistiksel testler kullanılır. F-testi, modelin genel anlamlılığını test eder. t-testi, her bir parametrenin anlamlı olup olmadığını test eder. R-kare ise modelin açıklama gücünü ölçer.

2.6. YANIT YÜZEYLERİNİN GÖRSELLEŞTİRİLMESİ

Yanıt yüzeyi analizi, faktörler arasındaki ilişkileri daha iyi anlamak ve yorumlamak için grafiksel yöntemler kullanır. Özellikle iki veya üç faktörlü sistemlerde, bu grafikler oldukça faydalıdır.

Kontur grafikleri, iki faktörlü sistemlerde yanıt yüzeyinin düzlemsel bir gösterimini sağlar. Yanıt değişkeninin farklı düzeyleri, kontur çizgileriyle ifade edilir. Kontur grafikleri, optimum çözüm bölgesini ve faktörler arasındaki etkileşimleri görselleştirmek için kullanışlıdır (Myers, Montgomery ve Anderson-Cook, 2016).

3D yüzey grafikleri ise üç faktörlü sistemlerde kullanılır ve yanıt yüzeyini üç boyutlu bir grafik üzerinde bir yüzey olarak gösterir. Bu grafikler, yanıt yüzeyinin şeklini ve eğriliğini görselleştirmek ve optimum çözüm noktasını belirlemek için kullanışlıdır (Montgomery, 2001). Yanıt yüzeylerinin görselleştirilmesi, YYY'nin önemli bir parçasıdır ve optimizasyon sürecinde daha bilinçli kararlar alınmasını sağlar.

2.7. SONUÇLARIN YORUMLANMASI

Yanıt yüzey yönteminin (YYY) temel amaçlarından biri, bir sistemin veya sürecin performansını optimize etmektir (Myers ve Montgomery, 1995). Bu, belirli bir çıktı veya yanıt değişkenini maksimize etmek, minimize etmek veya belirli bir hedef değere ulaştırmak anlamına gelebilir. YYY, faktörler ve yanıt arasındaki karmaşık ilişkileri modelleyerek ve analiz ederek bu amaca ulaşmak için etkili bir yol sunar.

Optimizasyon sürecinde, ilk adımda oluşturulan model kullanılır. Bu model, faktörlerin yanıt üzerindeki etkilerini ve etkileşimlerini matematiksel olarak ifade eder. Modelin elde edilmesinin ardından, optimizasyon algoritmaları kullanılarak yanıt değişkeninin istenen değere ulaşmasını sağlayacak faktör kombinasyonları belirlenir (Box ve Draper, 1987). Örneğin, yanıtın maksimum veya minimum değerini bulmak için modelin türevleri alınarak sıfıra eşitlenir ve elde edilen denklemler çözülür (Khuri ve Cornell, 1987). Daha karmaşık modellerde veya kısıtlamaların olduğu durumlarda, doğrusal programlama

veya genetik algoritmalar gibi daha gelişmiş optimizasyon teknikleri kullanılabilir (Steuer, 1986).

Optimizasyon sürecinin bir diğer önemli parçası da sonuçların yorumlanmasıdır. Elde edilen optimum faktör değerleri, sistemin veya sürecin nasıl iyileştirilebileceği konusunda bilgi sağlar. Ancak, bu değerlerin pratik anlamda uygulanabilir olup olmadığı da değerlendirilmelidir. Örneğin, bazı faktörlerin belirli değerlere ayarlanması maliyetli veya fiziksel olarak imkansız olabilir. Bu gibi durumlarda, optimizasyon sonuçları, pratik kısıtlamalar da göz önünde bulundurularak yorumlanmalıdır (Montgomery, 2001).

Optimizasyonun yanı sıra, faktörlerin etkilerini ve etkileşimlerini daha derinlemesine incelemek için genellikle takip deneyleri yapılır (Montgomery, 2001). Bu deneyler, modelin doğruluğunu ve güvenilirliğini artırmak, ayrıca modelin tahmin yeteneğini geliştirmek için kullanılabilir. Takip deneyleri, aynı zamanda modelin sınırlamalarını ve eksikliklerini belirlemeye de yardımcı olabilir.

2.8. GEOTEKNİK MÜHENDİSLİĞİNDE YYY’NİN KULLANIM ALANLARI

Yanıt Yüzey Yöntemi (YYY), geoteknik mühendisliği problemlerinin çözümünde giderek artan bir öneme sahip güçlü bir istatistiksel tekniktir. YYY, zemin ve yapı davranışını etkileyen çok sayıda parametrenin karmaşık etkileşimlerini analiz ederek, sistemin genel davranışını daha iyi anlamamızı sağlar. Bu yöntem, özellikle zemin-yapı etkileşimi, temel tasarımı, zemin iyileştirme ve risk analizi gibi birçok farklı alanda başarılı bir şekilde uygulanmaktadır.

2.8.1. Temel Tasarımında YYY’nin Kullanımı

Temel taşıma kapasitesi, oturma ve stabilite gibi önemli temel parametrelerini etkileyen farklı faktörleri analiz etmek ve optimum temel boyutlarını ve geometrisini belirlemek için kullanılabilir.

2.8.2. Zemin İyileştirme Uygulamalarında YYY’nin Kullanımı

Zemin iyileştirme tekniklerinin etkinliğini değerlendirmek ve optimum iyileştirme parametrelerini belirlemek için kullanılabilir.

2.8.3. Zemin-Yapı Etkileşiminde YYY’nin Kullanımı

Zemin ve yapı arasındaki karmaşık etkileşimi modellemek ve yapının zemin üzerindeki etkisini analiz etmek için kullanılabilir.

2.8.4. Risk Analizlerinde YYY'nin Kullanımı

Geoteknik projelerdeki riskleri değerlendirmek ve olası olumsuz etkileri en aza indirmek için kullanılabilir.

Sivakumar ve Sriram (2017), zemin stabilizasyonunda kimyasal katkı maddelerinin etkinliğini YYY ile incelemişlerdir. Çalışmada, YYY'yi kullanarak zemin stabilizasyonunda kullanılan kimyasal katkı maddelerinin en verimli karışım oranlarını belirlemeyi hedeflemişlerdir. Araştırmacılar, farklı kimyasal katkı maddelerini ve karışım oranlarını faktör olarak ele almış ve zemin dayanımını yanıt olarak belirlemişlerdir. Deneysel çalışmalar sonucunda elde edilen veriler YYY ile analiz edilerek, zemin dayanımını maksimize eden optimum katkı maddesi ve karışım oranları belirlenmiştir.

Kumar ve Gupta (2014), zemin stabilizasyonunda çimento kullanımının optimizasyonuna odaklanan önemli bir çalışmaya imza atmışlardır. Çimento stabilizasyonu, zemine çimento eklenerek zeminin dayanımını, sertliğini ve diğer mekanik özelliklerini iyileştirmeyi amaçlar. Ancak, çimento miktarı, zemin tipi, su içeriği ve kür süresi gibi faktörler, stabilizasyonun etkinliğini önemli ölçüde etkiler. Bu nedenle, optimum stabilizasyon performansı için en uygun çimento miktarını ve diğer parametreleri belirlemek kritik öneme sahiptir.

Zhang vd. (2015), farklı iyileştirme tekniklerinin zemin taşıma kapasitesine etkisini derinlemesine incelemişlerdir. Çalışmada farklı iyileştirme tekniklerinin etkilerini analiz etmiş ve bu tekniklerin birlikte kullanılması durumunda zemin taşıma kapasitesinin daha da arttığını göstermişlerdir. Bu bulgu, zemin iyileştirme projelerinde farklı tekniklerin birleştirilmesinin önemli avantajlar sağlayabileceğini ortaya koymaktadır. Araştırmacılar, çalışmalarında Yanıt Yüzey Yöntemi'ni (YYY) kullanarak farklı iyileştirme tekniklerinin etkileşimini ve zemin taşıma kapasitesi üzerindeki birleşik etkilerini modellemişlerdir. YYY ile farklı iyileştirme tekniklerinin kombinasyonlarını analiz etmiş ve zemin taşıma kapasitesini maksimize eden optimum kombinasyonları belirlemişlerdir. Çalışmanın sonuçları, zemin iyileştirme projelerinde farklı tekniklerin birleştirilmesinin zemin taşıma kapasitesini önemli ölçüde artırabileceğini ve YYY'nin bu tür projelerin optimizasyonunda etkili bir araç olduğunu göstermiştir.

Rao ve Reddy (2017), zemin kompaksiyonu alanında önemli bir çalışmaya imza atarak, maksimum dayanım elde etmek için Yanıt Yüzey Yöntemi'nin (YYY) etkinliğini araştırmışlardır. Zemin kompaksiyonu, geoteknik mühendisliğinde zeminlerin mekanik özelliklerini iyileştirmek ve yapıların güvenli bir şekilde inşa edilmesini sağlamak için sıkça kullanılan bir yöntemdir. Kompaksiyon işlemi, zeminin boşluk oranını azaltarak ve

yoğunluğunu artırarak zeminin dayanımını, sertliğini ve stabilitesini iyileştirir. Ancak, kompaksiyonun etkinliği, zemin tipi, su içeriği, sıkıştırma enerjisi ve sıkıştırma yöntemi gibi birçok faktöre bağlıdır.

Rao ve Reddy (2017), çalışmalarında, zemin kompaksiyonunda maksimum dayanımın elde edilmesi için YYY'yi uygulamışlardır. Araştırmacılar, zemin tipi, su içeriği, sıkıştırma enerjisi ve sıkıştırma yöntemi gibi faktörleri deneysel olarak değiştirerek zemin dayanımını ölçmüşlerdir. Elde edilen veriler, YYY kullanılarak analiz edilmiş ve zemin dayanımını maksimize eden optimum kompaksiyon parametreleri belirlenmiştir.

Ranjith vd. (2018), zemin stabilizasyonu çalışmalarında Yanıt Yüzey Yöntemi'nin (YYY) öngörü yeteneğini ve taşıma kapasitesini iyileştirme potansiyelini değerlendirmişlerdir. Araştırmacılar, çalışmalarında, farklı zemin stabilizasyon tekniklerini ve stabilizasyon parametrelerini faktör olarak ele almış ve zeminin taşıma kapasitesini yanıt olarak belirlemişlerdir. Deneysel çalışmalar sonucunda elde edilen veriler, YYY kullanılarak analiz edilmiş ve zeminin taşıma kapasitesini maksimize eden optimum stabilizasyon parametreleri belirlenmiştir. Çalışmanın sonuçları, YYY'nin zemin stabilizasyonunda çok iyi bir öngörü yeteneğine sahip olduğunu ve zeminin taşıma kapasitesini artırma potansiyeline sahip olduğunu göstermiştir.

Prabhu ve Sharma (2019), çimentolu zemin stabilizasyonunda katkı maddelerinin karmaşık etkileşimlerini ve optimizasyonunu araştırmışlardır. Bu karmaşık etkileşimleri analiz etmek ve zemin-katkı etkileşimini optimize etmek için Yanıt Yüzey Yöntemi'ni (YYY) kullanmışlardır. Araştırmacılar, çalışmalarında, farklı çimento türlerini, katkı maddelerini ve karışım oranlarını faktör olarak ele almış ve zemin stabilizasyon performansını yanıt olarak belirlemişlerdir. Deneysel çalışmalar sonucunda elde edilen veriler, YYY kullanılarak analiz edilmiş ve zemin stabilizasyon performansını maksimize eden optimum çimento ve katkı maddesi kombinasyonları belirlenmiştir.

Sivakumar ve Sriram (2017), kimyasal katkı maddelerinin zemin stabilizasyonundaki rolünü ve optimum karışım oranlarını belirlemek için Yanıt Yüzey Yöntemi'ni (YYY) kullanmışlardır. Kumar ve Gupta (2014), çimento stabilizasyonu ile zemin dayanımını artırmaya yönelik bir model önermiş ve YYY ile en iyi sonuçların elde edilebileceğini göstermişlerdir. Zhang vd. (2015), farklı iyileştirme tekniklerinin zemin taşıma kapasitesine etkisini modellemiş ve bu tekniklerin birlikte kullanılmasıyla kapasitenin çok daha fazla artırılabilirliğini ortaya koymuşlardır. Gupta vd. (2014), çimento ile stabilize edilen zeminlerde dayanımın YYY ile optimize edilebileceğini kanıtlamışlardır. Rao ve Reddy (2017), zemin kompaksiyonunda maksimum dayanımın elde edilmesi için YYY'yi

uygulamışlardır. Ranjith vd. (2018), stabilizasyon çalışmalarında YYY'nin öngörü yeteneğini test etmiş ve bu yöntemin taşıma kapasitesini iyileştirme potansiyelini ortaya koymuşlardır. Singh ve Sharma (2014), zemin dayanımının iyileştirilmesinde şartların optimize edilmesini YYY ile detaylandırmışlardır.

Bu çalışmalar, zemin iyileştirme ve stabilizasyon süreçlerinin etkinliğini artırmak için kullanılan yöntemlerin ve parametrelerin nasıl yönetilmesi gerektiği konusunda önemli bilgiler sunmaktadır. YYY, bu çalışmalarda farklı faktörlerin etkileşimlerini analiz etmek, optimum çözümleri belirlemek ve daha verimli zemin iyileştirme çalışmaları yapmak için başarılı bir şekilde kullanılmıştır.

Yüzeysel temellerin taşıma kapasitesi, yapıların güvenliği ve stabilitesi için kritik bir öneme sahiptir. Optimum taşıma kapasitesini elde etmek için zemin ve temel arasındaki karmaşık etkileşimi anlamak ve çeşitli faktörleri dikkate almak gerekir. Yanıt Yüzey Yöntemi (YYY), bu faktörlerin etkileşimini analiz etmek ve temel taşıma kapasitesini optimize etmek için güçlü bir araçtır.

Modifi vd. (2014), temel geometrisinin taşıma kapasitesi üzerindeki etkisini analiz etmek için YYY'yi kullanmışlardır. Çalışmalarında, temel boyutları ve şekli gibi faktörlerin taşıma kapasitesine etkisi incelenmiş ve optimum temel boyutları belirlenmiştir.

Yu (2018) ise, şevli zeminlerdeki temel taşıma kapasitesini artırmak amacıyla yapılan bir çalışmada, zemin eğimi ve temel derinliğinin optimizasyonuna odaklanmıştır. Sonuçlar, şevli zeminlerde temel taşıma kapasitesinin, temel derinliği ve eğim açısının etkili bir şekilde optimizasyonu ile önemli ölçüde artırılabilirliğini göstermektedir. Bu çalışmalar, YYY'nin yüzeysel temellerin taşıma kapasitesinin optimizasyonunda etkin bir şekilde kullanılabileceğini göstermektedir.

2.9. İSTATİSTİKSEL İNCELEME AmACIYLA yyy KULLANAN ÇALIŞMALAR

Yanıt Yüzey Yöntemi (YYY), karmaşık sistemlerin analiz ve optimizasyonunda kullanılan etkili bir istatistiksel araçtır (Myers, Montgomery ve Anderson-Cook, 2016). YYY, birden fazla faktörün etkileşim halinde olduğu ve bu faktörlerin bir çıktı üzerindeki etkisinin incelenmesinin gerektiği durumlarda oldukça faydalıdır. YYY'nin temel çalışma prensibi, bir sistemin bağımlı değişkenine etkisi olan birden fazla bağımsız değişkenin optimal seviyelerini belirlemektir. YYY, bir sistemin çıktısını etkileyen faktörleri ve bu faktörlerin birbirleriyle olan etkileşimlerini analiz ederek, istenen çıktıya ulaşmak için faktörlerin hangi seviyelerde ayarlanması gerektiği konusunda bilgi sağlar. Aşağıda, YYY kullanılarak yapılan çeşitli çalışmalardan örnekler verilmiştir:

Adebayo vd. (2019), çalışmalarında, zeminin kohezyon, içsel sürtünme açısı ve su içeriği gibi temel parametrelerinin taşıma kapasitesine etkisini incelemişlerdir. Araştırmacılar, bu parametrelerin farklı kombinasyonları için deneyler ve sayısal analizler yaparak taşıma kapasitesindeki değişimleri gözlemlemişlerdir. Elde edilen veriler, Yanıt Yüzey Yöntemi (YYY) kullanılarak analiz edilmiştir. Çalışmanın sonuçları, zeminin kohezyon, içsel sürtünme açısı ve su içeriği gibi parametrelerinin taşıma kapasitesini önemli ölçüde etkilediğini ve bu parametrelerin optimizasyonunun yapısal güvenliği artırmak ve daha ekonomik tasarımlar yapmak için kritik öneme sahip olduğunu göstermiştir.

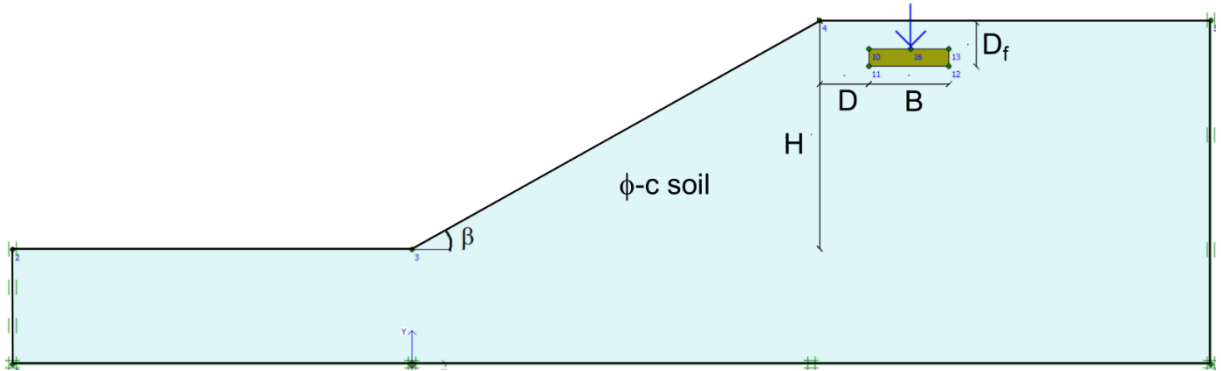
Rao ve Patel (2020), şev stabilitesini etkileyen önemli faktörleri inceleyen ve bu faktörlerin şev göçmelerine olan etkisini değerlendiren bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Çalışmada, şev stabilitesini etkileyen topografik eğim, zemin türü ve yeraltı su seviyesi faktörlerine odaklanılmıştır. Araştırmacılar, bu üç faktörün şev stabilitesine etkisini modellemek için sayısal analizler kullanmışlardır. Çalışma sonucunda, şev göçmelerini önlemek için önemli öneriler sunulmuştur.

Patel ve Ahmad (2021), zemin yüzeyindeki temel oturma miktarını tahmin etmek için saha koşullarına özgü bir model geliştirmişlerdir. Araştırmacılar, bu faktörlerin karmaşık etkileşimini modellemek ve saha koşullarına uygun bir tahmin modeli geliştirmek için ileri istatistiksel yöntemler kullanmışlardır.

ÜÇÜNCÜ BÖLÜM

3. BULGULAR

Yapılan çalışma kapsamında Şekil 4’de belirtilen şeve yakın ϕ -c zemine oturan şerit temelin taşıma gücü ve taşıma gücüne etki eden parametrelerin incelenmesi amaçlanmıştır. Şev yüksekliği (H), şev açısı (β), içsel sürtünme açısı (ϕ), kohezyon (c), temel genişliği (B), temel gömülme derinliği (D_f), temelin şeve mesafesi (D) parametrelerinin yüzeysel temelin taşıma gücü üzerindeki etkisi nümerik yaklaşımla irdelenmiştir. Çalışma kapsamında, H, β , ϕ , c, B, D_f , D parametreleri bağımsız değişken olarak tanımlanmış, zeminin nihai taşıma gücü değeri ise bağımlı değişken olarak değerlendirilmiştir. Bağımsız değişkenlerle bağımlı değişken arasındaki ilişki Yanıt Yüzey Yöntemi kullanılarak, istatistiksel analizlerle modellenmiştir. YYY kapsamında dikkate alınan sekiz adet bağımsız değişkenin farklı değer aldıkları tasarım matrisi oluşturulmuştur. Bu tasarım matrisine göre sonlu elemanlar modeli hazırlanmış, SE analizleri gerçekleştirilmiştir. Elde edilen taşıma gücü değerleri bağımlı değişken olarak belirlenmiştir. Çalışmada istatistiksel analiz ve sonlu elemanlar analizleri olmak üzere iki farklı yaklaşım kullanılmıştır. Tasarım matrisinin oluşturulmasında ve yanıt ile bağımsız değişkenler arasındaki ilişkinin YYY yaklaşımı ile kurulmasında Design Expert 12 yazılımı kullanılmıştır. Hazırlanan tasarım matrisine göre sonlu elemanlar analizinin gerçekleştirilmesinde Plaxis 8.6 sonlu elemanlar yazılımı kullanılmıştır.



Şekil 3: Çalışmada Dikkate Alınan Parametreler

3.1. YYY İLE TASARIM MATRİSİNİN ÇIKARILMASI

Yapılan çalışmanın ilk aşamasında tasarım matrisi elde edilmiştir. Bağımsız değişken olarak belirlenen H, β , ϕ , c, B, D_f , D parametrelerinin alt ve üst sınırları belirlenmiştir. Merkezi Kompozit Tasarım, α değeri 1 olarak belirlenerek (face centered), tasarım matrisi elde edilmiştir. Üç faktörlü tasarımda bağımsız değişkenlerin üst ve alt sınırları temsil eden

faktör noktaları, faktör sınırlarının ne kadar dışında olduğunu temsil eden eksenel (yıldız) noktalar ve girdi değişkenlerinin ortalama değerlerini temsil eden merkezi noktalar bulunmaktadır. Bu sınırlar, bağımsız değişkenlerin minimum, ortalama ve maksimum değerlerini temsil etmek için “-1”, “0” ve “+1” kodları ile kullanılmıştır. Tablo 5 ‘de analizlerde kullanılan bağımsız değişkenlerin minimum, maksimum ve ortalama değerleri verilmiştir. Belirlenen bağımsız değişkenler arasında yüzeysel temelin şev uzaklığı (D), ve şev yüksekliği (H) temel genişliğine bölünerek boyutsuz değerler olarak tanımlanmıştır. Bunun yanında temel derinliği (D_f) şev yüksekliğinden (H) daha derin olamayacağından hareketle şev yüksekliğine bölünmek suretiyle boyutsuz hale getirilmiştir. Parametrelerin boyutsuz hale getirilmesindeki amaç, temel genişliğinin değişken olabileceğinden hareketle, temel genişliği cinsinden diğer parametrelerin ifade edilmesi ve bu suretle sadeleştirme yapılmasıdır.

Tablo 1: Bağımsız Değişkenlerin Minimum, Maksimum ve Ortalama Değerleri

	X ₁ , (φ)	X ₂ , (B)	X ₃ , (D _f /H)	X ₄ , (D/B)	X ₅ , (H/B)	X ₇ , (β)	X ₈ , (c)
Birim	°	m	-	-	-	°	kN/m ²
Kodlanmış	Gerçek Değer						
-1	15	0.50	0	0	1.50	15	15
0	30	1.25	0.25	4	3.75	30	70
+1	45	2.00	0.50	2	6.00	45	125

Tablo 1’de verilen değerler dikkate alınarak Merkezi Kompozit Tasarım kullanılarak, α=1 (face centered) için elde edilen tasarım matrisi EK-1’de sunulmuştur. Tasarım matrisi bağımsız değişkenlerin minimum, maksimum ve ortalama değerleri için elde edilen 142 farklı durumu tanımlamaktadır. Her bir durum için hazırlanan sonlu elemanlar modelinin çözülmesi ile elde edilen limit taşıma gücü (kN/m²) yanıt olarak tanımlanmıştır. Sonlu elemanlar modeli, analizler sırasında yapılan kabuller ve model bilgileri ilgili bölümde açıklanacaktır.

3.2. SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ İLE YANITLARIN BELİRLENMESİ

Tasarım matrisinde yanıt olarak belirlenen sınır taşıma gücü değeri sonlu elemanlar analizi ile belirlenmiştir. Bu kapsamda YYY ile elde edilen tasarım matrisini oluşturan 142 durum için sonlu elemanlar modeli oluşturulmuştur. Her bir durum için çözüm yapılmış ve limit taşıma gücü belirlenmiştir. Analizlerde Plaxis 8.6 sonlu elemanlar programı kullanılmıştır. Düzlem-deformasyon koşulları altında iki boyutlu analizler gerçekleştirilmiştir. Zeminin elasto-plastik davranışı Mohr-Columb zemin modeli kullanılarak tanımlanmıştır. Zeminin gerilme-şekil değiştirme davranışının modellenmesinde altı düğümlü üçgen elemanlar kullanılmıştır. Zemin suyunun dikkate alınmadığı çalışmada, zemine ait birim hacim ağırlık değeri 20 kN/m³ olarak kabul edilmiştir. Lee vd. (2005), Mabrouki vd. (2010)

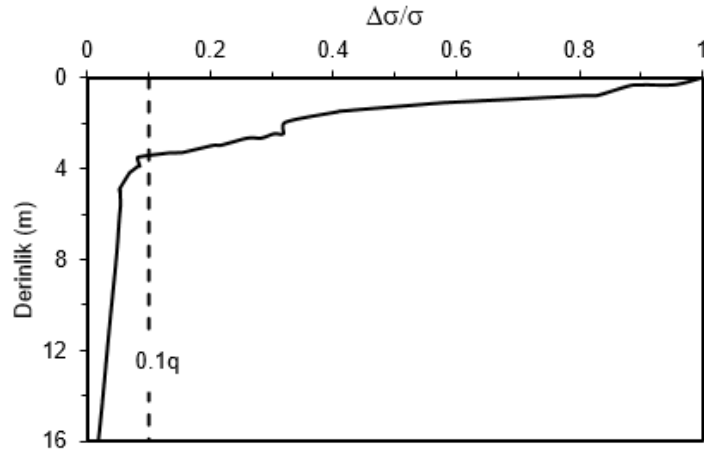
yapmış oldukları çalışmalarda Young modülü ve Poisson oranı değerlerinin temel oturumu (yerleşimi) üzerindeki etkisi belirgin olmasına rağmen, göçme yükü üzerinde bir etkisi bulunmadığını öne sürmüşlerdir. Çalışma kapsamında yapılan analizlerde limit taşıma gücü değeri dikkate alındığından, elastisite modülü ve zemin birim hacim ağırlığı değerleri sabit değerler olarak kullanılmıştır.

R_{inter} katsayısı Plaxis sonlu elamanlar programında ara yüzey elamanlarının rijitliğini kontrol eden bir parametredir. Bu katsayı zemin ile yapı arasında etkileşimin modellenmesinde kullanılmaktadır. Temel tabanı ile zemin arasındaki sürtünme, dayanım azalma oranı (R_{inter}) ile tanımlanmıştır. Oluşturulan modellerde dikkate alınan parametreler Tablo 2’de verilmiştir.

Tablo 2: Modellemede Dikkate Alınan Parametreler

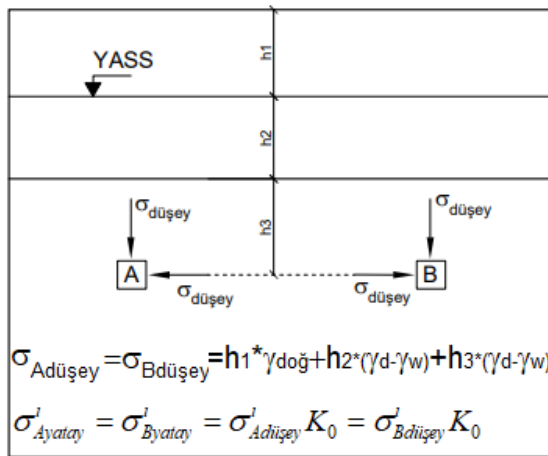
Malzeme modeli	Mohr–Coulomb
Doğal birim hacim ağırlık, (γ)	20 kN/m ³
Referans elastisite modülü, (E_{ref})	20000 kN/m ²
Poisson oranı, (ν)	0.35
Dayanım azaltma oranı, (R_{inter})	0.66
Genleşim açısı, (ψ)	$\phi-30^\circ$
İçsel sürtünme açısı, (ϕ)	Tasarım matrisi
Temel genişliği, (B)	Tasarım matrisi
Temel derinliği/Şev yüksekliği, (D_f/H)	Tasarım matrisi
Temelin şev mesafesi/Temel genişliği, (D/B)	Tasarım matrisi
Şev yüksekliği/Temel genişliği, (H/B)	Tasarım matrisi
Şev eğim açısı, (β)	Tasarım matrisi
Kohezyon, (c)	Tasarım matrisi

Modelin yatay yer değiştirmesi sınırlandırılmış ve alt sınır hem yatay hem de dikey eksenlerde kısıtlanmıştır. Çalışmada farklı boyutlarda çözümler yapıldığından boyut etkisinin analiz sonuçlarına etkisinin minimize edilmesi önem arz etmektedir. Bu kapsamda Çinicioğlu ve Erkli (2018) tarafından şev yakın yüzeysel temellerin numerik modellenmesinde önerilen boyutlar dikkate alınmıştır. Buna göre hazırlanan modelde şerit temelin sağında kalan sınırın temele göre konumu temel genişliğinin (B) bir fonksiyonu olarak tanımlanırken, sol sınırın şevin alt kenarına mesafesi tüm modeller için en az 12.5B olarak belirlenmiştir. Bunun yanında şevli zemin tabakasının altındaki zemin tabakasının kalınlığı en az 6B olarak kabul edilmiştir. Zemin tabakasının kalınlığının belirlenmesinde, zeminin emniyetle taşıyabileceği bir gerilme yüzeysel temel aracılığı ile zemine etkililmiş, bu gerilme artışının derinlikle değişimi incelenmiştir. Buna göre, Şekil 5’te gerilme artışının derinlikle değişim grafiği sunulmuştur. Grafik incelendiğinde zemin yüzeyinden 3.8 m derinliğe kadar toplam gerilme artışının %10 mertebesinde aşırı değer aldığı görülmektedir. Dolayısıyla 6B genişliğindeki tabakanın yeterli olacağı belirlenmiştir.

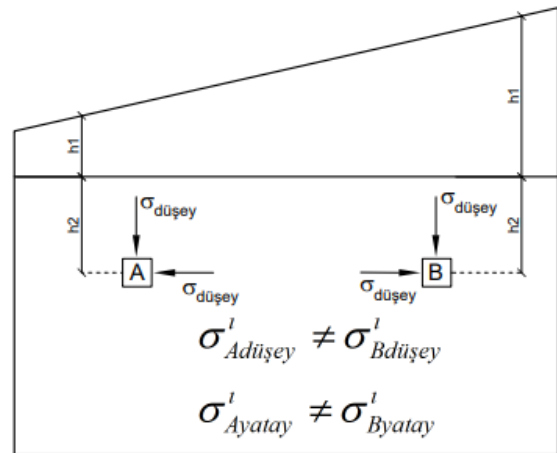


Şekil 4: Zemin Yüzeyine Etkiyen Gerilme Artışının Derinlikle Değişimi

Plaxis sonlu elemanlar programında, modelleme yapılırken malzeme modelinin tanınmasına ve sonlu elemanlar ağının oluşturulması sonrasında zemin suyu basıncı ve başlangıç gerilmelerinin tanıtılması gerekmektedir. Başlangıç gerilmelerinin tanıtılmasında dikkate alınması gereken zemin ağırlığı, K_0 prosedürü ve yerçekimi yüklemesi (gravity loading) prosedürü olarak iki farklı şekilde kullanılmaktadır. K_0 prosedüründe program düşey efektif gerilmeleri derinlikle orantılı şekilde hesaplamaktadır ($\sigma'_{\text{düşey}} = \gamma_{\text{zemin}} \cdot H - \gamma_{\text{su}} \cdot H_{\text{su}}$). Elde edilen düşey efektif gerilmeden hareketle yatay efektif gerilmeyi tanımlar ($\sigma'_{\text{yatay}} = \sigma'_{\text{düşey}} \cdot K_0$). Düşey efektif gerilme ile yatay efektif gerilme arasındaki ilişki sükünetteki toprak basınç katsayısı olan K_0 katsayısı ile sağlanır. Düz yüzeylerde, eğimli tabakalanma, eğimli sürşarj yükünün olmadığı durumlarda yatay ve düşey denge bu yöntemle sağlanır model doğru çalışabilir (Şekil 6a). Düzensiz tabakalanmanın olduğu zeminlerde, Eğimli yüzeye sahip zeminlerde K_0 prosedürünün kullanılması zemin içerisinde yatay yönlü gerilmelerde eşitsizlik ortaya çıkaracağından kullanılması uygun değildir (Şekil 6b).



(a)

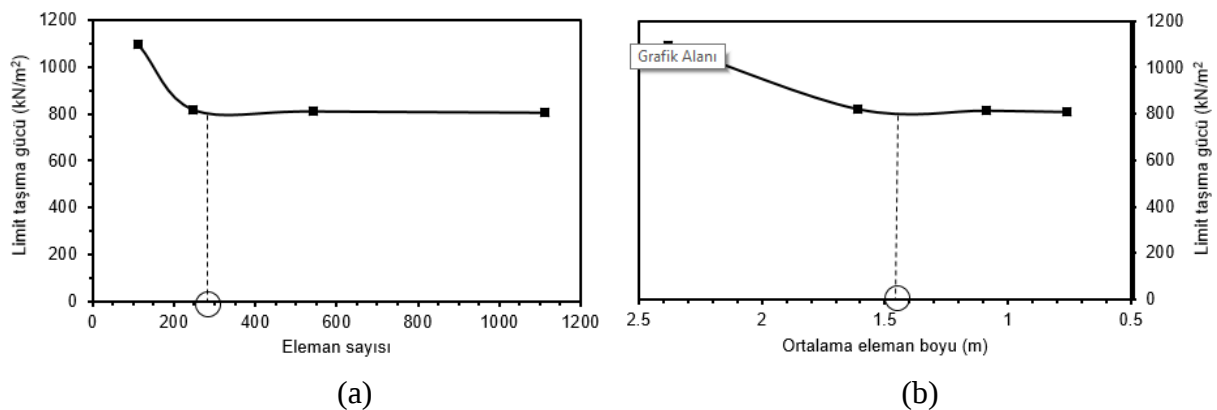


(b)

Şekil 5a: Düz Yüzeyde K_0 Prosedürünün Uygulanması, **5b:** Eğimli Yüzeyde K_0 Prosedürünün Uygulanması

Yerçekimi yüklemesi (gravity loading) prosedürü zemin kütlelerinin kendi ağırlığından kaynaklanan gerilmelerinin hesaplanmasında kullanılan bir yöntemdir. Zemin elemanlarına yer çekimi ivmesini tatbik ederek zeminin kendi ağırlığı altında dengeye gelmesi sağlanır. Deformasyon ve gerilmeler elastik teoriye göre hesaplanır. K_0 prosedürünün kullanılmadığı durumlarda tercih edilir. Çalışma kapsamında ele alınan geometri düzlemsel olmaması sebebiyle modelleme sürecinde başlangıç yüklemeleri gravity load prosedürü ile belirlenmiştir. Bu süreçte başlangıç gerilmelerinin tanımlandığı sekmede $\Sigma M_{weight}=0$ olarak tanımlanmış ve gerilmeler hesaplatılmıştır. Bu suretle K_0 prosedürü başlangıç gerilmelerinin tanımlanmaması nedeniyle kullanılmamıştır. Hesaplama kısmında “calculation type” sekmesi “plastic analysis” seçilmiş, “parametres” sekmesinden “Loading input/Total multipliers” sekmeleri seçilmiştir. “Define” sekmesi tıklanarak $\Sigma m_{weight}=1$ olarak girilmiştir. Bu suretle gravity load ile başlangıç gerilmeleri tanımlanmıştır.

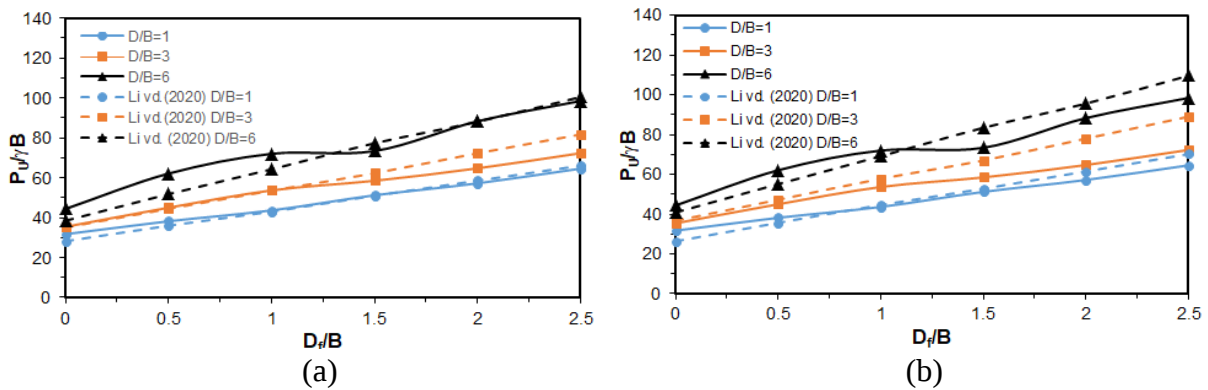
Sonlu eleman boyutlarının optimize edilmesinin, çözüm esnasında bilgisayar belleğinin ve işlem gücünün kabul edilebilir seviyelerde kullanımı üzerinde önemli etkileri vardır. Bu nedenle yapılan ağ analizleri sonrasında optimum eleman boyu ve eleman sayısı değerleri parametrik analizlerle belirlenmiştir. Bu kapsamda tasarım matrisinde bulunan 142 durumdan biri dikkate alınmış, sonlu elemanlar sayısı parametrik olarak artırılarak yüzeysel telemin taşıma gücü değeri belirlenmiştir. Analiz sürecinde, çok kaba (very coarse), kaba (coarse), orta (medium), ince (fine) ve çok ince (very fine) olmak üzere farklı ağ seçenekleri kullanılmıştır. Yapılan analizler sonucunda limit taşıma gücü değerinin eleman sayısına bağlı değişimi Şekil 7a’da sunulmuştur. Bunun yanında eleman boyutunun değişimine bağlı olarak taşıma gücü değişimi Şekil 7b’de görülmektedir. Yapılan ağ analizi sonucunda, hazırlanacak olan modellerde ideal eleman sayısı 275, ideal ortalama eleman boyutu da 1.4m olabileceği belirlenmiştir.



Şekil 6a: Ağ Analizi Sonucunda Elde Edilen Optimum Eleman Sayısı, **6b:** Ağ Analizi Sonucunda Elde Edilen Optimum Eleman Boyu

Hazırlanan modellerde şerit temel, 0.252 m kalınlığında plate eleman ile modellenmiştir. Elemanın birim boydaki ağırlığı 6.00 kN/m/m olarak tanımlanmıştır. Elemanın eksenel rijitlik (EA) değeri 3.4×10^5 kN/m, eğilme ritliği (EI) 1800 kNm²/m olarak belirlenmiş, Poisson oranı ise 0.2 olarak kabul edilmiştir. Temel ile zemin arasında ara yüzey tanımlanarak sürtünme $R_{inter}=0.666$ olarak tanımlanmıştır.

Kurulan sonlu elemanlar modeli, Li vd. (2020) tarafından şevli zemine oturan yüzeysel temel için gerçekleştirilen sonlu elemanlar ve sonlu eleman limiti analiz yöntemleri ile karşılaştırılmıştır. Karşılaştırma için $H/B=6$, $\beta=30^\circ$, $c/\gamma B=0.588$, $\phi=30^\circ$, $\gamma=17$ kN/m², $B=1.0$ m parametreleri göz önünde bulundurularak merkezi yüklenmiş temel monotonik yüklemeye maruz bırakılmıştır. Önerilen sonlu elemanlar modeli kullanılarak, farklı temel-şev arası mesafeler (D) için, gömülme derinliğinin (D_f) limit taşıma gücü üzerindeki etkileri elde edilmiştir. Yüzeysel temel monotonik yüklemeye maruz bırakılarak limit taşıma yükü (P_u) belirlenmiştir. Limit taşıma gücünün belirlenmesi için limit taşıma yükü temel genişliği (B) ve zeminin birim hacim ağırlığına bölünmüştür ($P_u/\gamma B$). Elde edilen sonuçlar Li vd.(2020) tarafından aynı durum için yapılan sonlu elemanlar ve sonlu elemanlar limit analizi yöntemleri ile elde edilen grafiklerle karşılaştırılmıştır. Şekil 8a önerilen sonlu elemanlar modeli ile Li vd. (2020)'nin sonlu elemanlar yöntemi ile yaptığı çözümleri karşılaştırmaktadır. Şekil 8b'de ise önerilen sonlu elemanlar modeli çözümleri, Li vd.(2020)'nin sonlu elemanlar limit analizi yöntemi ile belirlemiş oldukları çözümler ile karşılaştırılmıştır. Buna göre önerilen sonlu elemanlar modelinin gerçekçi sonuçlar verdiği belirlenmiştir.



Şekil 7a: Hazırlanan Sonlu Elemanlar Modelinin Li D (2020) Tarafından Önerilen Sonlu Elemanlar Modeli ile Karşılaştırılması, **7b:** Hazırlanan Sonlu Elemanlar Modelinin Li D (2020) Tarafından Önerilen Sonlu Elemanlar Limit Analizi Yöntemi ile Karşılaştırılması

Nümerik analizlerde sismik davranış, sözde-statik yaklaşımla hesaplamalarda kullanılmıştır. Sismik ivme katsayıları x ya da y yönlü olarak, modelleme başlamadan önce Project/Acceleraration sekmesinde tanımlanmıştır. Tasarım matrisinde ve Tablo 2'de verilen

değerler dikkate alınarak modelleme gerçekleştirilmiştir. Malzeme modelleri zemin ve temel için atanmış, belirlenen minimum eleman sayısı ve eleman uzunluğu dikkate alınarak sonlu elemanlara ayrılmıştır. Başlangıç koşullarında zemin suyu dikkate alınmadığından zemin tabanında tanımlanmıştır. Ko prosedürü yerine yerçekimi yükü prosedürü dikkate alındığından, başlangıç gerilmeleri kısmında $\sum mweight=0$ olarak tanımlanmıştır. Hesap adımları sekmesinde plastik analiz seçilmiş, parameters/loading input sekmesinde “total multipliers” seçilmiştir. “Define” sekmesinden Mweight, 1 olarak tanımlanarak gravity load prosedürü ile başlangıç gerilmeleri tanımlanmıştır. İkinci aşamada sözde statik yükler aktive edilmesi için plastic analysis/loading input/total multipliers sekmesi işaretlenmiş, “Define” butonu tıklanarak $\sum$ -maccel, 1 olarak tanımlanmıştır. Bu sayede sözde statik durum aktive edilmiştir. Üçüncü aşamada plastic analysis/loading input/total multipliers sekmesi işaretlenmiş, “Define” butonu tıklanarak $\sum$ -mload kısmına tahmini taşıma gücünün üzerinde bir değer girilmiştir. Yapılan analizler sonrasında yayılı yük (kN/m) cinsinden limit taşıma gücü değeri belirlenmiştir. Tahmin yönteminde birim hacim ağırlık etkisinin bertaraf edilmesi için belirlenen limit taşıma gücü değeri boyutsuz taşıma gücü katsayısına çevrilmiştir. Bu amaçla, Elde edilen çizgisel yük, P_u (kN/m), zeminin birim hacim ağırlığı, γ_{zemin} (kN/m³), temel genişliği olan B (m) değerine bölünerek birimsiz limit taşıma gücü katsayısı değeri ($P_u/\gamma B^2$) elde edilmiştir. Elde edilen değer yanıt olarak ($Y = P_u/\gamma B^2$) tasarım matrisine girilmiştir.

3.3. UYGUN İSTATİSTİKSEL MODELİN BELİRLENMESİ VE DOĞRULANMASI

Sonlu elemanlar analizi sonucunda elde edilen yanıtların tasarım matrisine girilmesi sonucunda bağımsız değişkenlere karşılık yanıtlar elde edilmiştir (Tablo 2). Design Expert 12 istatistiksel analiz programında bağımsız değişkenlerle yanıt arasındaki ilişki incelenmiştir. Yanıt değerlerinin maksimum ve minimum değeri arasındaki oranın 10’dan fazla olması durumunda transformasyon (dönüşüm) gerekebilir. Hazırlanan tasarım matrisinde maksimum yanıt değeri 2162.4, minimum yanıt değeri 0.0125 olması nedeniyle maksimum/minimum değer oranı 172992’dir. Transformasyon verilerin normal dağılıma uymaması halinde kullanılan, verileri normal dağılım formuna dönüştüren bir araçtır. Gereklilik durumunda istatistiksel analizlerin güvenilirliğini arttırmaktadır. Diyagonistik grafikler yardımı ile transformasyonun gerekli olup olmadığı belirlenmektedir. Design Expert 12 programında kullanılabilecek dönüşüm yöntemleri; Square Root, Natural Log, Base 10 Log, Inverse Square Root, Inverse, Power, Logit ve Arcsine Square Root olarak sıralanmaktadır. Tasarım matrisi üzerinde yapılan ön analiz sonucunda diyagonistik grafiklerden dönüşümün kullanılmasının uygun olacağı belirlenmiştir.

Design Expert 12 programının ilk adımı “Fit Summary”dir. Bu kısımda verilere en uygun model tipi çeşitli istatistiksel ölçütlerle (Sıralı p-değeri, uyum eksikliği, düzeltilmiş R^2 , tahmini R^2) belirlenir. Tablo 4’de dönüşüm kullanılmayan ve farklı dönüşüm yöntemleri kullanılması durumunda elde edilen istatistiksel ölçüt değerleri sunulmaktadır. Yapılan çalışmada sonlu elemanlar analiz sonuçları kullanıldığından (deneysel çalışma olmaması nedeniyle) tekerrür eden deneyler bulunmamaktadır. Uyum eksikliği (lack of fit) değerinin hesaplanabilmesi için tekrar eden noktalara ihtiyaç duyulmaktadır. Tekrar eden noktalar olmadan saf hata (pure error) hesaplanamamaktadır. Bu nedenle Tablo 4’de uyum eksikliği (Lack of fit) değeri verilmemiştir. Analizlerde kübik modelin, yetersiz deneysel nokta, yetersiz tasarım yapısı, matematiksel imkânsızlıklar nedeniyle, bazı terimlerin birbiriyle karışabileceği veya birbirinden ayırt edilemeyeceğinden ötürü kullanımı önerilmemektedir (Aliased). Bu nedenle analizlerde Lineer, 2FI ve Kuadratik modellerin uygunluğu incelenmiştir. Tablo 3’te en iyi sonucu veren transformasyon yöntemleri ve modeller sunulmuştur.

Tablo 3: İstatistiksel Analizlerde Kullanılan Model Sonuçları

Transformasyon→		None	
	p-değeri	Düzenlenmiş R^2	Tahmini R^2
Lineer	<0.0001	0.4696	0.4595
2FI	<0.0001	0.7834	0.7745
Kuadratik	0.3184	0.7858	0.7744
Transformasyon→		Square Root	
	p-değeri	Düzenlenmiş R^2	Tahmini R^2
Lineer	<0.0001	0.7223	0.7017
2FI	<0.0001	0.9084	0.8837
Kuadratik	0.0574	0.9139	0.8891
Transformasyon→		Natural Log	
	p-değeri	Düzenlenmiş R^2	Tahmini R^2
Lineer	<0.0001	0.8833	0.8792
2FI	0.0060	0.8801	0.8418
Kuadratik	0.8963	0.8756	0.8432
Transformasyon→		Base 10 Log	
	p-değeri	Düzenlenmiş R^2	Tahmini R^2
Lineer	<0.0001	0.8589	0.8482
2FI	0.0060	0.8801	0.8418
Kuadratik	0.8933	0.8756	0.8432

Programın ikinci aşamasında kullanılacak istatistiksel model belirlenir, uygun görülmesi durumunda modeldeki anlamsız terimleri elemek ve en uygun modeli elde etmek için model sadeleştirilir. Modelin sadeleştirilmesinde Geri seçim (Backward selection), İleri

seçim (Forward selection), Adım adım seçim (Stepwise selection) ve Manuel indirgeme (Manual reduction) yöntemlerinden biri kullanılır. Yapılan analizlerde modeller, geri seçim yöntemi kullanılarak sadeleştirilmiştir. Yöntemin kullanımındaki temel amaçlar; modeli basitleştirmek, anlamsız terimleri elemek, model tahmin gücünü artırmak dolayısıyla daha güvenilir sonuçlar elde etmektir. Uygun modelin belirlenmesi ve sadeleştirmelerin yapılmasının akabinde varyans analizi (ANOVA) gerçekleştirilir. ANOVA sonuçları değerlendirilerek kurulan modelin ne derece sağlıklı olduğu belirlenebilir. Tablo 5’de belirlenmiş olan modeller için yapılan ANOVA sonuçları sunulmuştur. Buna göre oluşturulan modellerin kullanılabilirliği değerlendirilmiştir. Tablo 4’deki verilerin incelenmesi sonucunda dönüşüm yapılmayan ve Square Root dönüşümü yapılan kuadratik modellerin p değeri 0.05’den büyük olması nedeniyle modellerin istatistiksel anlamları olmadığı anlaşılmıştır. Bunun yanında lineer modellerin de diğer modellere kıyasla temsil gücünün zayıf olduğu belirlenmiştir. Bu nedenle, Tablo 5’de istatistiksel olarak anlamlı bulunan 2FI modellerin ANOVA sonuçları irdelenmiştir.

Analiz sonucunda modellerin, $p < 0.0001$ değeri, istatistiksel olarak çok anlamlı olduğunu göstermektedir. 19-50 Aralığındaki F-değerleri oldukça yüksektir. Bu durum, modellerin tahmin gücünün yüksek olduğunu göstermektedir. Deneysel hatayla karşılaştırıldığında modellerin açıkladığı varyansın çok daha büyük olduğunu ifade eder. R^2 değerlerinin %78 ile %93 aralığında olması kurulan modellerin toplam varyasyonun büyük bir kısmını açıklayabildiği göstermektedir. Bunun yanında, görece yüksek Tahmini- R^2 değerleri modellerin tahmin gücünün yüksek olduğunu göstermektedir. Tüm R^2 değerlerinin birbirine yakın olması modellerin tutarlı olduğunu desteklemektedir. Adequate precision değerinin çok yüksek olması (Sinyal/Gürültü>4) da modellerin güvenilirliğini desteklemektedir.

Tablo 4: Modeller İçin Elde Edilen ANOVA Sonuçları

Transformasyon→		None				
	p-değeri	F-değeri	R^2	Düzen. R^2	Tah. R^2	Sinyal/Gürültü
2FI	<0.0001	19.21	82.64	0.7834	0.7200	20.7975
Transformasyon→		Square Root				
	p-değeri	F-değeri	R^2	Düzen. R^2	Tah. R^2	Sinyal/Gürültü
2FI	<0.0001	50.95	0.9266	0.9284	0.8837	30.8628
Transformasyon→		Natural Log				
	p-değeri	F-değeri	R^2	Düzen. R^2	Tah. R^2	Sinyal/Gürültü
2FI	<0.0001	37.97	0.9039	0.8801	0.8418	26.6078
Transformasyon→		Base 10 Log				
	p-değeri	F-değeri	R^2	Düzen. R^2	Tah. R^2	Sinyal/Gürültü
2FI	<0.0001	37.97	0.9039	0.8801	0.8418	26.6078

Tablo 4’te sunulan ANOVA analizi özetlerinin irdelenmesi sonucunda, istatistiksel anlamda bütün modellerin sağlıklı şekilde çalıştığı görülmektedir. Bu durumda kurulan modellerin tahmin gücü deney setinde olmayan 14 farklı durum için tekrar test edilmiştir. Tahmin gücü en yüksek olan model çalışmanın ilerleyen bölümlerinde kullanılmıştır. Tablo 5’te deney matrisi haricinde, belirlenmiş olan alt ve üst sınırlar dahilinde, bağımsız değişkenlere rastgele değer verilerek elde edilen 14 farklı durum görülmektedir.

Tablo 5: Modellerin Tahmin Güçlerinin Değerlendirilmesinde Dikkate Alınan Bağımsız Değişken Değerleri

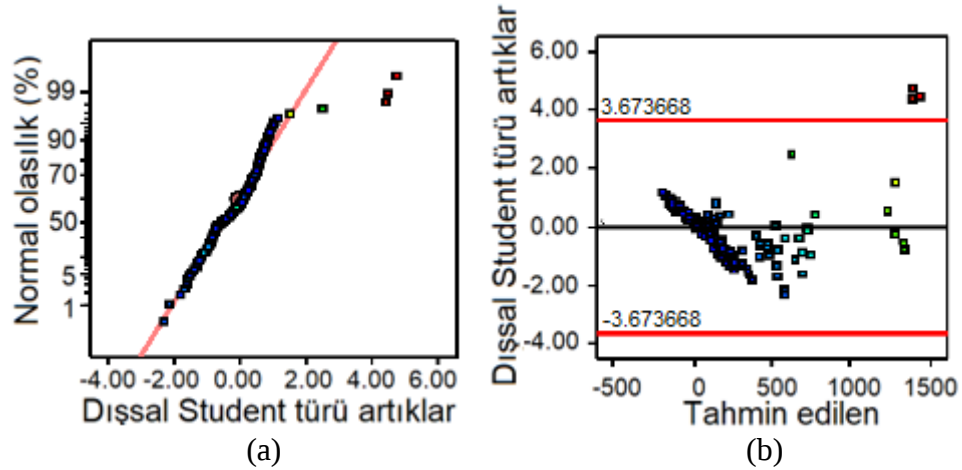
	X ₁ , (φ)	X ₂ , (B)	X ₃ , (D _f /H)	X ₄ , (D/B)	X ₅ , (H/B)	X ₆ , (β)	X ₇ , (c)
1	15	0.5	0	0	1.5	15	15
2	35	0.6	0.35	0.87	3	32	59
3	25	1	0.26	1.99	4.13	19	43
4	40	1.5	0.21	2.03	1.76	20	85
5	16	1	0.45	0.3	3.3	18	69
6	43	0.8	0.33	0.29	5.13	15	47
7	21	1	0.36	1.77	3.65	33	36
8	23	1.8	0	2.91	3.44	17	71
9	30	1	0	1.23	5.46	30	116
10	17	1	0.19	3.52	3.51	33	57
11	17	1	0.37	3.38	2.69	21	40
12	18	2	0.4	2.88	2.53	31	52
13	43	2	0.21	2.79	4.94	32	23
14	28	1.5	0.48	2.34	3.12	18	54

Çalışmanın bu kısmında belirlenen 14 durum için sonlu elemanlar analizi gerçekleştirilerek limit taşıma gücü katsayısı ($P_u/\gamma B^2$) hesaplanmıştır. Kurulan modellerden yararlanılarak Tablo 6’da verilen bağımsız değişkenlerin limit taşıma gücü değeri tahmin edilmiştir. Şekil 9’da dönüşüm yapılmadan, 2FI model kullanılarak çıkarılan istatistiksel modelin tahmin gücü irdelenmiştir. Bu kısımda, ($p>0.01$) anlamsız olarak tanımlanan kuadratik model, kullanımı önerilmeyen (Alaised) kübik model ve regresyon katsayıları çok düşük olan ($R^2<60$) lineer model dikkate alınmamıştır. Sonuç olarak, dönüşüm yapılmadan oluşturulan 2FI modelin diyagonisyyik (tanısal) grafikler vasıtasıyla uygunluğu incelenmiştir.

Diagnostik grafikler, istatistiksel analizlerde model varsayımlarının kontrolü ve modelin uygunluğunu değerlendirmek için kullanılan önemli araçlardır. Bu grafiklerin temel amaçları; verilerin normal dağılıma uygunluğunu kontrolü, varyans homojenliği kontrolü, aykırı değer tespiti, model uygunluğunun değerlendirilmesidir. İstatistiksel testlerin birçoğu normal dağılım varsayımına göre gerçekleştirilir. Bu nedenle verilerin normal dağılıma uygun olması önem arz eder.

Şekil 8a’da Normal olasılık-Dışsal Student türü artıklar grafiği görülmektedir. Model performansının hassaslığı “artık” olarak tanımlanan parametre ile ölçülmektedir. Artık; gerçek değerle, modelin tahmin ettiği değer arasındaki farktır. Bu fark modelin açıklayamadığı değişkenleri temsil etmektedir. Bu grafiğin amacı artıkların normal dağılıma uygunluğunu kontrol etmek, aykırı değerleri tespit etmek ve model varsayımlarının geçerliliğini kontrol etmektir. Grafik üzerindeki noktalar (gözlemlenen değerler), eğimli düz çizgi olarak görülen beklenen normal dağılım çizgisi üzerinde ya da yakınında olması beklenmektedir. Nokta dağılımının ‘S’ şeklinde olması noktaların normal dağılımdan uzaklaştığını göstermektedir. Şekil 8a’nın incelenmesi sonucunda verilerin normal dağılım çizgisi üzerinde saptığı görülmektedir.

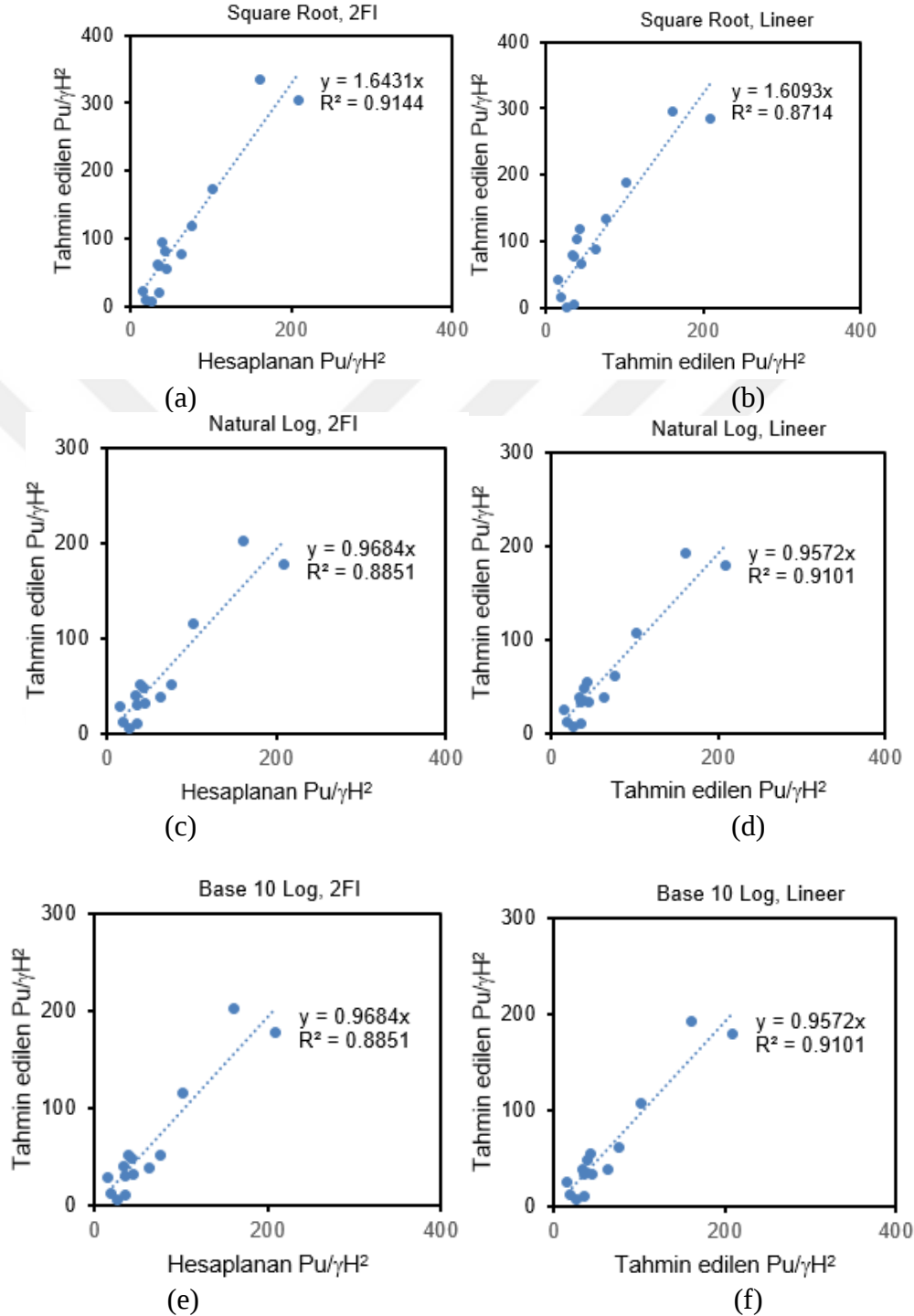
Şekil 8b’de sunulan Dışsal Student türü artıklar-tahmin grafiği regresyon modelinin temel varsayımlarını kontrol etmek için kullanılan bir diğer diagnostik (tanısal) grafik türüdür. Grafikte x eksenini modelin tahmin ettiği değerleri y eksenini ise normal dağılıma uygun artıkları ifade etmektedir. Bu değerler ham haldeki artıkların standardize edilmiş değeridir. Grafik üzerindeki noktaların yaklaşık ± 3 aralığında kalması istenir. Noktaların bu bant içerisinde, herhangi bir desen yapmadan rastgele dağılması beklenir. Şekil 8b’nin incelenmesi sonucunda, noktaların huni benzeri dağılım gösterdiği, grafik üzerindeki noktaların bazılarının belirlenen bant aralığında kalmadıkları görülmektedir. Sonuç olarak Şekil 8a ve 8b’nin incelenmesi sonucunda verilere dönüşüm uygulanması gerektiği belirlenmiştir.



Şekil 8: Dönüşümünün Farklı Diyagonistik Grafiklerle Kontrolü **a:** Normal Olasılık-Dışsal Student Türü Artıklar, **b:** Dışsal Student Türü Artıklar-Tahmin Edilen Değer

Şekil 9’da Square Root, Natural Log, Base 10 Log gibi dönüşüm yöntemleri uygulanması sonrasında 2FI ve Lineer modellerin tahminleri SE sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Square Root dönüşümüne tabi tutulan 2FI model Şekil 9a’da, Natural Log dönüşümüne tabi tutulan 2FI model Şekil 9c’de, Base 10 Log dönüşümüne tabi tutulan 2FI

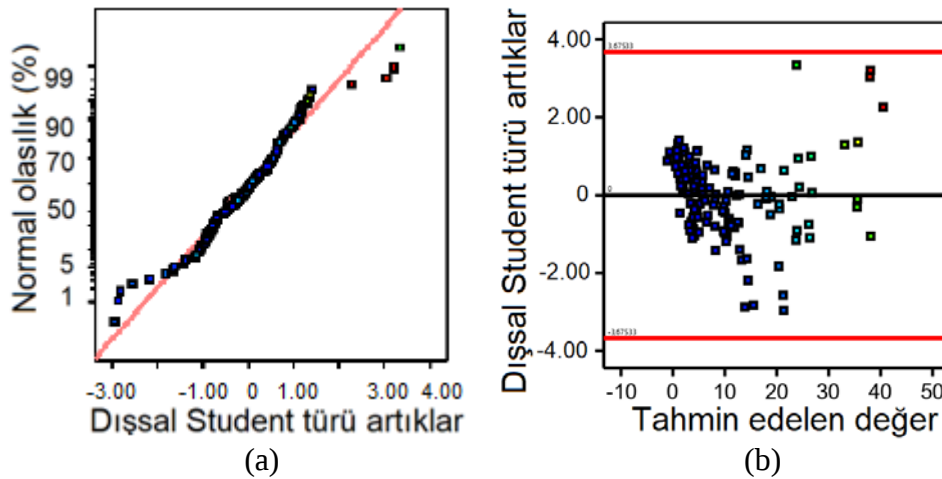
model Şekil 9e’de, sonlu elemanlar yöntemi sonuçları ile karşılaştırılmıştır. İstatistiksel analizlerde anlamsızlığı kanıtlandığı için Square Root dönüşümlü kuadratik model sonuçları dikkate alınmamıştır. Square Root, Natural Log ve Base 10 log dönüşümleri yapılan lineer modellerin SE karşılaştırması Şekil 9b, 9d ve 9f’de sunulmuştur.



Şekil 9: Farklı Dönüşüm Yöntemleri ve Modeller Kullanılarak Elde Edilen Eşitliklerle Gerçekleştirilen Tahminlerin Se Yöntemi Sonuçları ile Karşılaştırılması **a:** Square Root-2fi Model, **b:** Square Root-Lineer, **c:** Natural Log-2fi, **d:** Natural Log-Lineer, **e:** Base 10 Log-2fi, **f:** Base10 Log-Lineer Model

Yapılan karşılaştırmalar sonucunda sonlu eleman analiz sonuçlarına en uyumlu tahminlerin Square Root dönüşümü kullanılarak, 2FI model ile oluşturulan istatistiksel model tarafından yapıldığı görülmektedir ($R^2 > \%91$). Bunun yanında tahmin edilecek limit taşıma gücü katsayısının hesaplanan katsayı ile dikkate değer oranda sapmaların olduğu görülmektedir (Şekil 10a). Şekil 10a'nın incelenmesi sonucunda yaklaşık %91 oranındaki yüksek regresyon katsayısı model ve sonlu elemanlar çözümü arasında güçlü bir ilişki olduğunu ve tahminler ile gerçek değerler arasında tutarlı bir sapmanın bulunduğu anlaşılmaktadır. Tahmin (y) ile numerik çözüm (x) arasında $y=1.6431x$ şeklinde açıklanan ilişkiden, sistemli bir sapmanın mevcut olduğu, bu nedenle istatistiksel denkleminin sonucu net olarak tahmin edemediği görülmektedir. Sistematik sapma, ANOVA sonucunda elde edilen denklem üzerinde bias düzeltme yöntemleri uygulayarak bertaraf edilmiştir.

Şekil 9 ve Şekil 10'dan tahmin gücü en yüksek modelin, Square Root dönüşümüne tabi tutulmuş, 2FI model olduğu belirlenmiştir. Ancak diyagonistik (tanısal) analizlerle bu modelin uygunluğu kanıtlanmalıdır. Şekil 10a'nın incelenmesi sonucunda noktaların diyagonal çizgi üzerinde dizildiği ve normal dağılıma oldukça iyi uyumlandığı görülmektedir. Bunun yanında grafikteki noktalar, normal dağılım çizgisinden büyük sapmalar yapmamıştır. Dolayısıyla veriler normal dağılıma uygundur. Şekil 10b'nin incelenmesi sonucunda artıkların yanı sıra tahmin sapmalarının belirlenen sınır içerisinde kaldığı dolayısıyla aykırı değere rastlanmadığı, noktaların 0 çizgisi etrafında dağıldığı, belirgin bir dağılım deseninin olmadığı görülmektedir. Sonuç olarak Şekil 9'da sunulan grafiklerden Square Root dönüşümünün başarılı olduğu, oluşturulan modelin temel varsayımları karşıladığı, varyans yapısının kabul edilebilir düzeyde olduğu, ilave düzeltmelere ve dönüşüm tekniklerinin uygulanmasına ihtiyaç olmadığı görülmektedir. Bu nedenle, parametre etkisinin istatistiksel yaklaşımla incelenmesinde bu Square Root dönüşümüne tabi tutulmuş 2FI model kullanılmıştır.



Şekil 10: Square Root Dönüşümünün Farklı Diyagonistik Grafiklerle Kontrolü **a:** Normal Olasılık-Dışsal Student Türü Artıklar, **b:** Dışsal Student Türü Artıklar-Tahmin Edilen Değer

Bağımsız değişkenlerin etkisi, ANOVA sonucunda belirlenen F-değerleri kullanılarak oluşturulacak Pareto diyagramından ve kurulan model kullanılarak hazırlanan ikili grafiklerle incelenmiştir. Tablo 7’de oluşturulan modele ait ANOVA sonuçları detaylı olarak sunulmuştur. Geri eleme analizi yapılmayan durumda p-değeri 0.01 den büyük, istatistiksel olarak anlamsız parametreler ANOVA sonuçlarında görülmektedir. Yapılan geri eleme analizleri sonrasında istatistiksel olarak anlamsız veriler elenmiştir.

F-değeri, gruplar arası varyansın grup içi varyansa oranını gösterir ve modeldeki değişkenlerin ya da faktörlerin ne kadar etkili olduğunu belirtir F-değeri ne kadar yüksekse, o değişkenin etkisi o kadar güçlüdür. Analiz sonucunda modelin F-değerinin 95.42 değeri oldukça yüksek olduğu görülmektedir. p-değeri, bulunan sonucun istatistiksel olarak anlamlı olup olmadığını gösterir ve genellikle 0.05’in altındaki değerler anlamlı kabul edilir. Bu tabloda model ve çoğu değişken için $p < 0.0001$ olması, sonuçların oldukça güvenilir olduğunu göstermektedir. R^2 değeri modelin açıklayıcılık gücünü gösterir ve 0 ile 1 arasında değer alır. Söz konusu modelde $R^2 = 0.92.43$ olması, modelin bağımlı değişkendeki değişimin yaklaşık %90’ını açıklayabildiğini gösterir. Düzeltilmiş R^2 (0.9146), modeldeki değişken sayısını da hesaba katarak R^2 değerini düzeltir ve daha gerçekçi bir tahmin sunar. Tahmini R^2 değeri, modelin tahmin gücünü gösterir ve diğer R^2 değerlerine yakın olması beklenir. Görece yüksek Tahmini R^2 değeri (0.9025), model kullanılarak sağlıklı limit taşıma gücü katsayısı tahmini yapılabileceğini göstermektedir. Varyasyon katsayısı, standart sapmanın ortalamaya oranını yüzde olarak gösterir ve verilerin ne kadar değişken olduğunu belirtir. Varyasyon katsayısının %30’dan aşağı olması istenilen bir durumdur. Modelin varyasyon katsayısının %27.63 olması kabul edilebilir bir durum olarak görülebilir. Sinyal/Gürültü oranı (41.4732) ise modelin tahmin gücünü gösterir ve bu değer yüksek olması modelin güvenilirliğine işaret eder. ANOVA sonucunda modelin istatistiksel olarak anlamlı olduğu, güvenilir sonuçlar verebileceği görülmektedir.

Tablo 6: Square Root Dönüşümüne Tabi Tutulan, 2fı Modelin Anova Sonuçları

	Kareler Toplamı	df	Ortalama Kare	F-değeri	p-değeri	
Model	12799.22	16	799.95	95.42	< 0.0001	Anlamlı
X ₁ , (φ)	1828.00	1	1828.00	218.04	< 0.0001	
X ₂ , (B)	5411.46	1	5411.46	645.48	< 0.0001	
X ₃ , (D _f /H)	741.29	1	741.29	88.42	< 0.0001	
X ₄ , (D/B)	45.84	1	45.84	5.47	0.0210	
X ₅ , (H/B)	31.20	1	31.20	3.72	0.0560	
X ₆ , (β)	67.54	1	67.54	8.06	0.0053	
X ₇ , (c)	2067.71	1	2067.71	246.64	< 0.0001	
X ₁ X ₂	880.62	1	880.62	105.04	< 0.0001	
X ₁ X ₃	220.50	1	220.50	26.30	< 0.0001	
X ₁ X ₇	152.33	1	152.33	18.17	< 0.0001	
X ₂ X ₃	258.46	1	258.46	30.83	< 0.0001	
X ₂ X ₆	33.06	1	33.06	3.94	0.0493	
X ₂ X ₇	882.20	1	882.20	105.23	< 0.0001	
X ₃ X ₄	60.46	1	60.46	7.21	0.0082	

X ₃ X ₅	64.98	1	64.98	7.75	0.0062
X ₃ X ₇	53.57	1	53.57	6.39	0.0127
Artık	1047.95	125	8.38		
			R ²	0.9243	
Düzeltilmiş toplam	13847.17		Düzen. R ²	0.9146	
Ortalama	10.48		Tahmin. R ²	0.9025	
Varyasyon katsayısı (%)	27.63		Sinyal/Gürültü	41.4732	

Güvenilirliği gerek ANOVA ile gerekse bağımsız karşılaştırma ile kanıtlanan modelden türetilen bağıntı Eşitlik (11)'de verilmiştir.

$$\sqrt{\frac{Pu}{\gamma B^2}} = -0.585141 + 0.0361367X_1 + 3.38655X_2 - 2.26746X_3 - 0.046727X_4 \\ - 0.098931X_5 - 0.104518X_6 + 0.104518X_7 - 0.233150X_1X_2 + 0.349997X_1X_3 \\ + 0.001322X_1X_7 - 7.57864X_2X_3 + 0.045173X_2X_6 - 0.063644X_2X_7 \\ + 1.37459X_3X_4 + 1.26664X_3X_5 + 0.047051X_3X_7 \quad (11)$$

Şekil 9a'da Tahmin (y) ile numerik çözüm (x) arasında $y=1.6431x$ şeklinde açıklanan ilişkiden, sistemli bir sapmanın mevcut olduğu, bu nedenle istatistiksel denkleminin sonucu net olarak tahmin edemediği görülmektedir. Bu durumda bu sistematik hatanın düzeltilmesi için Bias dönüşümü yapılması yoluna gidilmiştir. Bias dönüştürme uygulamalarında En kolay sistem, hata (BESE), Doğrusal regresyon (LR), Hareketli ortalama (RM), En yakın komşuluk (NN) gibi çeşitli yöntemler kullanılmaktadır (Durai ve Bhradwaj, 2014). Şekil 10a'dan elde edilen regresyon formülü kullanılarak limit taşıma gücü katsayısı tahminin yapan eşitlik aşağıdaki forma getirilmiştir.

$$\sqrt{\frac{Pu}{\gamma B^2}} = -0.2247 + 0.2001X_1 + 1.6743X_2 - 0.9294X_3 - 0.0155X_4 \\ - 0.0183X_5 - 0.5250X_6 - 0.0687X_7 + 0.0593X_8 - 0.1226X_1X_2 \\ + 0.1744X_1X_3 + 0.00065X_1X_8 - 4.0075X_2X_3 + 0.03060X_2X_7 - 0.0360X_2X_8 \\ + 0.6195X_3X_4 + 0.6322X_3X_5 + 0.03025X_3X_8 \quad (12)$$

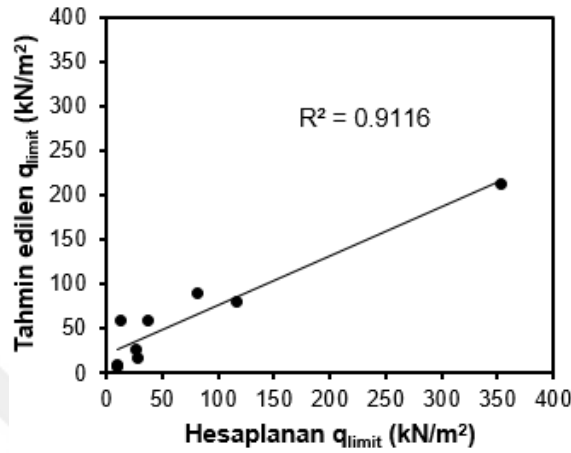
Yapılan Bias dönüştürme uygulaması sonrasında modifiye edilen eşitliğin sınanması için Tablo 7'de sunulan, bağımsız değişken seti kullanılmıştır. Tablo, bağımsız değişkenlerin belirlenen alt ve üst sınır değerleri içerisinde rastgele değerler olacak şekilde belirlenmiştir.

Tablo 7: Düzeltilmiş Modelin Karşılaştırmasında Dikkate Alınan Bağımsız Değişkenler

	X ₁ , (φ)	X ₂ , (B)	X ₃ , (D _f /H)	X ₄ , (D/B)	X ₅ , (H/B)	X ₆ , (β)	X ₇ , (c)
1	41	1.2	0.1	0.1	3.4	38	84
2	27	1.4	0.2	0.3	2.8	20	96
3	42	2	0	0.1	3.4	27	124
4	26	1.5	0.5	0	3	40	57
5	19	1.1	0.5	0	1.8	37	17
6	37	1.3	0	0.3	1.9	17	97
7	24	1.9	0.5	0.4	4.1	36	20
8	33	0.6	0.1	0	5.1	23	103

9	28	1.6	0.3	0.2	4.8	26	78
---	----	-----	-----	-----	-----	----	----

Tablo 7’ye göre gerçekleştirilen sonlu elemanlar analizi sonuçları Bağıntı 12’de modifiye edilen eşitlik kullanılarak tahmin edilen limit taşıma gücü katsayısı değerleri ile karşılaştırılmıştır. Yüksek R^2 değeri tahmin edilen sonuçla hesaplanan sonuçların uyumlu olduğunu göstermektedir. Her ne kadar, tahminlerin hesaplanan sonuçlara yakın değer aldıkları gözlenmekteyse de bazı değerlerde ekstrem farklılıklar bulunabilmektedir.



Şekil 11: Bias Dönüşümü Sonrası Tahmin Edilen Sonuçlarla Hesaplanan Sonuçların Karşılaştırılması

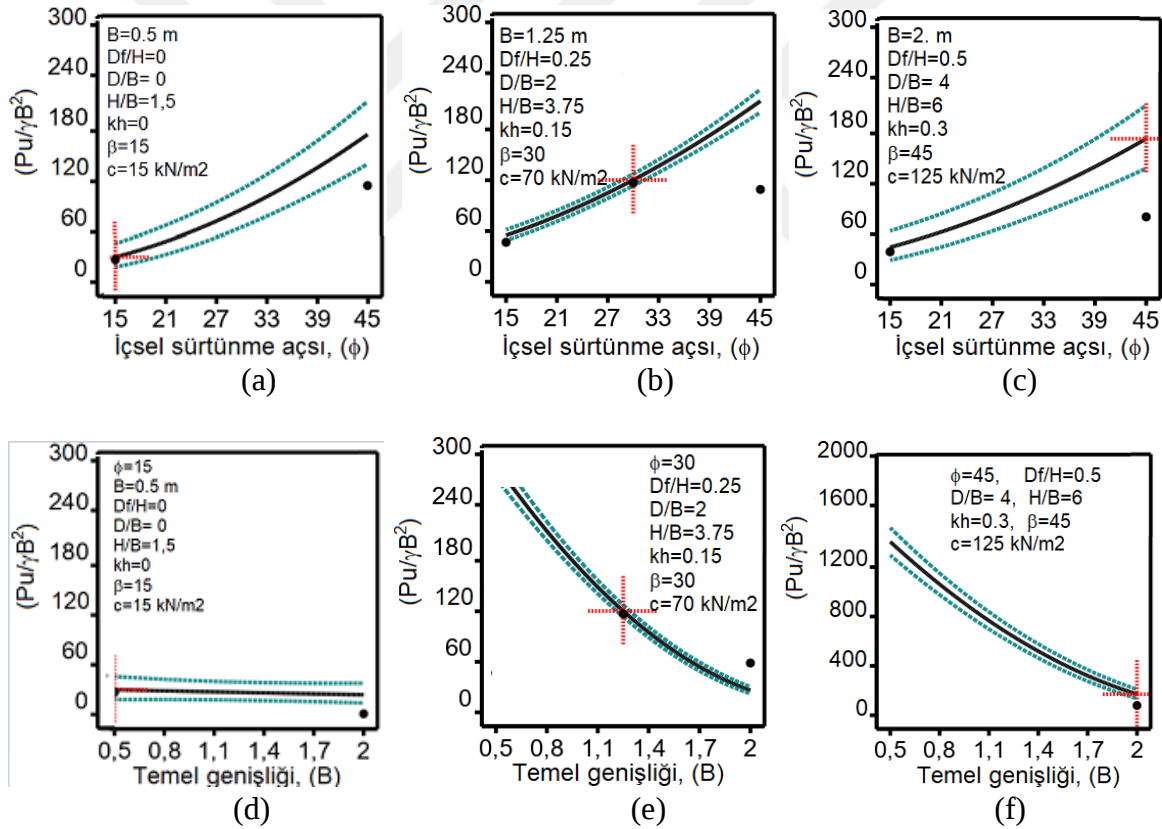
3.4. LİMİT TAŞIMA GÜCÜ DEĞERİNE ETKİ EDEN PARAMETRELERİN BELİRLENMESİ

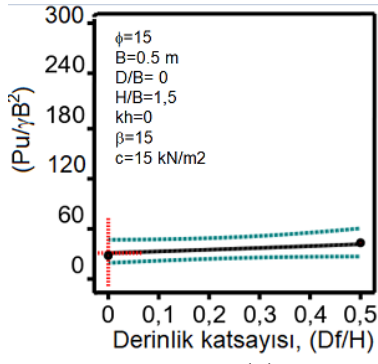
Çalışma kapsamında parametre etkisi iki farklı şekilde irdelenmiştir. Bunlarda biri; ANOVA sonucu her bir bağımsız değişkene ait F-değerleri dikkate alınarak hazırlanan Pareto diyagramlarıdır. Bu diyagramlarda parametrelerin sonuç üzerindeki etkileri irdelenmiştir. Diğer inceleme yöntemi ise elde edilen istatistiksel modeli kullanarak, bağımsız değişkenlerin sabit değerleri için, belirlenen değer aralıklarında parametrelerin ikili etkileşiminin incelenmesi esasına dayanmaktadır.

3.4.1. Oluşturulan Model Kullanılarak Gerçekleştirilen Parametrik Analizler

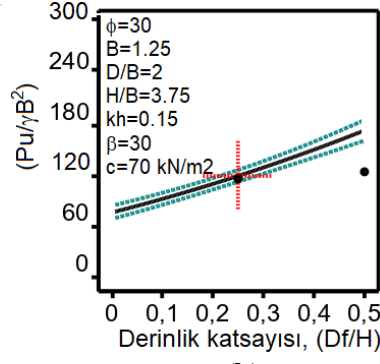
Şekil 12’de bağımsız değişkenlerin alt sınır, ortalama ve üst sınır değerleri için her bir bağımsız değişkenin limit taşıma gücü katsayısı üzerindeki etkisi sunulmuştur. Grafikler türetilen istatistik model kullanılarak elde edilmiştir. Şekil 12a-12c’de diğer bağımsız değişkenlerin sabit değerleri için, içsel sürtünme açısı değişiminin etkisi görülmektedir. Buna göre bağımsız değişken etkisi az olmakla birlikte, içsel sürtünme açısının artması taşıma gücü katsayısında beklenen üzere artışa neden olmaktadır. Şekil 12d-12f’de Temel genişliği etkisi görülmektedir. Bu kısımda limit taşıma gücü faktöründe B^2 çarpanının kullanım etkisi net olarak ortaya çıkmaktadır. Söz konusu durum alt sınır değerlerde net değilken ortalama ve üst

sınırlar için artan temel genişliği, limit taşıma gücü katsayısında azalmaya neden olmaktadır. Şekil 12g-12i'de derinlik katsayısının etkisi incelenmiştir. Alt sınır değerlerde gömülme derinliğinin etkisi net olarak görülmemektedir. Ancak, ortalama ve üst sınır değerlerde artan gömülme derinliği katsayısı limit taşıma gücü katsayısını arttırmaktadır. Şekil 12j-12l'de yüzeyel temelin şeve uzaklığının taşıma gücü üzerindeki etkisi incelenmiştir. Bu grafik setinde de alt sınır değerlerde etki net olarak görülmemektedir. Ancak, ortalama ve üst sınır değerlerde artan şeve uzaklık katsayısının limit taşıma gücü değerini arttırdığı görülmektedir. Şekil 12p-12s'de şev açısının limit taşıma gücü katsayısı üzerindeki etkisi görülmektedir. Bu grafik setinde bağımsız değişkenlerin tüm değerleri için şev açısının artması ile taşıma gücü katsayısında düşüş gözlenmektedir. Şekil 12ş-12u'da kohezyon parametresinin taşıma gücü üzerindeki etkisi görülmektedir. Bu grafik üçlüsünde. Bağımsız değişkenlerin tüm değerleri için kohezyon parametresindeki artışın limit taşıma gücü katsayısı üzerinde ciddi artışlara sebebiyet verdiği görülmektedir.

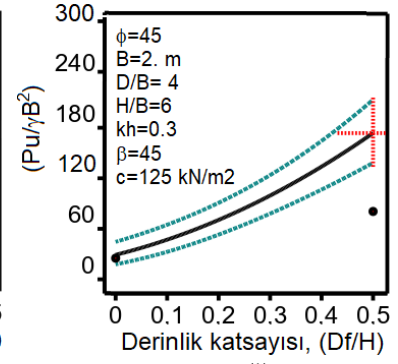




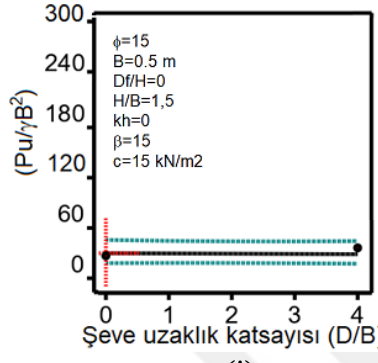
(g)



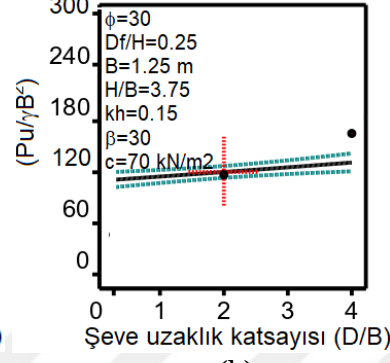
(h)



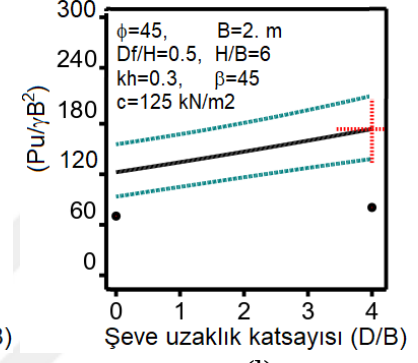
(i)



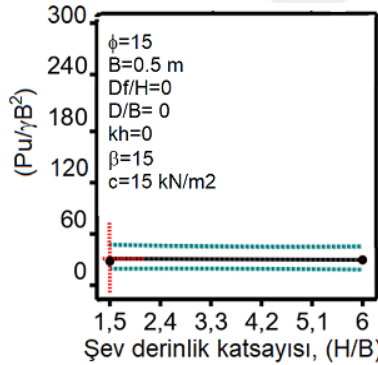
(j)



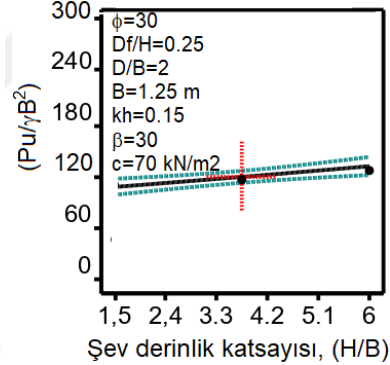
(k)



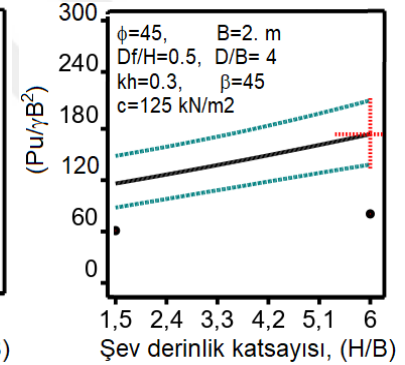
(l)



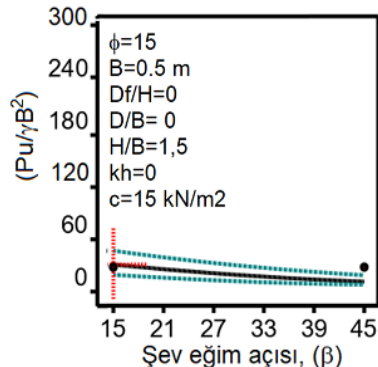
(m)



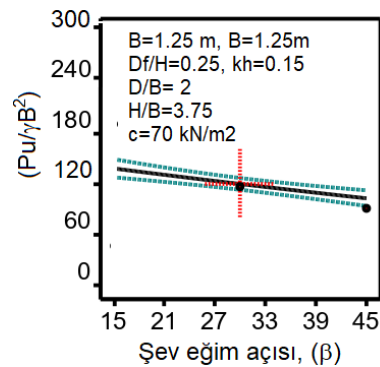
(n)



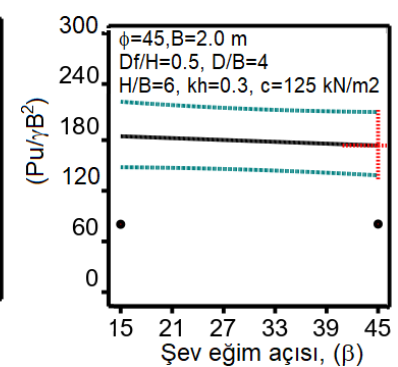
(o)



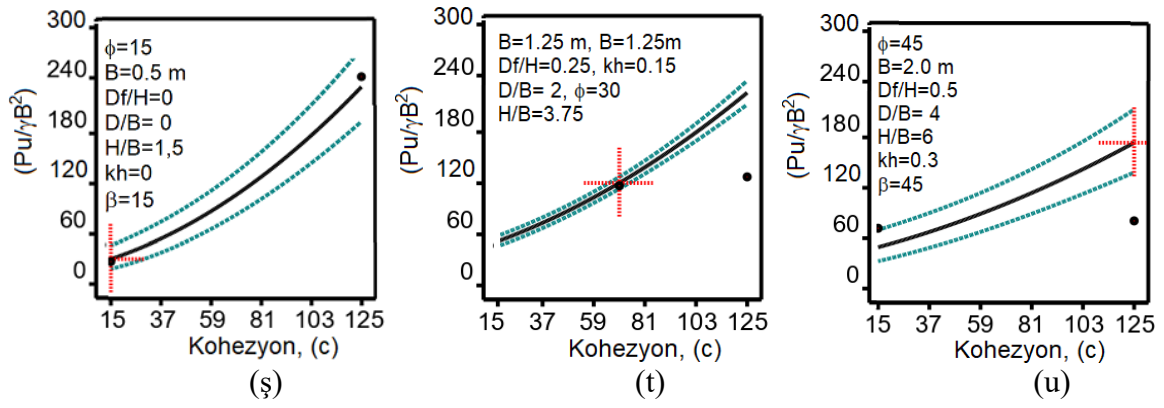
(p)



(r)



(s)



Şekil 12: Bağımsız Değişkenlerin Alt, Ortalama ve Üst Değerleri İçin, Parametre-Limit Taşıma Gücü Katsayısı İlişkisi **a:** Bağımsız Değişkenlerin Alt Sınır Değeri İçin $Pu/\gamma B^2-\phi$, **b:** Bağımsız Değişkenlerin Ortalama Değeri İçin $Pu/\gamma B^2-\phi$, **c:** Bağımsız Değişkenlerin Üst Sınır Değeri İçin $Pu/\gamma B^2-\phi$, **d:** Bağımsız Değişkenlerin Alt Sınır Değeri İçin $Pu/\gamma B^2-B$, **e:** Bağımsız Değişkenlerin Ortalama Değeri İçin $Pu/\gamma B^2-B$, **f:** Bağımsız Değişkenlerin Üst Sınır Değeri İçin $Pu/\gamma B^2-B$, **g:** Bağımsız Değişkenlerin Alt Sınır Değeri İçin $Pu/\gamma B^2-Df/H$, **h:** Bağımsız Değişkenlerin Ortalama Değeri İçin $Pu/\gamma B^2-Df/H$, **i:** Bağımsız Değişkenlerin Üst Sınır Değeri İçin $Pu/\gamma B^2-Df/H$, **j:** Bağımsız Değişkenlerin Alt Sınır Değeri İçin $Pu/\gamma B^2-D/B$, **(K)** Bağımsız Değişkenlerin Ortalama Değeri İçin $Pu/\gamma B^2-D/B$, **l:** Bağımsız Değişkenlerin Üst Sınır Değeri İçin $Pu/\gamma B^2-D/B$, **m:** Bağımsız Değişkenlerin Alt Sınır Değeri İçin $Pu/\gamma B^2-H/B$, **n:** Bağımsız Değişkenlerin Ortalama Değeri İçin $Pu/\gamma B^2-H/B$, **o:** Bağımsız Değişkenlerin Üst Sınır Değeri İçin $Pu/\gamma B^2-H/B$, **p:** Bağımsız Değişkenlerin Alt Sınır Değeri İçin $Pu/\gamma B^2-\beta$, **r:** Bağımsız Değişkenlerin Ortalama Değeri İçin $Pu/\gamma B^2-\beta$, **s:** Bağımsız Değişkenlerin Üst Sınır Değeri İçin $Pu/\gamma B^2-\beta$, **ş:** Bağımsız Değişkenlerin Alt Sınır Değeri İçin $Pu/\gamma B^2-C$, **t:** Bağımsız Değişkenlerin Ortalama Değeri İçin $Pu/\gamma B^2-C$, **u:** Bağımsız Değişkenlerin Üst Sınır Değeri İçin $Pu/\gamma B^2-C$

3.4.2. Pareto Analizi ile Taşıma Gücüne Etki Eden Parametrelerin İncelenmesi

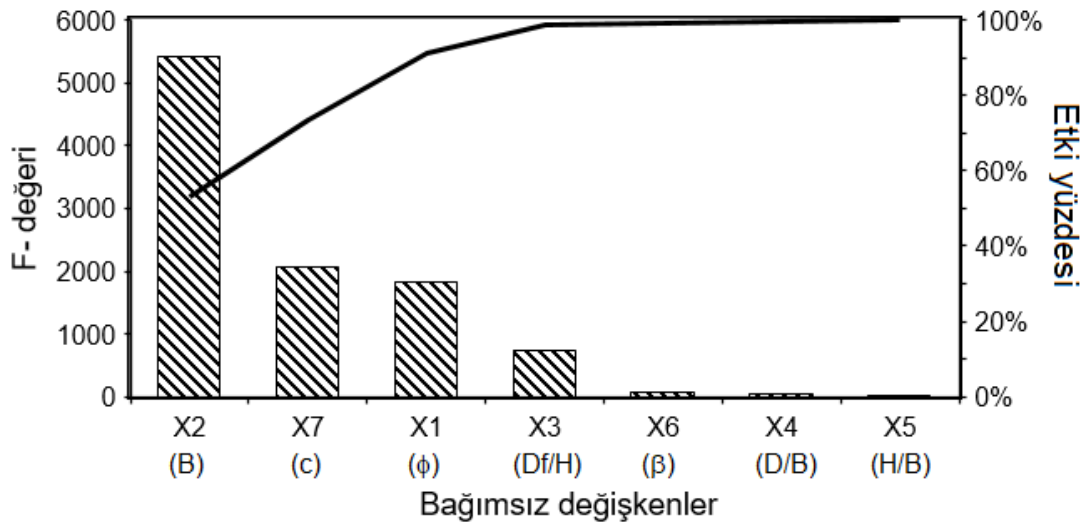
Şekil 12’de bağımsız değişkenlerin sonuç üzerindeki tekil etkileri sunulmuştur. Ancak, program tarafından "Warning! Factor involved in multiple interactions" uyarısı verilmiştir. Bu uyarı, bağımsız değişkenlerin oluşturulan modelde birden fazla etkileşime dahil olduğunu göstermektedir. Şekil 12’de incelenen bağımsız değişkenler, diğer bağımsız değişkenlerle birlikte çalışarak sonucu etkileyebilir. Bu durumda faktör etkisi sabit olmamakta, diğer faktörlerin seviyesine bağlı olarak değişkenlik göstermektedir. Bu durumda faktör etkileri tek başına değil, diğer faktörlerin seviyelerine bağlı olarak incelenmeleri gerekir. Bu durumda ANOVA sonuçlarını kullanarak hassasiyet analizleri gerçekleştirmek, bağımsız değişkenleri istatistik analiz sonuçları ile yorumlamak alternatif bir seçenektir.

Bağımsız değişkenlerin yanıtlar üzerindeki etkileri hassasiyet analizleri ile incelenmesi mümkündür. Hassasiyet analizi, sistem üzerinde güçlü etkisi olan parametreleri belirlemek, belirsizlik kaynaklarını tespit etmek ve optimizasyon için öncelikli parametreleri belirlemek gibi amaçlarla sıklıkla kullanılır. Pareto analizi, hassasiyet analizleri için kullanışlı bir araçtır. Analizler, 80/20 kuralı olarak bilinen, sonuçların %80’inin girdilerin %20’sinden

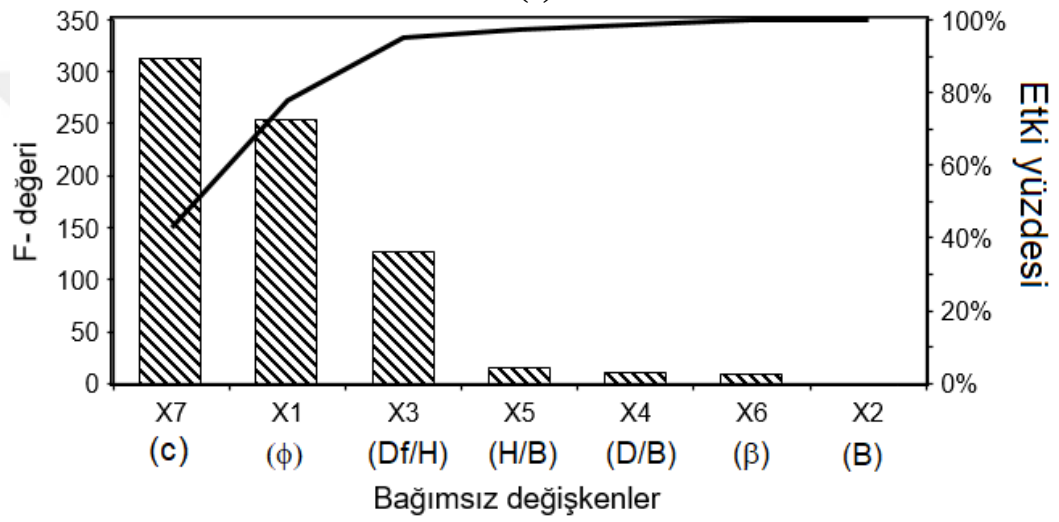
kaynaklandığı varsayımına dayanmaktadır. Problemi etkileyen parametrelerin etki dereceleri ve önem sırası Pareto diyagramları ile belirlenebilir.

Çalışma kapsamında Pareto analizi, ANOVA sonucunda her bir parametre için elde edilmiş olan F-değerleri dikkate alınarak gerçekleştirilmiştir. F-değeri, bir faktörün bağımlı değişken üzerindeki etkisinin istatistiksel önemini gösterir. Yüksek F-değeri, o faktörün süreç veya sonuç üzerinde daha büyük bir etkiye sahip olduğunu ifade eder. F-değeri, varyans analizinde (ANOVA) faktörler arasındaki karşılaştırmayı standardize edilmiş bir şekilde sunar. Bu özellik, farklı ölçek ve birimlerdeki faktörlerin karşılaştırılabilmesini sağlar. Şekil 13a'da şevli bir zemine oturan bir şerit temelin limit taşıma gücü değerine etki eden parametreler ve bunların etki dereceleri Pareto yaklaşımıyla verilmiştir. Grafiğin, “Birçok durumda, sonuçların %80’ni üzerinde, nedenlerin %20’si etkili olmaktadır.” yaklaşımı ile irdelenmesi, limit taşıma gücü üzerinde temel genişliği (X2), kohezyon (X7) ve içsel sürtünme açısı (X1) parametrelerinin birincil etkiye sahip parametreler olduğu sonucunu ortaya koymaktadır. Df/H (X3) parametresi orta düzeyde etkili bir faktör iken, şev eğimi (X6), şev yüksekliği (X5), temelin şeve uzaklığı (D/B) parametrelerinin daha az etkili olduğu görülmektedir.

Bu kısımda dikkat edilmesi gereken nokta, bağımsız değişkenlerin seçiminde limit yük değerinin (P_u), limit taşıma gücü katsayısına ($P_u/\gamma B^2$) çevrilmesinde birim hacim ağırlık (γ) ve temel genişliklerinin (B^2) kullanılmış olduğudur. Bu durumda yanıt parametresinin temel genişliğine direkt olarak bağlı olması Pareto sıralamasında onu önemli bir sıraya yükseltmektedir. Temel genişliği parametresinin etkinliğinin sıranması için aynı modele yanıt olarak sadece taşıma gücü değeri girilmiştir ($Y=P_u$). Benzer bir istatistiksel yaklaşım takip edilerek modelin anlamlılığı kanıtlanmış, ANOVA analiz sonuçları kullanılarak pareto diyagramı çıkartılmıştır (Şekil 13b). Pareto analizi sonucunda kohezyon (X7), içsel sürtünme açısının (X1) ve temel gömülme derinliğinin (X3) sonucun %80’nine etki eden bağımsız değişkenler olduğu görülmektedir. Bunun yanında, dikkat edilmesi gereken önemli nokta olarak temel genişliğinin (X2) yanıt üzerindeki etkisinin neredeyse olmadığı gösterilebilir. Temelin şeve uzaklığı (D/B), şev eğimi (X6), şev yüksekliği (X5) parametrelerinin az seviye etkilerinin olduğudur. Temel genişliğinin (X2) dikkate değer bir etkisi ise görülmemektedir.



(a)



(b)

Şekil 13: Bağımsız Değişkenlerin Yanıt Üzerindeki Etkisi İçin Elde Edilen Pareto Diyagramı
a: $Y=Pu/\gamma B$ İçin Elde Edilen Diyagram, **b:** $Y=Pu$ İçin Elde Edilen Diyagram

SONUÇ, TARTIŞMA VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında, şevli zeminler üzerine oturan şerit temellerin taşıma kapasitesinin belirlenmesi için istatistiksel modelleme yöntemleri kullanılarak analizler gerçekleştirilmiştir. Çalışma kapsamında, Yanıt Yüzey Yöntemi (YYY) ve Sonlu Elemanlar Yöntemi (SEY) birlikte kullanılarak, temel taşıma kapasitesini etkileyen faktörlerin analizi yapılmış ve bu faktörler arasındaki etkileşimler incelenmiştir. Çalışmanın temel amacı, şevli zeminlerde temel taşıma kapasitesini etkileyen faktörleri belirlemek ve bu faktörlerin etkilerini matematiksel modelleme ile değerlendirmektir.

Sonuç

Zeminin kohezyonu (c) ve içsel sürtünme açısı (ϕ) gibi parametreler taşıma gücünün en kritik belirleyicilerinden biri olarak tespit edilmiştir. Yüksek kohezyonlu zeminlerde temel taşıma gücü önemli ölçüde artarken, içsel sürtünme açısının artışı da benzer şekilde olumlu bir etki göstermektedir.

Temel genişliği (B) ve temel derinliği (D_f), taşıma kapasitesi üzerinde güçlü bir etkiye sahiptir. Daha geniş ve derin temeller, taşıma kapasitesini artırmaktadır. Özellikle, derinlik arttıkça taşıma kapasitesini artırmaktadır.

Temelin şev üzerindeki konumu da önemli bir değişken olarak değerlendirilmiştir. Şevin kenarına yakın konumlandırılan temellerin taşıma kapasitesi, merkeze göre daha düşük bulunmuştur. Temelin şevin daha iç kısmında yer alması, taşıma gücünü artırmaktadır.

Tartışma

Çalışmada Yanıt Yüzey Yöntemi (YYY) kullanılarak en uygun taşıma kapasitesi tahmin modeli oluşturulmuştur. Yapılan ANOVA analizleri sonucunda ikinci dereceden polinom (2FI) modelin en yüksek tahmin doğruluğunu sağladığı belirlenmiştir. Modelin F-değeri (188.94) ve düzeltilmiş R^2 değeri (0.9116) oldukça yüksek olup, modelin bağımlı değişkendeki değişimi yaklaşık %90 oranında açıklayabildiğini göstermektedir.

Yapılan tahmin modelleri arasında en yüksek performansı gösteren model, doğrulama testleri ile de desteklenmiştir. Sinyal/gürültü oranının (41.47) yüksek olması, modelin güvenilir bir taşıma gücü tahmini sunduğunu kanıtlamaktadır.

Bu çalışma, şevli zeminlerde temellerin taşıma kapasitesini tahmin etmek için istatistiksel modelleme ve sayısal analizlerin birlikte kullanılmasının önemini ortaya

koymuştur. Özellikle Yanıt Yüzey Yöntemi'nin (YYY), karmaşık sistemlerin analiz edilmesi ve optimum tasarım koşullarının belirlenmesi açısından gl bir araç olduğu gösterilmiştir.

neriler

Elde edilen bulgular, mühendislik uygulamalarında şevli zeminlerde daha güvenli ve ekonomik temel tasarımı yapılabilmesi için yol gösterici olabilir. Gelecekte yapılacak çalışmalar, farklı zemin türleri ve temel tipleri için benzer modellemelerin geliştirilmesi ve saha deneyleri ile doğrulanması yönünde olabilir.



KAYNAKÇA

- Akbay, T., Topal, T., & Öztürk, A. (2018). Şevli zeminlerde şerit temellerin taşıma kapasitesinin sonlu elemanlar yöntemi ile incelenmesi. *Gazi Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 33(1), 255-264.
- Akçay, S., & Sivrikaya, F. (2023). Şevli zeminlerde şerit temellerin taşıma kapasitesinin sonlu elemanlar yöntemi ile incelenmesi. *İnşaat Mühendisliği Dergisi*, 49(1), 1-12.
- Azzouz, A. S., Baligh, M. M., & Ladd, C. C. (1983). Bearing capacity of strip footings on or near slopes. *Journal of Geotechnical Engineering*, 109(12), 1514-1529.
- Bauer, G. E., Shields, D. H., Scott, J. D., & Gruspier, K. L. (1981). Centrifuge model tests on strip footings in slopes. *Canadian Geotechnical Journal*, 18(3), 363-370.
- Bowles, J. E. (1996). *Foundation analysis and design*. McGraw-Hill.
- Box, G. E., & Draper, N. R. (1987). *Empirical model-building and response surfaces*. John Wiley & Sons.
- Box, G. E., & Draper, N. R. (2007). *Response surfaces, mixtures, and ridge analyses*. John Wiley & Sons.
- Buhan, P. D., & Garnier, J. (1994). A lower bound field for the bearing capacity of a foundation on a slope. *Géotechnique*, 44(3), 545-549.
- Buhan, P. D., & Garnier, J. (1998). Limit analysis of a strip foundation on a slope. *European Journal of Mechanics-A/Solids*, 17(4), 689-702.
- Chen, W. F. (1975). *Limit analysis and soil plasticity*. Elsevier.
- Chen, Z. Y., Qin, C. L., & Li, W. L. (2007). Seismic bearing capacity of strip footings on slopes. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 27(1), 43-51.
- Coduto, D. P. (2001). *Foundation design: Principles and practices*. Prentice Hall.
- Çinicioğlu, Ö., & Erkli, A. (2018). Seismic bearing capacity of surficial foundations on sloping cohesive ground. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 111, 53-64. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2018.04.027>
- Das, B. M. (1999). *Principles of foundation engineering*. PWS-KENT Publishing Company.
- Das, B. M. (2010). *Principles of foundation engineering*. Cengage Learning.
- Davis, E. H., & Booker, J. R. (1973). The effect of increasing strength with depth on the bearing capacity of clays. *Géotechnique*, 23(4), 551-563.
- Durai, V. R., & Bhadrwaj, R. (2014). Evaluation of statistical bias correction methods for numerical weather prediction model forecasts of maximum and minimum temperatures. *Natural Hazards*, 73, 1229-1254. <https://doi.org/10.1007/s11069-014-1136-1>
- Ebid, M., Abdel-Salam, S., & Jaheen, Z. (2021). Prediction of bearing capacity of strip footings on or near slopes using intelligent techniques. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 46(1), 345-357.
- Farzaneh, O., Askari, F., & Bareither, C. A. (2008). Bearing capacity of strip footings near slopes using finite elements. *Canadian Geotechnical Journal*, 45(4), 568-577.
- Garnier, J., Krabbenhoft, K., & Wu, J. (1994). Bearing capacity of shallow foundations on slopes. *Canadian Geotechnical Journal*, 31(1), 1-11.

- Gemperline, M. C. (1988). Bearing capacity of shallow foundations on slopes. *Journal of Geotechnical Engineering*, 114(11), 1292-1300.
- Georgiadis, K., Sloan, S. W., & Lyamin, A. V. (2008). Undrained bearing capacity of strip footings on slopes. *Canadian Geotechnical Journal*, 45(1), 1-16.
- Graham, J., Noonan, M. L., & Lew, K. V. (1987). Stress characteristics for shallow footings in cohesionless slopes. *Canadian Geotechnical Journal*, 24(3), 349-358.
- Griffiths, D. V. (1982). Computation of bearing capacity factors using finite elements. *Géotechnique*, 32(3), 195-202.
- Gupta, A. K., Kumar, S., & Sahu, R. K. (2014). Optimization of strength of cement stabilized soil using response surface methodology. *International Journal of Geotechnical Engineering*, 8(2), 197-204.
- Khuri, A. I., & Cornell, J. A. (1987). *Response surfaces: Designs and analyses*. Marcel Dekker.
- Kleeman, P. W., & Sloan, S. W. (1995). Bearing capacity of shallow foundations on slopes. *Canadian Geotechnical Journal*, 32(6), 1013-1022.
- Krabbenhoft, K., Damkilde, L., & Krabbenhoft, K. (2005). Bearing capacity of strip footings on slopes. *Canadian Geotechnical Journal*, 42(1), 1-11.
- Kusakabe, O., Kimura, T., & Yamaguchi, H. (1981). Bearing capacity of slopes under strip loads. *Soils and Foundations*, 21(4), 29-40.
- Leshchinsky, D. (2015). Slope stability and bearing capacity analyses. In *Slope Stability and Stabilization Methods* (pp. 1-26). CRC Press.
- Lysmer, J. (1970). Limit analysis of plane problems in soil mechanics. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, 96(SM4), 1311-1334.
- Menard, L. (1964). Calcul de la force portante des fondations sur des talus. *Annales de l'Institut Technique du Bâtiment et des Travaux Publics*, 17(198), 553-568.
- Meyerhof, G. G. (1951). The ultimate bearing capacity of foundations. *Géotechnique*, 2(4), 301-332.
- Meyerhof, G. G. (1955). Influence of roughness of base and ground-water conditions on the ultimate bearing capacity of foundations. *Géotechnique*, 5(3), 227-242.
- Meyerhof, G. G. (1963). Some recent research on the bearing capacity of foundations. *Canadian Geotechnical Journal*, 1(1), 16-26.
- Michalowski, R. L. (1989). Bearing capacity of footings on slopes. *Journal of Geotechnical Engineering*, 115(1), 65-80.
- Modifi, A., Salimi, M., & Arabi, S. M. (2014). Ultimate bearing capacity of strip footings adjacent to slopes using finite element method. *International Journal of Civil Engineering*, 12(1), 1-10.
- Montgomery, D. C. (2001). *Design and analysis of experiments*. John Wiley & Sons.
- Motta, E., & Castelli, F. (2008). Bearing capacity of strip footings on slopes. *Canadian Geotechnical Journal*, 45(10), 1424-1435.
- Myers, R. H., & Montgomery, D. C. (1995). *Response surface methodology: Process and product optimization using designed experiments*. John Wiley & Sons.
- Myers, R. H., Montgomery, D. C., & Anderson-Cook, C. M. (2016). *Response surface methodology: Process and product optimization using designed experiments*. John Wiley & Sons.

- Narita, K., & Yamaguchi, H. (1990). Bearing capacity analysis of foundations on slopes by use of log-spiral sliding surfaces. *Soils and Foundations*, 30(3), 121-130.
- Patel, A. K., & Ahmad, K. (2021). Site-specific model for prediction of foundation settlement at ground surface. *Geotechnical and Geological Engineering*, 39(5), 4173-4184.
- Prabhu, S. M., & Sharma, R. S. (2019). Investigation of complex interactions and optimization of admixtures in cement-based soil stabilization. *Construction and Building Materials*, 227, 116685.
- Ranjith, P. C., Sriram, G., & Kumar, S. (2018). Prediction and improvement of bearing capacity in soil stabilization using response surface methodology. *Geotechnical and Geological Engineering*, 36(1), 439-451.
- Rao, S. M., & Patel, A. K. (2020). Influence of topographic slope, soil type and groundwater level on slope stability: A case study. *Geotechnical and Geological Engineering*, 38(1), 643-655.
- Rao, S. M., & Reddy, B. V. (2017). Application of response surface methodology for achieving maximum strength in soil compaction. *Geotechnical and Geological Engineering*, 35(1), 101-111.
- Saran, S., Sud, V. K., & Handa, S. C. (1989). Bearing capacity of foundations near slopes. *Journal of Geotechnical Engineering*, 115(4), 553-573.
- Shiau, J. S., Lyamin, A. V., & Sloan, S. W. (2011). Bearing capacity of a cohesive-frictional soil under non-eccentric inclined loading. *Computers and Geotechnics*, 38(4), 424-435.
- Shields, D. H., Bauer, G. E., Scott, J. D., & Deschênes, J. H. (1977). Bearing capacity of foundations near slopes. *Canadian Geotechnical Journal*, 14(1), 123-134.
- Shields, D. H., Chandler, N., & Garnier, J. (1990). Bearing capacity of foundations on or near slopes in sand and normally consolidated clay. *Canadian Geotechnical Journal*, 27(6), 741-749.
- Singh, T. N., & Sharma, R. S. (2014). Response surface methodology for optimization of conditions in improving soil strength. *Geotechnical and Geological Engineering*, 32(1), 151-160.
- Sivakumar, B., & Sriram, G. (2017). Potential of response surface methodology in optimizing chemical admixtures in soil stabilization. *Geotechnical and Geological Engineering*, 35(1), 113-123.
- Sivrikaya, F. (2021). *Şevli zeminlerde şerit temellerin taşıma kapasitesinin sonlu elemanlar yöntemi ile incelenmesi* (Yüksek lisans tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi).
- Sokolovski, V. V. (1960). *Statics of soil media*. Butterworths.
- Steuer, R. E. (1986). *Multiple criteria optimization: Theory, computation, and application*. John Wiley & Sons.
- Terzaghi, K. (1943). *Theoretical soil mechanics*. John Wiley & Sons.
- Terzaghi, K., & Peck, R. B. (1967). *Soil mechanics in engineering practice*. John Wiley & Sons.
- Vesic, A. S. (1973). Analysis of ultimate loads of shallow foundations. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, 99(SM1), 45-73.
- Vesic, A. S. (1975). Bearing capacity of shallow foundations. In *Foundation Engineering Handbook* (pp. 121-147). Van Nostrand Reinhold.

- Wu, C. F. J., & Hamada, M. S. (2009). *Experiments: Planning, analysis, and optimization*. John Wiley & Sons.
- Yang, X. L., Li, L. P., & Guo, Y. H. (2007). Bearing capacity of strip footings on slopes by method of energy dissipation and model test. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 133(10), 1280-1287.
- Yu, L. (2018). Bearing capacity of strip footings on slopes considering the influence of slope backfill. *Soils and Foundations*, 58(1), 147-156.
- Zhang, C., Zhang, L. M., & Li, K. S. (2015). Response surface method for modeling and optimizing ground improvement effects on bearing capacity. *Geotechnical and Geological Engineering*, 33(2), 373-384.



EKLER

Ek 1: YYY Kapsamında Oluşturulan Tasarım Matrisi

	X ₁ . (ϕ)	X ₂ . (B)	X ₃ . (D _i /H)	X ₄ . (D/B)	X ₅ . (H/B)	X ₆ . (β)	X ₇ . (c)	Y. (Pu/ γ B ²)
1	15	0.5	0	0	1.5	15	15	27.762
2	45	0.5	0	0	1.5	15	15	115.192
3	15	2	0	0	1.5	15	15	1.80438
4	45	2	0	0	1.5	15	15	5.20875
5	15	0.5	0.5	0	1.5	15	15	42.976
6	45	0.5	0.5	0	1.5	15	15	351.6
7	15	2	0.5	0	1.5	15	15	5.61675
8	45	2	0.5	0	1.5	15	15	5.159
9	15	0.5	0	4	1.5	15	15	37.142
10	45	0.5	0	4	1.5	15	15	112.324
11	15	2	0	4	1.5	15	15	2.63888
12	45	2	0	4	1.5	15	15	6.57325
13	15	0.5	0.5	4	1.5	15	15	19.224
14	45	0.5	0.5	4	1.5	15	15	533.8
15	15	2	0.5	4	1.5	15	15	5.61637
16	45	2	0.5	4	1.5	15	15	12.9812
17	15	0.5	0	0	6	15	15	29.364
18	45	0.5	0	0	6	15	15	148.888
19	15	2	0	0	6	15	15	2.14925
20	45	2	0	0	6	15	15	12.4555
21	15	0.5	0.5	0	6	15	15	95.984
22	45	0.5	0.5	0	6	15	15	208.4
23	15	2	0.5	0	6	15	15	7.9185
24	45	2	0.5	0	6	15	15	38.25
25	15	0.5	0	4	6	15	15	39.984
26	45	0.5	0	4	6	15	15	179.184
27	15	2	0	4	6	15	15	2.86788
28	45	2	0	4	6	15	15	20.4
29	15	0.5	0.5	4	6	15	15	117.198
30	45	0.5	0.5	4	6	15	15	1054
31	15	2	0.5	4	6	15	15	29.0625
32	45	2	0.5	4	6	15	15	56.725
33	15	0.5	0	0	1.5	45	15	27.82
34	45	0.5	0	0	1.5	45	15	96.534
35	15	2	0	0	1.5	45	15	0.561625
36	45	2	0	0	1.5	45	15	7.22363
37	15	0.5	0.5	0	1.5	45	15	34.24
38	45	0.5	0.5	0	1.5	45	15	247.8
39	15	2	0.5	0	1.5	45	15	1.7645
40	45	2	0.5	0	1.5	45	15	11.43

41	15	0.5	0	4	1.5	45	15	28.746
42	45	0.5	0	4	1.5	45	15	77.892
43	15	2	0	4	1.5	45	15	2.639
44	45	2	0	4	1.5	45	15	6.29275
45	15	0.5	0.5	4	1.5	45	15	50.814
46	45	0.5	0.5	4	1.5	45	15	352
47	15	2	0.5	4	1.5	45	15	4.576
48	45	2	0.5	4	1.5	45	15	11.7528
49	15	0.5	0	0	6	45	15	15.4024
50	45	0.5	0	0	6	45	15	80.412
51	15	2	0	0	6	45	15	0.680625
52	45	2	0	0	6	45	15	11.2739
53	15	0.5	0.5	0	6	45	15	35.734
54	45	0.5	0.5	0	6	45	15	303.6
55	15	2	0.5	0	6	45	15	0.0125
56	45	2	0.5	0	6	45	15	19.675
57	15	0.5	0	4	6	45	15	13.897
58	45	0.5	0	4	6	45	15	71.69
59	15	2	0	4	6	45	15	1.08746
60	45	2	0	4	6	45	15	6.45287
61	15	0.5	0.5	4	6	45	15	61.336
62	45	0.5	0.5	4	6	45	15	184.51
63	15	2	0.5	4	6	45	15	5.61975
64	45	2	0.5	4	6	45	15	75.3287
65	15	0.5	0	0	1.5	15	125	247.6
66	45	0.5	0	0	1.5	15	125	726.6
67	15	2	0	0	1.5	15	125	7.97475
68	45	2	0	0	1.5	15	125	21.2
69	15	0.5	0.5	0	1.5	15	125	313.8
70	45	0.5	0.5	0	1.5	15	125	1242.48
71	15	2	0.5	0	1.5	15	125	24.9337
72	45	2	0.5	0	1.5	15	125	69.225
73	15	0.5	0	4	1.5	15	125	304
74	45	0.5	0	4	1.5	15	125	858
75	15	2	0	4	1.5	15	125	18.5875
76	45	2	0	4	1.5	15	125	6.02625
77	15	0.5	0.5	4	1.5	15	125	383.48
78	45	0.5	0.5	4	1.5	15	125	1242.26
79	15	2	0.5	4	1.5	15	125	24.9375
80	45	2	0.5	4	1.5	15	125	84.4875
81	15	0.5	0	0	6	15	125	283.06
82	45	0.5	0	0	6	15	125	547.4
83	15	2	0	0	6	15	125	16.4862
84	45	2	0	0	6	15	125	61.815
85	15	0.5	0.5	0	6	15	125	240
86	45	0.5	0.5	0	6	15	125	2104

87	15	2	0.5	0	6	15	125	31.675
88	45	2	0.5	0	6	15	125	77.6262
89	15	0.5	0	4	6	15	125	39.814
90	45	0.5	0	4	6	15	125	582.8
91	15	2	0	4	6	15	125	19.5875
92	45	2	0	4	6	15	125	30.5325
93	15	0.5	0.5	4	6	15	125	521.46
94	45	0.5	0.5	4	6	15	125	2162.4
95	15	2	0.5	4	6	15	125	33.645
96	45	2	0.5	4	6	15	125	76.84
97	15	0.5	0	0	1.5	45	125	184.754
98	45	0.5	0	0	1.5	45	125	620.4
99	15	2	0	0	1.5	45	125	9.39175
100	45	2	0	0	1.5	45	125	10.625
101	15	0.5	0.5	0	1.5	45	125	65.402
102	45	0.5	0.5	0	1.5	45	125	1336.4
103	15	2	0.5	0	1.5	45	125	15.0325
104	45	2	0.5	0	1.5	45	125	51.2863
105	15	0.5	0	4	1.5	45	125	91.816
106	45	0.5	0	4	1.5	45	125	712.76
107	15	2	0	4	1.5	45	125	17.7413
108	45	2	0	4	1.5	45	125	58.2625
109	15	0.5	0.5	4	1.5	45	125	335.84
110	45	0.5	0.5	4	1.5	45	125	1544.08
111	15	2	0.5	4	1.5	45	125	22.29
112	45	2	0.5	4	1.5	45	125	56.6138
113	15	0.5	0	0	6	45	125	175.298
114	45	0.5	0	0	6	45	125	459.1
115	15	2	0	0	6	45	125	13.4462
116	45	2	0	0	6	45	125	43.4825
117	15	0.5	0.5	0	6	45	125	315.64
118	45	0.5	0.5	0	6	45	125	1200.46
119	15	2	0.5	0	6	45	125	24.1075
120	45	2	0.5	0	6	45	125	49.6812
121	15	0.5	0	4	6	45	125	165.568
122	45	0.5	0	4	6	45	125	423.72
123	15	2	0	4	6	45	125	16.13
124	45	2	0	4	6	45	125	10.1581
125	15	0.5	0.5	4	6	45	125	393.5
126	45	0.5	0.5	4	6	45	125	2151.6
127	15	2	0.5	4	6	45	125	33.645
128	45	2	0.5	4	6	45	125	164.813
129	15	1.25	0.25	2	3.75	30	70	27.5613
130	45	1.25	0.25	2	3.75	30	70	91.6096
131	30	0.5	0.25	2	3.75	30	70	356.8
132	30	2	0.25	2	3.75	30	70	22.0162

133	30	1.25	0	2	3.75	30	70	33.6736
134	30	1.25	0.5	2	3.75	30	70	78.7456
135	30	1.25	0.25	0	3.75	30	70	50.6336
136	30	1.25	0.25	4	3.75	30	70	79.776
137	30	1.25	0.25	2	1.5	30	70	54.1696
138	30	1.25	0.25	2	6	30	70	75.1328
139	30	1.25	0.25	2	3.75	15	70	79.8624
140	30	1.25	0.25	2	3.75	45	70	50.2464
141	30	1.25	0.25	2	3.75	30	15	20.24
142	30	1.25	0.25	2	3.75	30	125	68.4922



ÖZ GEÇMİŞ

Alper GÜCÜYENER ... yılında ...'da doğdu. İlköğrenimini Hüsrevpaşa İlköğretim Okulunda, orta öğrenimini, Kazım Karabekir Lisesinde tamamladı. 2009 yılında Bayburt Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü'nü kazandı ve 2013 yılında bu bölümden mezun oldu. 2023 yılında Bayburt Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı'nda yüksek lisans öğrenimine başladı.

