



T.C.
KONYA TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ



GERİ DÖNÜŞTÜRÜLMÜŞ BETON
AGREGALI GEOPOLİMER KAZIKLARIN
PERFORMANSININ DENEYSEL VE
NÜMERİK OLARAK ARAŞTIRILMASI

Ekrem Burak TOKA

DOKTORA TEZİ

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Aralık-2025
KONYA
Her Hakkı Saklıdır

TEZ KABUL VE ONAYI

Ekrem Burak TOKA tarafından hazırlanan “Geri Dönüştürülmüş Beton Agregalı Geopolimer Kazıkların Performansının Deneysel ve Nümerik Olarak Araştırılması” adlı tez çalışması 31/12/2025 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Konya Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı’nda DOKTORA TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

İmza

Başkan

Prof. Dr. Ülkü Sultan KESKİN
(Konya Teknik Üniversitesi)

.....

Danışman

Prof. Dr. Murat OLGUN
(Konya Teknik Üniversitesi)

.....

Üye

Prof. Dr. Abdulazim YILDIZ
(Çukurova Üniversitesi)

.....

Üye

Prof. Dr. Mustafa YILDIZ
(Konya Teknik Üniversitesi)

.....

Üye

Dr. Öğr. Üyesi Yakup TÜREDİ
(İskenderun Teknik Üniversitesi)

.....

Yukarıdaki sonucu onaylarım.

Prof. Dr. Mevlüt UYAN
Enstitü Müdürü

Bu tez çalışması TÜBİTAK tarafından 223M075 numaralı proje ve Konya Teknik Üniversitesi BAP koordinatörlüğü tarafından 241104007 numaralı proje ile desteklenmiştir.

TEZ BİLDİRİMİ

Bu tezdeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edildiğini ve tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

DECLARATION PAGE

I hereby declare that all information in this document has been obtained and presented in accordance with academic rules and ethical conduct. I also declare that, as required by these rules and conduct, I have fully cited and referenced all material and results that are not original to this work.

Ekrem Burak TOKA

Tarih: 31.12.2025

ÖZET

DOKTORA TEZİ

GERİ DÖNÜŞTÜRÜLMÜŞ BETON AGREGALI GEOPOLİMER KAZIKLARIN PERFORMANSININ DENEYSEL VE NÜMERİK OLARAK ARAŞTIRILMASI

Ekrem Burak TOKA

**Konya Teknik Üniversitesi
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı**

**Danışman: Prof. Dr. Murat OLGUN
İkinci Danışman: Doç. Dr. İbrahim Hakkı ERKAN**

2025, 262 Sayfa

Jüri

**Prof. Dr. Murat OLGUN
Prof. Dr. Ülkü Sultan KESKİN
Prof. Dr. Abdulazim YILDIZ
Prof. Dr. Mustafa YILDIZ
Dr. Öğr. Üyesi Yakup TÜREDİ**

Son yıllarda tüm sektörlerde çevre dostu süreçlerin yürütülmesine ve sürdürülebilirliğe büyük önem gösterilmektedir. Buna paralel olarak, inşaat mühendisliği uygulama alanlarında çevre dostu üretim ve sürdürülebilirlik her geçen gün daha önemli hale gelmektedir. Buna göre, inşaat mühendisliğinin bir alt dalı olan geoteknik mühendisliğinde de çevre dostu (yeşil) tekil kazık ve kazıklı radye sistemlerinin tasarlanması sürdürülebilirliğe katkı sağlayacaktır. Bu amaçla, bu tez kapsamında geri dönüştürülmüş beton agregalı (GDBA) geopolimer bağlayıcılı tekil kazık ve kazıklı radye sistemlerinin davranışı incelenmiştir. Tezin ilk aşamasında; öncül malzemesi (ÖM) olarak F sınıfı uçucu kül (UK), silis dumanı (SD) ve yüksek fırın cürufu (YFC), agrega olarak GDBA ve aktivatör çözelti (AÇ) olarak sodyum silikat (SS, Na_2SiO_3) ve sodyum hidroksit (SH, NaOH) çözeltilerinin karışımının kullanıldığı GDBA'lı geopolimer harçlar (GGH) oluşturulmuştur. Bu harçların dayanım, dayanıklılık, işlenebilirlik ve priz başlangıcı özellikleri incelenmiştir. SD/ÖM, YFC/ÖM, SS/SH, NaOH molaritesi, AÇ/ÖM ve GDBA/ÖM değişkenlerinin basınç dayanımı, eğilme dayanımı ve yayılma değeri üzerindeki etkisi 13 karışımdan oluşan kesin eleme tasarımı (KET) ile belirlenmiştir. Harç performansı üzerinde en çok etkili olan 4 değişken seçilmiş ve bir yanıt yüzey yöntemi (YYY) olan merkezi kompozit tasarım (MKT) ile 27 karışımdan oluşan bir tasarım hazırlanmıştır. MKT karışımları için oda koşullarında 7 ve 28 gün kür edilmiş numunelerin basınç ve eğilme dayanımları ile priz başlangıç süresi ve yayılma değerleri belirlenmiştir. Ayrıca, oda koşullarında 28 gün kür edilmiş numunelerin belirli sürelerde magnezyum sülfat (MgSO_4) ve sodyum klorür (NaCl) çözeltilerinde bekletildikten sonra kütle kayıpları ile basınç ve eğilme dayanımları belirlenerek GGH'nin dayanıklılığı değerlendirilmiştir. Deney sonuçlarına göre seçilen numuneler için X-ışını kırınımı (XRD) ve taramalı elektron mikroskobu (SEM) analizleri yapılmıştır. Dayanım, dayanıklılık, işlenebilirlik ve priz başlangıç süresi kriterlerine göre optimum GGH tasarımı belirlenmiştir. Tezin ikinci aşamasında, ilk aşamasında belirlenmiş optimum GGH ile üretilmiş olan tekil kazık ve kazıklı radye sistemlerinin düşey yükleme altındaki davranışı incelenmiştir. Öncelikle tekil olarak GGH'den üretilen kazıkların düşey yükleme altında yük-oturma davranışı, kazıklarda oluşan eksenel yükler ve zeminde oluşan gerilmeler belirlenmiştir. Kazıklı radye davranışını incelemek için kazık uzunluğu (L_k) / kazık çapı (D_k), kazık aksları arası mesafe (s_k), kum zeminin rölatif sıklığı (D_{rkum}) ve kazık sayısının (N_k) değişken olduğu Taguchi L9 tasarımı

oluşturulmuştur. Bu tasarıma göre üretilmiş kazıklı radye sistemleri için düşey yükleme altında kazıklı radye sisteminin gerilme-oturma davranışı, kazıklarda oluşan eksenel yükler, kazık-radye yük paylaşımı ve zeminde oluşan gerilmeler belirlenmiştir. Yüklemeler küçük ölçekli model deney düzeneğinde yapılmıştır. Sonlu elemanlar yöntemini esas alan sayısal analiz sonuçları ile deneysel veriler kıyaslanmıştır. GGH'nin tekil kazıklarda ve kazıklı radye sistemlerinde kullanılması ile sürdürülebilirliğe katkı sağlanması ve bilimsel veriler elde edilmesi bu tezi özgün kılmaktadır. Böylelikle, geoteknik uygulamalarında karşılaşılan olumsuz ortam koşulları için (sülfat içeren zemin, sülfatlı su ve tuzlu su) zm olabilecek, alternatif tekil kazık ve kazıklı radye türünün davranışı ortaya konulmuştur. Ayrıca, literatürdeki bilgi birikimi anlamında hala eksiklikleri olan tekil kazıklarda ve kazıklı radye sistemlerinde; düşey yükleme durumlarında kazıkların ve radyenin davranışı ile zeminde oluşan gerilmeler detaylı bir şekilde araştırılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Dayanıklılık, Dayanım, Düşey yükleme, Geopolimer, Geri dönüştürülmüş beton agregası, Kazıklı radye, Küçük lekli model, Tekil kazık



ABSTRACT

PhD THESIS

EXPERIMENTAL AND NUMERICAL INVESTIGATION OF THE PERFORMANCE OF GEOPOLYMER PILES WITH RECYCLED CONCRETE AGGREGATE

Ekrem Burak TOKA

**Konya Technical University
Institute of Graduate Studies
Department of Civil Engineering**

Advisor: Prof. Dr. Murat OLGUN

Second Advisor: Assoc. Prof. Dr. İbrahim Hakkı ERKAN

2025, 262 Pages

Jury

**Prof. Dr. Murat OLGUN
Prof. Dr. Ülkü Sultan KESKİN
Prof. Dr. Abdulazim YILDIZ
Prof. Dr. Mustafa YILDIZ
Dr. Öğr. Üyesi Yakup TÜREDİ**

In recent years, attention has been paid to carrying out environmentally friendly processes and sustainability in all business sectors. Accordingly, environmentally friendly production and sustainability are becoming more important gradually in civil engineering. Therefore, designing environmentally friendly (green) single pile and piled raft systems will contribute to sustainability in geotechnical engineering, which is a branch of civil engineering. For this purpose, the behavior of single pile and piled raft systems with recycled concrete aggregate (RCA) and geopolymer binder was examined within the scope of this thesis. In the first phase of the thesis; geopolymer mortars with RCA (RGM) were prepared using class F fly ash (FA), silica fume (SF) and ground granulated blast furnace slag (GGBFS) as precursor materials (PM), RCA as aggregate and mixture of sodium silicate (SS, Na_2SiO_3) and sodium hydroxide (SH, NaOH) as activator solution (AS). Strength, durability and workability properties of these mortars were examined. Effects of SF/PM, GGBFS/PM, SS/SH, NaOH molarity, AS/PM and RCA/PM variables on compressive strength, flexural strength, initial setting time and flow values were determined by a definitive screening design (DSD) consisting of 13 mixtures. Four variables that are most effective on mortar performance were selected and a design consisting of 27 mixtures were prepared with the central composite design (CCD), which is a response surface method (RSM). For CCD mixtures, compressive and flexural strengths, initial setting time and flow values of specimens cured for 7 and 28 days under ambient conditions were determined. In addition, the durability was evaluated by determining the mass losses, compressive and flexural strengths of the specimens cured for 28 days at ambient conditions after being kept in magnesium sulfate (MgSO_4) and sodium chloride (NaCl) solutions for certain periods. X-ray diffraction (XRD) and scanning electron microscopy (SEM) analyses were performed on the selected samples based on the test results. The optimum RGM design was determined based on the criteria of strength, durability, workability, and setting time. In the second phase of the thesis, the behavior of single pile and piled raft systems produced with the optimum RGM determined in the first phase was investigated under vertical loading. Firstly, the load-settlement behavior of single piles produced with GGH, the axial loads in the piles, and the stress distribution in the soil were determined under vertical loading. To investigate the behavior of piled raft foundations, a Taguchi L9 design was created where pile length (L_p) / pile diameter (D_p), distance

between pile axes (s_p), relative density of sand soil (D_{rsand}), and number of piles (N_p) are variables. For the piled raft systems produced according to this design, load-settlement behavior of the piled raft, axial loads on the piles, pile-raft load sharing, and stress distribution in the soil were determined under vertical loading. Loading was performed in a small-scale model experimental setup. The results of numerical analysis based on the finite element method were compared with experimental data. The contribution to sustainability and the acquisition of scientific data by using RGM in single piles and piled raft systems make this thesis original. Thus, the behavior of alternative single pile and pile raft systems, which can provide solutions for adverse environmental conditions (sulfate-containing soil, sulfate water, and saline water) encountered in geotechnical applications, was presented. Furthermore, for single piles and piled raft systems, which still exhibit gaps in the existing literature, the behavior of the piles and the piled raft under vertical loading, together with the stresses developed in the soil, were examined in detail.

Keywords: Durability, Geopolymer, Piled raft, Recycled concrete aggregate, Single pile, Small scale model, Strength, Vertical loading



ÖNSÖZ

Doktora tez çalışmamda desteğini esirgemeyen danışmanım Prof. Dr. Murat OLGUN'a ve tezin ikinci danışmanı Doç. Dr. İbrahim Hakkı ERKAN'a teşekkür eder ve saygılarımı sunarım.

Çalışma hayatım boyunca ve doktora tez çalışmamda değerli bilgileri ile bana yol gösteren Prof. Dr. Mustafa YILDIZ'a, Prof. Dr. Ülkü Sultan KESKİN'e ve Dr. Öğr. Üyesi Atila DEMİRÖZ'e teşekkür ederim.

Doktora tez çalışmamda yaşadığım her türlü sorunda kendi çalışmaları da yoğun ve sıkıntılı devam etmesine rağmen yardımını ve tecrübesini esirgemeyen, değerli çalışma arkadaşım ve çalışmalarındaki en büyük destekçim Öğr. Gör. Alican ŞENKAYA'ya en samimi şekilde şükranlarımı sunarım.

Tez çalışmamın Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu'nun (TÜBİTAK) 223M075 numaralı ve Konya Teknik Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri (BAP) koordinatörlüğünün 241104007 numaralı projesi kapsamında tamamlanması nedeniyle TÜBİTAK'a ve Konya Teknik Üniversitesi'ne teşekkür ederim.

Hayatımın her aşamasında olduğu gibi doktora tez çalışmam sırasında manevi destekleri ile beni rahatlatan, çalışmalarımı teşvik eden, yaşadığım sorunlarda destekçim olan ve çalışmalarına da bizzat yardımcı olan sevgili babam Zeki Semih TOKA ve sevgili annem Sevgi TOKA'ya en içten şekilde teşekkür ederim.

Ekrem Burak TOKA
KONYA-2025

İÇİNDEKİLER

ÖZET	iv
ABSTRACT.....	vi
ÖNSÖZ	viii
İÇİNDEKİLER	ix
SİMGELER VE KISALTMALAR	xi
1. GİRİŞ	1
2. KAYNAK ARAŞTIRMASI	8
2.1. GGH ile İlgili Araştırmalar	8
2.2. Kazıklı Radye Sistemleri ile İlgili Araştırmalar	21
3. MATERYAL VE YÖNTEM.....	30
3.1. GGH Bileşenleri ve Deney Kumu	30
3.1.1. Öncül malzeme (ÖM)	30
3.1.2. Aktivatör çözelti (AÇ)	33
3.1.3. Agregası (GDBA).....	34
3.1.4. Küçük ölçekli model deneylerde kullanılan kum	36
3.2. GGH Performansının İncelenmesi	42
3.2.1. KET oluşturulması ve değişkenlerin belirlenmesi.....	42
3.2.2. MKT oluşturulması ve performans değerlendirilmesi	44
3.2.3. GGH numunelerinin oluşturulması.....	49
3.2.4. Basınç ve eğilme dayanımı deneyleri	50
3.2.5. GGH'nin dayanıklılığının değerlendirilmesi	51
3.2.6. GGH'nin işlenebilirlik ve priz süresi belirleme deneyleri.....	52
3.2.7. Optimum GGH belirlenmesi.....	53
3.2.8. Optimum karışım için GDBA'lı geopolimer beton dayanımının ve dayanıklılığının belirlenmesi	55
3.3. Küçük Ölçekli Model Deneyler ve Sayısal Analizler.....	56
3.3.1. Kazıklı radye için Taguchi L9 tasarımı ve tekil kazıklar için tasarım.....	56
3.3.2. Deney düzeneği.....	58
3.3.3. Deney kazıklarının üretilmesi	59
3.3.4. Küçük ölçekli model deneylerde ölçümler	63
3.3.5. Deney kumunun ve kazıkların yerleştirilmesi	69
3.3.6. Deneysel verilerin değerlendirilmesi	75
3.3.7. Sayısal analizler ve deney verileri ile karşılaştırma.....	76
4. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA.....	83
4.1. KET ile Performans Değerlendirmesi.....	83
4.1.1. KET karışımlarının yayılma değerleri	83
4.1.2. KET karışımlarının basınç dayanımları	84

4.2. MKT ile Performans Değerlendirmesi ve Optimizasyon Çalışması	86
4.2.1. MKT karışımlarının yayılma değerleri	86
4.2.2. MKT karışımlarının priz başlangıç süreleri	88
4.2.3. MKT karışımlarının basınç ve eğilme dayanımları	91
4.3. Sülfat Hücumu Etkisi	98
4.4. Sodyum Klorür Hücumu Etkisi	106
4.5. SEM ve XRD Analizleri	115
4.6. Optimum GGH, Kontrol Deneyleri ve GDBA'lı Geopolimer Beton	126
4.7. Tekil Kazıklarda Düşey Yükleme	128
4.7.1. Kuvvet-oturma davranışı	128
4.7.2. Kazıklarda eksenel kuvvet ve çevre sürtünmesi	133
4.7.3. Zeminde meydana gelen gerilmeler	143
4.8. Kazıklı Radye Sistemlerinde Düşey Yükleme	163
4.8.1. Gerilme-oturma davranışı	163
4.8.2. Kazık-radye yük paylaşımı	171
4.8.3. Kazıklarda ortalama eksenel kuvvet ve çevre sürtünmesi	177
4.8.4. Zeminde meydana gelen gerilmeler	189
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	223
5.1. Sonuçlar	223
5.2. Öneriler	227
KAYNAKLAR	230
EKLER	242

SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

A_D	: Alt sınır
B_r	: Radye kısa kenar uzunluğu
c	: Kohezyon (kPa)
D_0	: Basınç dayanımı düşük seviyede numune
D_D	: Genel istenirlik fonksiyonu ve değeri
d_i	: Bireysel istenirlik
D_k	: Kazık çapı
DM	: Düşük dayanımlı, $MgSO_4$ çözeltisinde bekletilmiş numune
DN	: Düşük dayanımlı, $NaCl$ çözeltisinde bekletilmiş numune
D_{rkum}	: Kumun rölatif sıkılığı
E_{50}	: Sekant modülü (kPa)
E_{oed}	: Ödometrik modül (kPa)
E_r	: Radye rijitliği
E_{ur}	: Boşaltma - yeniden yükleme modülü (kPa)
E_z	: Zemin rijitliği
H_D	: Hedef
H_{kr}	: Kritik düşme yüksekliği (m)
k	: Girdi değişkeni sayısı
K_r	: Radye rijitliği
L_{er}	: Eşdeğer radye genişliği
L_k	: Kazık uzunluğu
L_r	: Radyenin uzun kenar uzunluğu
m_r	: Zemin rijitliğinin gerilme seviyesine bağımlılık üssü
n	: Taguchi yönteminde deney tekrar sayısı
N_k	: Kazık sayısı
O_0	: Basınç dayanımı orta seviyede numune
OM	: Orta seviyede dayanımlı, $MgSO_4$ çözeltisinde bekletilmiş numune
ON	: Orta seviyede dayanımlı, $NaCl$ çözeltisinde bekletilmiş numune
R^2	: Determinasyon katsayısı
R^2_d	: Düzeltilmiş determinasyon katsayısı
R^2_t	: Tahmin edilen determinasyon katsayısı
r_D	: Eğim katsayısı
R_{inter}	: Yapı-zemin arayüzü dayanım indirgeme katsayısı
s_D	: Eğim katsayısı
s_k	: Kazık aksları arası mesafe
t_r	: Radye kalınlığı
U_D	: Üst sınır
u_v	: Oturma

w_i	: Sonuçların önem katsayısı
x_{dd}	: Dış daralma noktası
x_{ei}	: En iyi nokta
x_g	: Genişleme noktası
x_{id}	: İç daralma noktası
x_k	: Küçültme noktası
x_m	: Merkez nokta
x_{n+1}	: En kötü nokta
x_y	: Yansıma noktası
y	: Sonuç
Y_0	: Basınç dayanımı yüksek seviyede numune
Y_M	: Yüksek dayanımlı, $MgSO_4$ çözeltisinde bekletilmiş numune
Y_n	: Taguchi yönteminde deney sonuçları
Y_N	: Yüksek dayanımlı, $NaCl$ çözeltisinde bekletilmiş numune
α	: MKT'de merkez ve eksenel noktalar arasındaki uzaklık
α_{nm}	: Yansıma katsayısı
β	: İstatistiksel modelde sabit veya katsayı
β_{nm}	: Daralma katsayısı
γ_{nm}	: Genişleme katsayısı
δ_{nm}	: Küçültme katsayısı
ε	: Birim deformasyon
ε_{hata}	: İstatistiksel modelde hata terimi
σ	: Asal gerilme
σ_1	: Büyük asal gerilme (kPa)
σ_3	: Küçük asal gerilme (kPa)
τ	: Kayma gerilmesi
ν_r	: Radyenin poisson oranı
ν_z	: Zeminin poisson oranı
ϕ	: İçsel sürtünme açısı ($^\circ$)
ψ	: Zeminin dilatasyon açısı ($^\circ$)

Kısaltmalar

ANOVA	: Varyans analizi
AÇ	: Aktivatör çözelti
C-A-S-H	: Kalsiyum-alümina-silikat-hidrat
C-S-H	: Kalsiyum-silikat-hidrat
GDA	: Geri dönüştürülmüş agrega
GDBA	: Geri dönüştürülmüş beton agregası
GGH	: Geri dönüştürülmüş beton agregalı geopolimer harç
İS	: İlave su

KET	: Kesin eleme tasarımı
MAPE	: Ortalama mutlak yüzde hata
MKT	: Merkezi kompozit tasarım
N-A-S-H	: Sodyum-alümina-silikat-hidrat
OÇS	: Ortalama çevre sürtünmesi
OEK	: Ortalama eksenel kuvvet
ÖM	: Öncül malzeme
SD	: Silis dumanı
SEM	: Taramalı elektron mikroskobu
SH	: Sodyum hidroksit
SS	: Sodyum silikat
UK	: Uçucu kül
XRD	: X-ışını kırınımı
YFC	: Yüksek fırın cürufu
YYY	: Yanıt yüzey yöntemi
ZB	: Zemin basınç ölçer

1. GİRİŞ

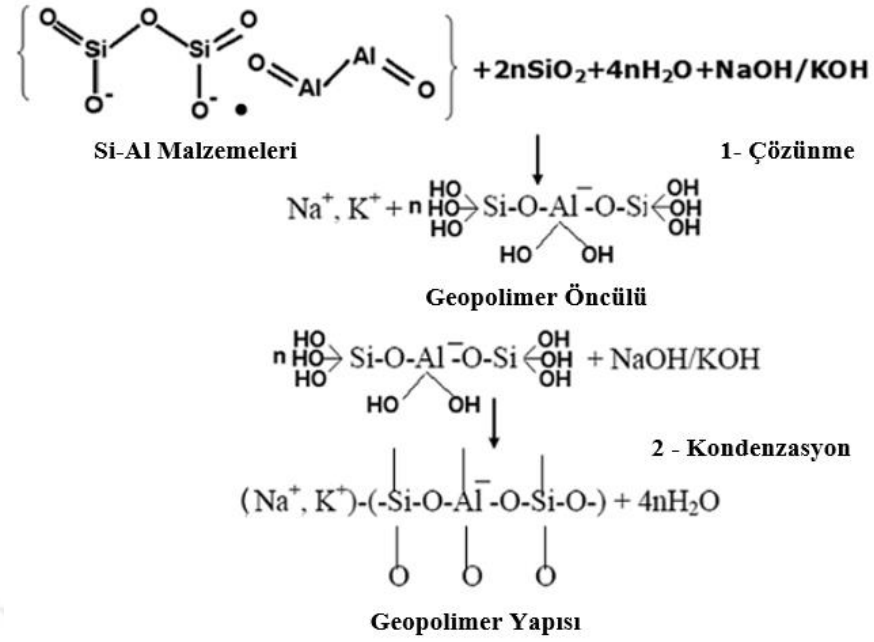
Sürdürülebilirlik ve çevre dostu malzemelerin inşaat faaliyetleri için üretimi/kullanımı özellikle gelişmiş ülkelerde gün geçtikte daha fazla dikkat çeken ve önemli hale gelen bir konudur. Sürdürülebilirlik, doğal kaynakların tükenmesi ve gelecekte buna bağlı olarak karşılaşılabilecek ham madde sıkıntısının aşılması için özenle üzerinde durulması gereken bir süreçtir. Çevre dostu üretim ve kullanım, gelecekte dünyayı yaşanmaz bir hale getirecek çevre kirliliğine neden olan üretim ve kullanım yöntemlerinin artık terkedilmesi ve yeni yöntemlerin geliştirilmesini kapsamaktadır. Bu tez kapsamında geri dönüştürülmüş malzemelerin geoteknik mühendisliği uygulamalarında kullanımının yaygınlaştırılması, dolayısıyla sıfırdan üretimlerin yerini kısmen de olsa alması, çevreci ve ekonomik bir yaklaşım ortaya konulması hedeflenmektedir. Bunun için üretim aşamasında agrega olarak geri dönüştürülmüş beton agregası (GDBA), öncül malzeme (ÖM) olarak endüstriyel atıklardan olan F sınıfı uçucu kül (UK), silis dumanı (SD) ve yüksek fırın cürufunun (YFC) kullanıldığı geopolimer malzemenin üretilmesi planlanmıştır. Bu malzemenin magnezyum sülfat ($MgSO_4$) ve sodyum klorür ($NaCl$) içeren zararlı zemin ortamı şartları da dikkate alınarak optimize edilmesi ve geoteknik mühendisliği uygulamalarından olan tekil kazık ve kazıklı radye sistemleri için küçük ölçekli model deneylerle kullanılabilirliğinin araştırılması amaçlanmıştır.

GDBA'lı geopolimer harcın (GGH) ve kazıklı radye sistemlerinin birlikte incelenmesi ile ilgili literatürde herhangi bir çalışmanın olmaması ve bu alanda bir boşluk bulunması konu hakkında çalışma yapılmasına teşvik edici unsur olmuştur. Konunun başka önemli bir yanı da agregası GDBA ve bağlayıcısı atıklardan oluşan ÖM (UK, SD ve YFC) içeren geopolimer harcın kazıklı radye malzemesi olarak kullanılması ile yeşil temel sistemlerinin oluşturulabilmesi ve doğa dostu bir temel inşaatı sürecinin gerçekleştirilebilecek olmasıdır.

Kentsel dönüşüm süreçleri kapsamında yıkıntı atıkları stok sahalarında biriktirilmekte ve yığın alanları her geçen yıl büyümektedir. Ülkemizde deprem riski yüksek olan iller başta olmak üzere kentsel dönüşüm süreçlerinin hızlanması ile atık miktarının daha da artması beklenmektedir. Yıkıntı atığı betonların önemli bir kısmı atık depo sahalarına gönderilmeden geri dönüştürülerek inşaat sektöründe geri dönüştürülmüş agrega (GDA) olarak kullanılabilir (Xu ve diğ., 2021a). GDA'nın GDBA olarak tanımlanabilmesi için en az %95 oranında kırılmış betondan oluşması gerekmektedir (BS

EN 8500-2, 2006). Birleşik Krallık'ta yıllık ortalama agrega ihtiyacı 200 milyon ton civarında olup, bu talebin 57 milyon tonu geri dönüştürülmüş veya ikincil kaynaklardan karşılanmaktadır (SEPA Guidance, 2013). Amerika Birleşik Devletleri'nde 2015 yılında yıkımlar sonucu ortaya çıkan ve diğer yıkıntılardan ayrıştırılmış atık beton miktarı 382 milyon ton olup, yüzdelik dağılıma bakıldığında tüm atıklar içerisinde beton atıklarının %69,7 oranıyla büyük çoğunluğu oluşturduğu görülmektedir (U.S. EPA, 2018).

Endüstrileşmiş ülkelerde doğal kaynakların %40'ı inşaat sektörü ile ilgili süreçlerde kullanılmaktadır (Aghdam ve diğ., 2018). Bununla birlikte atmosfere salınan karbon dioksitin yaklaşık %8'i çimento üretimi sonucunda ortaya çıkmaktadır (Olivier ve Peters, 2020). Ayrıca, çimento ile üretilen betonların atık sahalarında depolanması ile çevre kirliliği oluşmaktadır. Bu nedenle, çimento kullanılarak oluşturulan betonun mekanik özelliklerine eş değer veya daha üstün özelliklere sahip olan yeni alternatif malzemelerin elde edilmesi önemli olmaktadır. Son yıllarda çimentonun alternatifi bir malzeme olarak ortaya çıkan geopolimerin (Wu ve diğ., 2021) özellikle üretim aşamasındaki belirsizlikleri tam olarak giderilememiş olup, halen çalışmalara devam edilmektedir. Bir yeşil teknoloji ürünü olan geopolimer ilk olarak Davidovits (1982) tarafından ortaya konulmuştur. Geopolimer; amorf fazda silikat (SiO_2) ve alüminat (Al_2O_3) bakımından zengin olan UK, YFC ve SD gibi ÖM'nin aktivatör çözelti (AÇ) ile bir araya gelerek oluşturduğu bir inorganik alümina-silikat malzemesi olarak tanımlanmaktadır (Fernández-Jiménez ve diğ., 2006). Buna göre öncelikle oksitli mineraller (SiO_2 ve Al_2O_3 içeren vb.) yüksek alkali (bazik) çözeltide çözünmekte, çözülmüş mineraller kondenzasyon ile birleşmekte, son aşamada ise polikondenzasyon ile 3 boyutlu sağlam bir yapı oluşmaktadır (Silva ve diğ., 2007) (Şekil 1.1). Bu üretim süreci genellikle UK, YFC ve SD gibi atık malzemelerin ÖM olarak kullanılabilmesi ile gerçekleştirilebildiğinden geopolimer üretimi, oldukça az miktarda karbon dioksit salınımı meydana getirmesi ve atık malzemelerin yeniden kullanımı ile çevre dostu bir yapı malzemesi oluşturmaya imkan sağlamaktadır (Gomes, ve diğ., 2019; Mohajerani, ve diğ., 2019).



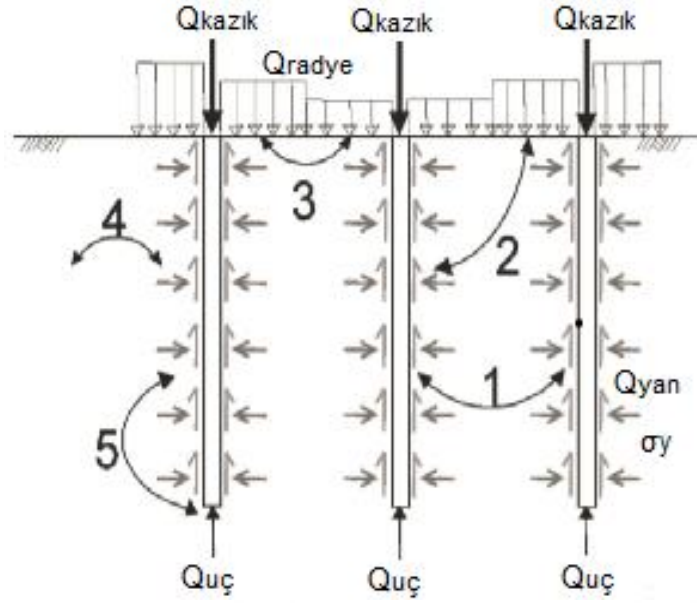
Şekil 1.1. Geopolimerin oluşumu (Zhang ve diğ., 2018; Xu ve diğ., 2021a)

Sürdürülebilirliğe katkı sağlamak amacıyla GDA'ların geopolimer beton üretiminde kullanımı ile ilgili günümüze kadar yapılan araştırmalar oldukça yetersiz olmuştur. Son zamanlarda ise, bu konudaki çalışmalar artma eğilimindedir. Bu çalışmalarda geopolimer harç veya beton; agrega, ÖM ve AÇ karışımından oluşmaktadır. Geopolimer harcın geopolimer betondan farkı agregasının kum malzeme boyutlarında (<4,75 mm veya <2 mm) olmasıdır. Hem geopolimer beton hem de geopolimer harç ile ilgili yapılan çalışmalarda GDA'lı geopolimer ve özellikle GGH ve GDBA'lı geopolimer betonlar başarıyla üretilmiştir. Bu malzemelerin mekanik performans bağlamında basınç dayanımlarının yeterli seviyelere ulaşabildiği araştırmacılar tarafından gözlenmiştir (Nuaklong ve diğ., 2016; Ren ve Zhang, 2018; Koushbaghi ve diğ., 2019; Panizza ve diğ., 2020; Tan ve diğ., 2020). GDA'lar ile geopolimer arasında kuvvetli bir bağ oluşması yeterli dayanım elde edilmesinde etkili olmaktadır (Liu ve diğ., 2016; Mesgari ve diğ., 2020). Genel olarak geopolimer betonlar/harçlar erken dayanım kazanmakta ve yüksek dayanıma sahip olmakta; ancak GDA kullanılması ve ÖM özelliklerinin değişkenliği nedeniyle GDA'lı geopolimer betonun basınç dayanımının tahmini ve kontrol edilmesi kolay olmamaktadır (Xu ve diğ., 2021a). Literatürde geopolimer ÖM'sinin ise %50'si veya %50'den daha fazlasının YFC olmasının, agregada %50'ye kadar GDBA kullanımı ile mümkün olduğu ve bu durumda oldukça iyi performans gösterdiği belirtilmiştir (Xie ve diğ., 2019a; Hasnaoui ve diğ., 2021; Kumar ve Mishra, 2022). Geopolimer beton ve harcın performansı için kür sıcaklığı önemlidir

(Wang ve diğ., 2020). Ancak, literatürde oda koşullarında geopolimer üretilebildiği ve oluşan geopolimer harcın/betonun oda koşullarında kür edilmesi ile yüksek dayanım kazanabildiği belirlenmiştir (Alloul ve diğ., 2023; Ekinci, 2023; Moghadam ve diğ., 2023; Özçelikçi ve diğ., 2023). Bu çalışmalarda en az 20 MPa basınç dayanımına sahip geopolimer harçlar üretilebilmiştir. İşlenebilirlik özelliği genellikle geopolimer betonlar için slump ve geopolimer harçlar için yayılma tablası deneyleri ile incelenmiş, ayrıca priz süreleri de araştırılmıştır (Nath ve Sarker, 2014; Hadi ve diğ., 2019; Prusty ve Pradhan, 2022). Geopolimer harcın/betonun işlenebilirliği karışımda kullanılan ÖM ile AÇ özelliklerine ve bunların oranlarına bağlı olarak büyük değişiklik göstermektedir (El-Wafa ve Fukuzawa, 2018; Morsy ve diğ., 2022). İşlenebilirliğin uygun olmadığı durumlarda geopolimer harç veya beton oluştururken belirli miktarlarda ilave su (İS) yeterli işlenebilirliği sağlamak için kullanılabilir (Hadi ve diğ., 2017; Hadi ve diğ., 2019; Khalil ve diğ., 2020; Afriansya ve diğ., 2021). Geopolimer kimyası Si-O-Al üç boyutlu yapısının oluşması ile ilgili olduğundan, silisyum/alüminyum (Si/Al) oranı GDA'lı geopolimer harç ve betonun dayanım kazanmasında önemli bir faktör olup, bu oranın 3 değerine yakın olduğu durumda optimum dayanım elde edildiği belirtilmiştir (Tan ve diğ., 2020). Geopolimer harç ve betonun AÇ'sinin molaritesi dayanım üzerinde etkili bir diğer önemli faktör olup, 12 M derişimin genel olarak uygun olduğu anlaşılmaktadır (Zhu ve diğ., 2020). Geopolimer harç ve betonun yük taşıma kapasitesinin bir göstergesi olan eğilme dayanımı araştırma konusu olan bir diğer mekanik özelliktir. Geopolimer harç ve betonda çimentolu harç ve betona yakın veya daha yüksek eğilme dayanımları elde edilebilmektedir (Nuaklong ve diğ., 2018; Huseien ve diğ., 2018; Xu ve diğ., 2021b; Kanagaraaj ve diğ., 2023). Geopolimerin oluşum mekanizması dikkate alındığında geopolimer ile oluşturulan harç/betonların dayanıklılık özellikleri normal Portland çimentolu harç/betonlara göre genellikle daha iyi olmaktadır (Bakharev, 2005). Dayanıklılık performansı için birçok araştırmacı genelde derişimi %5'e kadar çıkabilen $MgSO_4$ veya Na_2SO_4 çözeltilerinde sülfat hücumunun etkisini araştırmıştır (Long ve diğ., 2017; Parthiban ve Mohan, 2017; Özcan ve Karakoç, 2019; Xie ve diğ., 2019b). Sülfat hücumu sonunda geopolimer harç/betonda kütle artışı ve nihai dayanımda az miktar azalma (Xie ve diğ., 2019b), çimentolu harç/betona göre daha yüksek dayanım (Parthiban ve Mohan, 2017) meydana gelmiştir. ÖM oranının artması sülfat hücumuna karşı geopolimer elemanı daha dayanıklı hale getirmektedir (Uğurlu ve diğ., 2021). Geopolimer betonların ve GDBA'lı geopolimer beton/harçların tuz çözeltilerine karşı direnci noktasında literatürde yeterli miktarda araştırmanın

bulunmadığı belirlenmiştir. Yapılan çalışmalarda 3 veya 4 aya kadar NaCl çözeltisinde bekletilme ile dayanımda artma, sonrasında azalma meydana gelmiştir (Albitar ve diğ., 2017; Aygörmöz ve Canpolat, 2022). Bunun aksine Özcan ve Karakoç (2019), 12 hafta %5 NaCl çözeltisinde bekletilmiş YFC ve ferrokrom cüruf esaslı geopolimer betonun basınç dayanımında artış olduğunu gözlemlemişlerdir.

Kazıklı radye sistemlerinin davranışının anlaşılmasındaki zorluk, yapı-zemin ve kazık-radye etkileşiminin karmaşasından kaynaklanmaktadır (Jamil ve diğ., 2023). Kazık-yapı-zemin etkileşimi esas olarak kazıklı radye sistemleri için taşıma gücünü etkileyen en önemli mekanizmadır (Bralovic ve diğ., 2023). Düşey yüklü kazıklarda yükler; radye, kazık uç direnci ve kazık çevre sürtünmesi bileşenleri tarafından karşılanmaktadır (Şekil 1.2). Kum zeminlerdeki kazıklı radye sistemlerinde kazık-radye etkileşimi daha çok etkili olmaktadır (Liu ve diğ., 1985; Long, 1993; Han ve Ye, 2006). Kazıklı radye sistemlerinde kazıklar genellikle oturma önleyici (Burland, 1995) ve gerilme azaltıcı (Mandolini ve diğ., 2013) olarak kullanılırken radye, kazıklara üniform yük dağıtma ve farklı oturmaları önleyici olarak kullanılmaktadır (Jamil ve diğ., 2023). Fleming ve diğ. (2008) kazıklı radye sistemleri tasarlanırken radyenin yükün belirli bir kısmını taşıyacağını belirtmiştir. Buna göre tasarımdaki esas etken kazık ve radye tarafından taşınan yüklerin oranı olmaktadır (Clancy ve Randolph, 1996; De Sanctis ve Mandolini, 2006). Birçok araştırmacı (Horikoshi ve Randolph, 1998; Reul, 2004; Kumar ve Choudhury, 2018; Bhaduri ve Choudhury, 2020; Halder ve Manna, 2022a) kazıklı radye sistemlerinin analizindeki yöntem ve yaklaşımlar üzerine yoğunlaşarak, bu sistemlere etki eden kazık-radye-zemin etkileşiminin karmaşık yapısını değerlendirmeye çalışmışlardır. Geçmiş çalışmaların birçoğu kazıklı radye sistemleri için kazık-radye yük paylaşımı ve bu sistemlerin davranışı ile ilgili iken çalışmalar genellikle kazıklı radye sistemlerinin düşey yükleme altındaki davranışının (Al-Mosawi ve diğ., 2011; Patil ve diğ., 2016; Salahshour ve Ardakani, 2017) incelenmesine yönelik olmuştur. Kazıklı radye sistemlerinde düşey yükleme altındaki davranışın araştırıldığı çalışmalarda genellikle kazık-radye arasındaki yük paylaşımı ve kazıklı radye sistemlerinin çalışma prensibi incelenmiştir (Reul ve Randolph, 2004; Bajad ve Sahu 2008; Al-Mosawi ve diğ., 2011). Bu çalışmalarda radyenin, kazıklı radye sisteminin taşıyabileceği yükün %50'den fazlasını taşıyabildiği gözlenmiştir. Kazık uzunluğunun artmasının oturma miktarını azaltmada kazık sayısına göre daha etkili olduğu (Al-Mosawi ve diğ., 2011); fakat kazıkların yük paylaşma oranını kazık sayısının daha fazla etkilediği belirlenmiştir (Bralovic ve diğ. 2023).



Şekil 1.2. Düşey yüklü kazıklı radye sisteminde etkileşimler: 1) Kazık-kazık, 2) Kazık-radye, 3) Radye-radye, 4) Kazık-zemin, 5) Kazık uç direnci-çevre sürtünmesi direnci etkileşimi (Katzenbach ve diğ., 2005)

Literatürde GGH'li kazıklar ile ilgili olarak bilinen ayrıntılı bir çalışma mevcut değildir. Geopolimer kazıklar ile ilgili yapılan çalışmalar ise (Hu ve diğ., 2019; Zhang ve Hadi, 2019) sadece bu kazıkların üretilebilirliğine ve basit anlamda dayanımının belirlenmesine yöneliktir. Ek olarak geopolimer harç/beton bileşenlerinin optimum oranları hala tam olarak belirlenebilmiş değildir. Araştırmacıların optimum oranlar ile ilgili bir tasarım sunamaması veya uzlaşamamış olması bunun bir göstergesidir. GGH ile ilgili çalışmalar mevcut olsa bile GGH'nin kullanılabilirliğinin detayları için çalışmalar devam etmekte ve daha fazla çalışma yapılması gerekmektedir. Ayrıca, kazıklı radye sisteminin, yapı-zemin-kazık etkileşimi bağlamındaki davranışı ile ilgili literatürde mevcut olan çalışmaların yeterli olmadığı ve eksiklikler içerdiği belirlenmiştir. Özellikle, kazıklı radye sistemlerinin düşey yüklenmesi durumunda zeminde oluşan gerilmelerin belirlenmesi ile ilgili ayrıntılı ölçümleri içeren çalışmaların mevcut olmadığı dikkat çekmektedir. Tez çalışmasında deneysel tasarım yöntemlerinden olan yanıt yüzey yöntemi (YYY) GGH özelliklerinin (istatistiksel olarak anlamlı model formülleri ile) ve Taguchi yöntemi kazıklı radye sistemi davranışının incelenmesinde kullanılmıştır. Deneysel ve sayısal sonuçların bu yöntemler ile istatistiksel olarak incelenmesi çalışmanın sistematik olması, doğruluğu, kapsamı ve kapsayıcılığı bakımından önemli olmuştur. Literatürde, deneysel tasarım yöntemlerinin bu derecede kapsamlı bir şekilde kullanıldığı çalışmanın olmadığı dikkat çemiştir. Buna göre tez çalışması, literatürdeki bilgilerin değerlendirilmesi sonucu belirlenen eksikliklerin giderilebilmesine katkı

sağlayacak şekilde yürütülmüştür. Bununla birlikte esas amaç, atık malzemeler ile üretilmiş tekil kazık ve kazıklı radye sistemlerinin davranışını incelemek ve konuyla ilgili olarak geoteknik uygulamalarına önemli ölçüde katkı sağlamaktır. Bu amaç doğrultusunda ilk olarak, bileşenlerinin çoğu atık malzemelerden oluşan optimum tasarıma göre oluşturulmuş GGH'nin bir kazık elemanının malzemesi olabilmesi için dayanım, dayanıklılık, işlenebilirlik ve priz başlangıcı özellikleri belirlenmiştir. Daha sonra belirlenen optimum GGH ile üretilmiş olan küçük ölçekli model tekil kazık ve kazıklı radye sistemlerinin düşey yükleme altındaki davranışları literatürdeki eksiklikler de göz önüne alınarak incelenmiş ve sayısal analizler aracılığıyla karşılaştırma yapılmıştır.

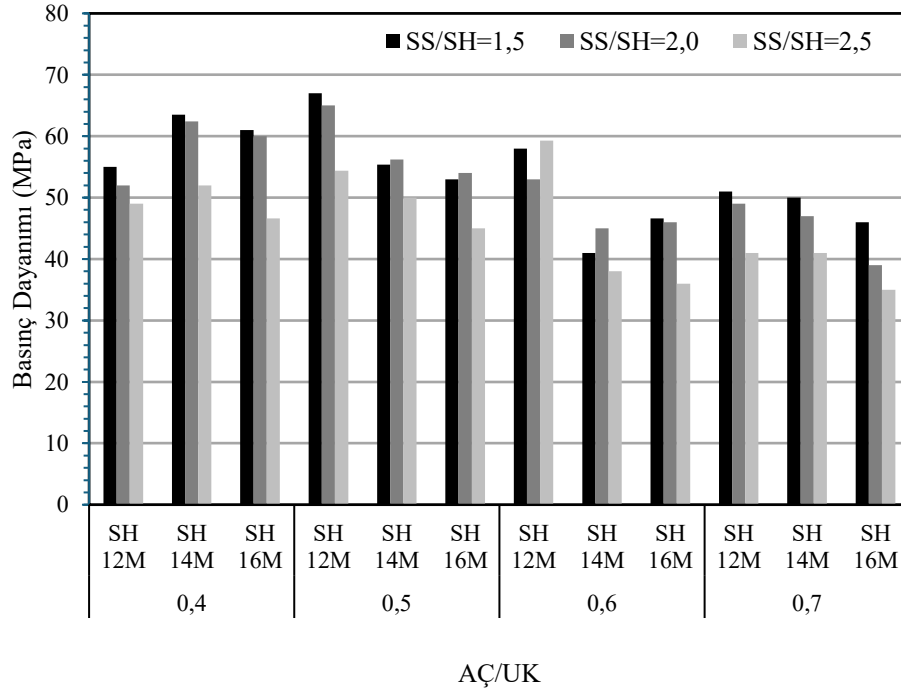


2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

Giriş bölümünde tez konusunun, kapsamının ve öneminin anlaşılabilmesi için literatür çalışmaları kısaca verilmiştir. Kaynak Araştırması bölümünde hem GGH hem de kazıklı radye sistemleri üzerine yapılmış çalışmalardan güncel ve tez konusuyla ilgi oranı yüksek olanlar gerekli ayrıntılar açıklanarak verilmiştir.

2.1. GGH ile İlgili Araştırmalar

Hadi ve diğ. (2018) tarafından yapılan çalışmada farklı kaynaklardan elde edilmiş UK esaslı geopolimer harçların performansına AÇ/ÖM, SS/SH oranları ve sodyum hidroksit (SH, NaOH) derişiminin etkisi incelenmiştir (Şekil 2.1). Geopolimer harçların ÖM'si olarak 5 farklı termik santralden temin edilmiş F sınıfı UK kullanılmıştır. Agregada olarak standart kum tercih edilmiştir. AÇ olarak farklı derişimlerde hazırlanmış SH çözeltisi ile sodyum silikat SS çözeltisi karışımı SS/SH oranı değışecek şekilde seçilmiştir. Agregada/ÖM oranı 2,75 değıerinde sabit tutulmuştur. AÇ/ÖM oranı 0,4-0,7 arasında, SH molaritesi 12-16 arasında ve SS/SH oranı 1,5-2,5 arasında olacak şekilde karışımlar oluşturulmuştur. Numuneler 50 mm çapında ve 100 boyundaki PVC kalıplarda



Şekil 2.1. GGH'lerin farklı değışkenlere göre basınç dayanımları (Hadi ve diğ. (2018) çalışmasından düzenlenmiştir)

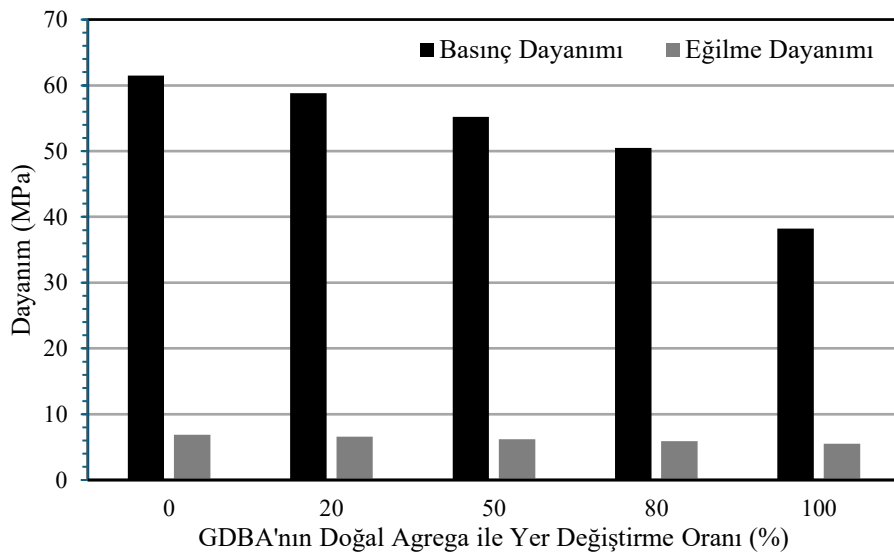
oluşturulmuş, 24 saat oda koşullarında ve 24 saat 70°C’de kür edilmiştir. Sonrasında 7 günlük kür süresini tamamlayana kadar oda sıcaklığında bekletilmiştir. Geopolimer harç numunelerinin 7 gün kür sonunda basınç dayanımları belirlenmiştir. Basınç dayanımları 7-67 MPa arasında geniş bir aralıkta elde edilmiştir. UK’nin amorf SiO₂ ve Al₂O₃ içeriği ile medyan tane çapının yüksek dayanıma sahip geopolimer üretme sürecinde oldukça önemli olduğunu belirtmişlerdir.

Panizza ve diğ. (2020) tarafından, ÖM’si metakaolin, YFC, UK ve agregası inşaat yıkıntı atıklarından elde edilmiş GDA olan geopolimer harcın mekanik ve fiziksel özellikleri incelenmiştir. ÖM olarak metakaolin, F sınıfı UK ve YFC kullanılmış; farklı karışımlarda YFC/ÖM oranı 0,25, 0,375 ve 0,50; UK/ÖM oranı 0, 0,125 ve 0,25 değerlerinde seçilmiştir. İnşaat yıkıntı atıklarından oluşan GDA kullanılmıştır. AÇ olarak silikat modülü (SiO₂/K₂O) molar oranda 1,4 ve 2,4 arasında olan potasyum silikat çözeltisi hazırlanmıştır. Birçok deneme ve öncül karışımın hazırlandığı çalışmada son durumda karışımın tamamında agrega/ÖM oranı 1,35 olarak belirlenmiş ve AÇ/ÖM oranı 1,01 değerinde seçilmiştir. Hazırlanan numunelerin basınç ve yarmada çekme deneyleri oda koşullarında 3 günden 1 yıla kadar farklı sürelerde kür edilmiş numunelerde gerçekleştirilmiştir. Eğilme deneyleri yapılmıştır. Ayrıca numunelerin büzülme çatlağı, yoğunluğu, porozitesi ve su emme özellikleri incelenmiştir. Basınç dayanımlarının 28 günlük kür sonunda 52 MPa seviyesine kadar artabildiği ve eğilme dayanımlarının 4,2 MPa kadar olabildiği belirlenmiştir.

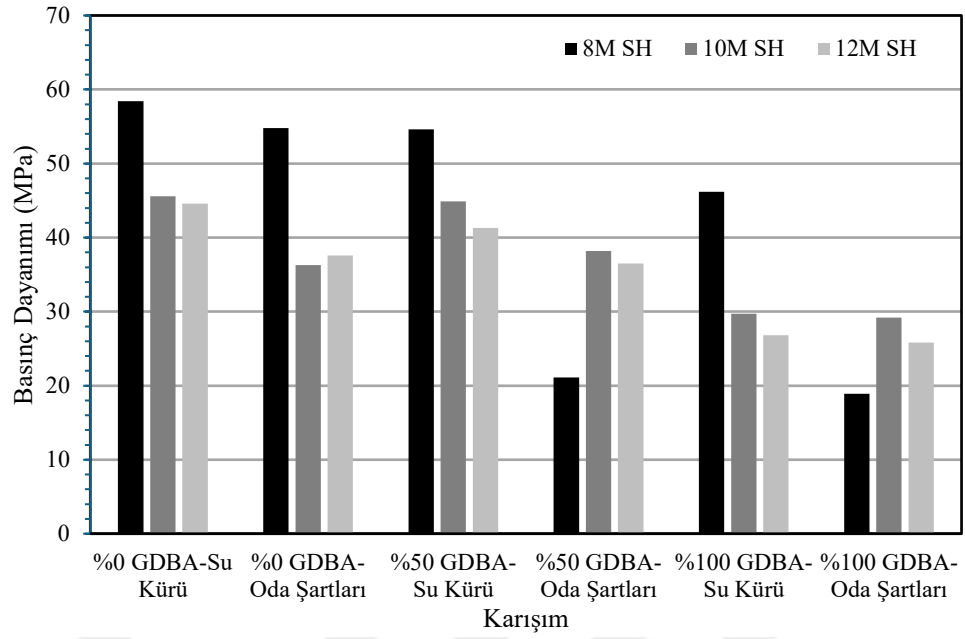
Zhu ve diğ. (2020) tarafından geri dönüştürülmüş geopolimer agregaların doğal kum yerine geopolimer harç üretiminde kullanımının etkisi araştırılmıştır. Çalışmada metakaolin ÖM olarak seçilmiştir. En büyük tane boyutu 4,75 mm olan geri dönüştürülmüş geopolimer agrega, doğal kum ile hacimce %20, %50, %80 ve %100 oranlarında yer değiştirecek şekilde harç agregası olarak kullanılmıştır. Derişimi 12 M olan SH çözeltisi ve silikat modülü (SiO₂/Na₂O) 2,24 olan SS çözeltisi karışımı ile SS/SH oranı 2 olan AÇ hazırlanmıştır. Agregası/ÖM oranı 1,53-2,00 arasında belirlenmiştir. AÇ/ÖM oranı 1,126 değerinde sabit tutulmuştur. Basınç ve eğilme dayanımı deneyleri önce 80 °C’de 6 saat ve sonrasında 20±2 °C’de (en az %95 bağıl nemde) 7 gün kür edilen numunelerde yapılmıştır (Şekil 2.2). Su emme deneyleri gerçekleştirilmiştir. Mikro yapının incelenebilmesi için SEM, XRD ve FTIR analizleri yapılmıştır. Agreganın tamamının geri dönüştürülmüş geopolimer agregasından oluştuğu durumda basınç dayanımı 37,0 MPa ve doğal kumdan oluştuğu durumda basınç dayanımı 61,1 MPa olmuştur. Doğal kum oranı azaldıkça dayanımda sürekli bir azalma gözlenmiştir. Eğilme

dayanımı için de benzer bir azalma meydana gelmiştir; fakat basınç dayanımında doğal agrega oranı %20'den %0'a azaldıkça dayanımdaki azalma önemli düzeyde olmuştur. Buna göre geri dönüştürülmüş geopolimer agregasının %50'den az oranda kullanılmasının yeterli performansa sahip geopolimer harç üretilmesine imkan verdiği önerilmiştir.

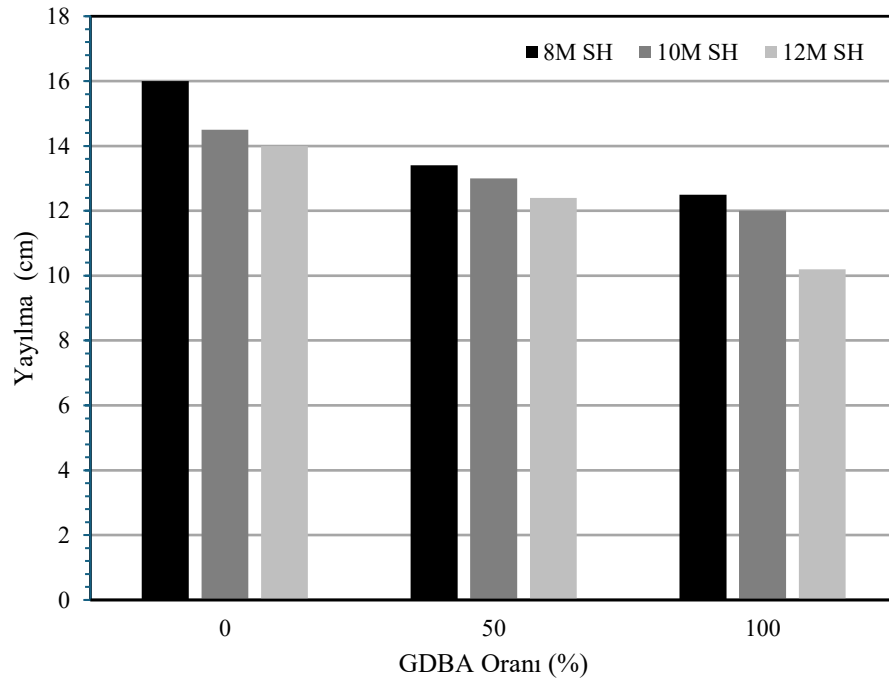
Ekinci (2023) tarafından, agrega olarak çoğunluğu GDBA olan inşaat yapım ve yıkıntı atıklarının doğal agrega yerine kullanılması durumunda geopolimer harç performansının değişimi araştırılmıştır. ÖM olarak YFC, agrega olarak doğal agrega ve GDBA, AÇ olarak SH kullanılmıştır. SH için 8, 10, 12 M, ÖM/agrega oranı 0,5 ve AÇ/ÖM oranı 0,6 olarak belirlenmiştir. Bazı karışımlarda tamamen GDBA, bazı karışımlarda GDBA'nın doğal agrega ile %50 oranında yer değiştirmesi dikkate alınmıştır. Hem oda koşullarında hem de su içinde kür uygulanmasının performansa etkisi de çalışma kapsamında incelenmiştir. Basınç dayanımları 7 ve 28 gün kür sonunda belirlenmiş (Şekil 2.3); su emme, işlenebilirlik (Şekil 2.4) ve kuru birim hacim ağırlık belirleme deneyleri yapılmıştır. Yangın etkisi altında basınç dayanımı, kütle, su emme ve fiziksel görünüm değişimleri irdelenmiş, mikro yapı değerlendirilmiştir. GDBA'lı olan geopolimer harçlarda 7 günlük kür sonunda 30 MPa'nın ve 7 günlük kür sonunda 45 MPa'nın üzerinde basınç dayanımları elde edilmiştir. Yayılma değerleri 14 cm kadar olabilmektedir. Agregada GDBA oranının artması basınç dayanımını azalttığı gibi yayılma değerlerini de azaltmıştır. SH molaritesinin artmasıyla beraber dayanımda azalma ve işlenebilirlikte olumsuzluk gözlenmiştir.



Şekil 2.2. GGH'lerin basınç ve eğilme dayanımlarının geri dönüştürülmüş geopolimer agregası miktarına göre değişimi (Zhu ve diğ. (2020) çalışmasından düzenlenmiştir)



Şekil 2.3. GGH'lerin basınç dayanımı değişimi (Ekinci'nin (2023) çalışmasından düzenlenmiştir)



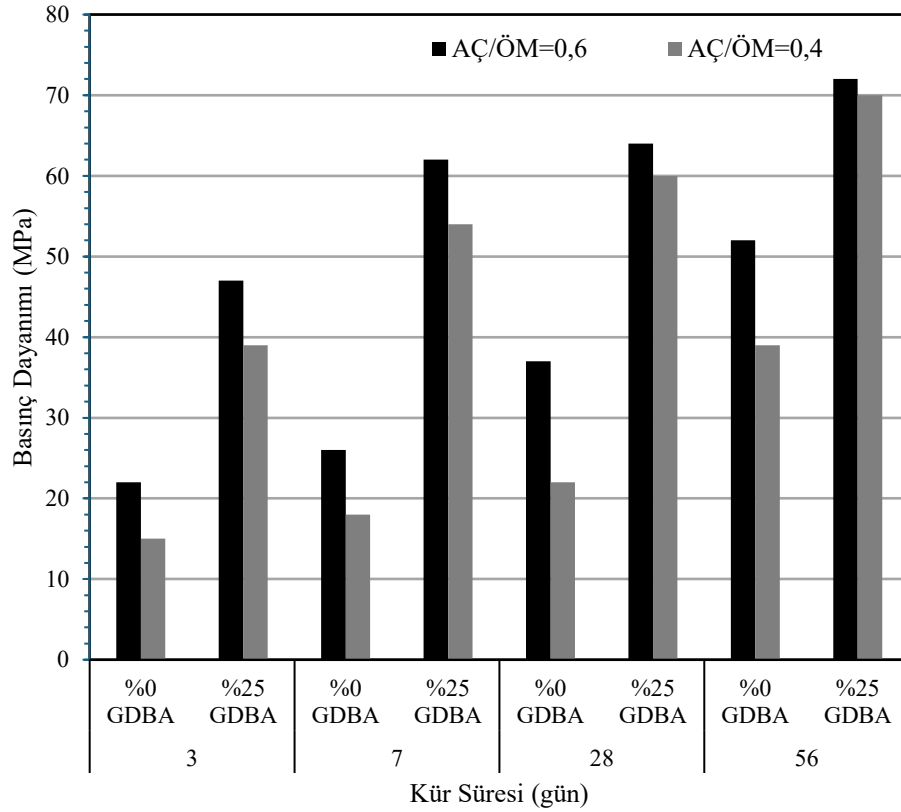
Şekil 2.4. GGH'lerin yayılma değerlerinin değişimi (Ekinci'nin (2023) çalışmasından düzenlenmiştir)

Fallah ve Mosavinejad (2023) tarafından yapılan çalışmada YFC esaslı geopolimer ile üretilmiş geopolimer betonun geri dönüştürülüp agrega olarak hem geopolimer hem de Portland çimentolu beton üretiminde kullanımı incelemiştir. Portland çimentolu betonda bağlayıcı olarak yalnızca çimento, geopolimer betonda YFC ve zeolit karışımı (zeolit/ÖM oranı 0,147) dikkate alınmıştır. Bu betonların doğal agregası olarak

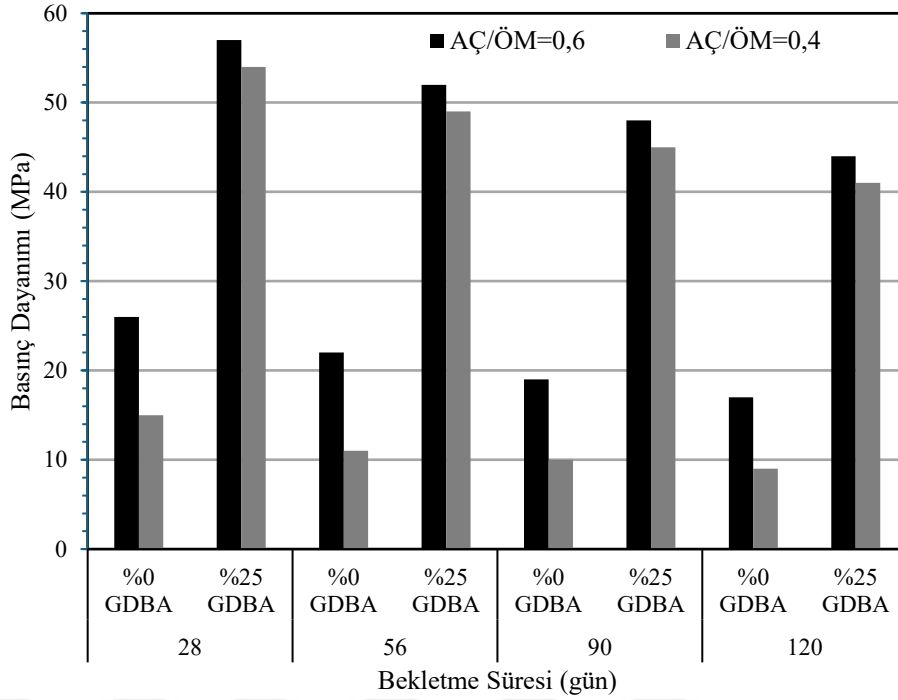
kırmataş ve deniz kumu olmak üzere iki farklı tür agrega kullanılmıştır. Doğal agrega yerine kullanılması durumunda performans değişimine etkisinin incelendiği GDA olarak, ayrıca üretilmiş silindir ve küp şeklindeki geopolimer ve çimentolu betonların en fazla 19 mm tane çapına sahip olacak şekilde kırılmasıyla elde edilen agregalar kullanılmıştır. Buna göre, çalışmaya konu olan çimentolu ve geopolimer betonların GDA'sı olmak üzere ayrı olarak çimentolu ve geopolimer betonlar üretilmiş ve bunlar uygun bir kırıcı ile kırılmıştır. AÇ'de özgül ağırlığı 1,4 ve molaritesi 10 M olan SH ile özgül ağırlığı 1,6 olan SS kullanılmış olup SS/SH oranı 2,25 olarak belirlenmiştir. Hem geopolimer hem de çimentolu betonlar için bağlayıcı oranı 375 kg/m^3 dozaj (çimentolu beton için çimento ve geopolimer beton için YFC+zeolit) sağlanacak şekilde belirlenmiş, çimentolu betonda su/bağlayıcı oranı 0,45'te ve geopolimer betonda AÇ/bağlayıcı oranı 0,50'de sabit tutulmuştur. Tüm karışımlara bağlayıcı oranının %0,2'si kadar modifiye edilmiş polikarboksilat esaslı süper akışkanlaştırıcı eklenmiştir. Taze betonun işlenebilirliği çökme (slump) deneyi ile incelenmiştir. Hazırlanan numuneler oda koşullarında 7, 28, 60 ve 90 gün kür edilmiş ve basınç deneyleri yapılmıştır. Her karışımda 28 günlük kür süresi sonunda ultrasonik darbe hızı (UPV) belirlenmiştir. Kür sürelerinin 7 ve 28 gün olduğu durumda tüm karışımların yarmada çekme deneyi ve eğilme deneyleri gerçekleştirilmiştir. Elastisite modülleri 28 günlük kür sonunda elde edilmiştir. Beton numunelerinin geçirimsizlikleri su emme deneyleri ile incelenmiş ve farklı kür sürelerinde büzülme çatlağı deneyleri yapılmıştır. SEM analizleri ile arayüz geçiş bölgesi incelenmiştir. Sonuç olarak, geopolimer betonda GDBA ve geri dönüştürülmüş geopolimer agreganın doğal agrega yerine %50 oranına kadar kullanılması durumunda basınç dayanımında %8 ve %10 oranında azalma olduğu belirlenmiştir. Benzer bir dayanım kaybı çekme ve eğilme dayanımlarında da ortaya çıkmıştır. Geopolimer betonda tamamıyla GDA'ların kullanıldığı durumda bile 28 günlük kür sonundaki basınç dayanımının en az 30 MPa seviyelerinde olduğu dikkat çekmiştir. GDA'nın betonların su emme kapasitesini artırdığı gözlenmiştir.

Saha ve diğ. (2020) tarafından yapılan çalışmada, geopolimerli ve agregası GDBA'lardan oluşan harçların zararlı ortam şartlarındaki dayanıklılığı incelenmiştir. ÖM olarak YFC ve UK kullanılmış, YFC/ÖM oranı 0,3 ve UK/ÖM oranı 0,7 değerinde sabit olacak şekilde seçilmiştir. AÇ olarak SH ve SS çözeltilerinin karışımı hazırlanmış, SS/SH oranı 1,5 ve SH molaritesi 14 M olarak belirlenmiştir. GDBA/ÖM oranı %0 ve %25, AÇ/ÖM oranı 0,4 ve 0,6 olmuştur. Basınç dayanımı deneyleri 3, 7, 28 ve 56 gün oda koşullarında kür sonunda gerçekleştirilmiştir. Zararlı ortam şartları altında geopolimer

harç dayanıklılığını belirlemek amacıyla oluşturulan numuneler oda koşullarında 28 günlük kür sonunda 28, 56, 90 ve 120 günlük sürelerle %10 sülfürik asit (H_2SO_4), %10 nitrik asit (HNO_3) ve %5 $MgSO_4$ çözeltilerde bekletilmiştir. Bekletme süreleri sonunda kütle ve basınç dayanımı değişimleri belirlenmiştir. Basınç dayanımlarının 28 günlük kür sonunda %25 GDBA içeren numunelerde AÇ/ÖM oranı 0,6 iken 60 MPa'ya kadar artabildiği (Şekil 2.5), $MgSO_4$ çözeltilisinde bekletme sonunda 42 MPa'ya kadar azalabildiği belirlenmiştir (Şekil 2.6). Bu karışımda 120 günlük bekletmeye kadar kütle sürekli arttığı ve 120 gün bekletme sonunda kütle artışının %2,7'ye kadar çıkabileceği gözlenmiştir. GDBA basınç dayanımını azaltmasına rağmen GDBA'lı çevre dostu bir geopolimer harcın AÇ/ÖM oranı 0,6 olduğunda yeterli performansa sahip olacak şekilde üretilebileceği belirtilmiştir.

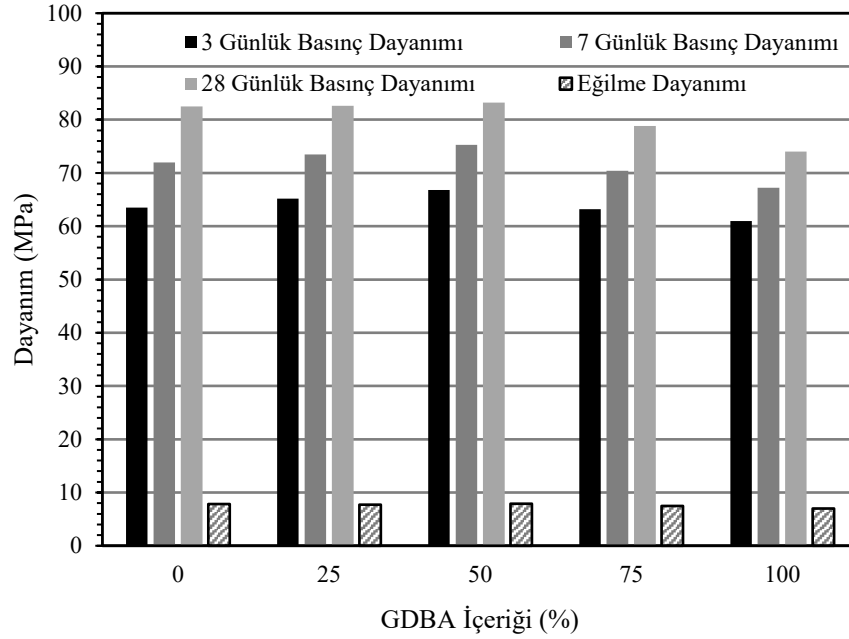


Şekil 2.5. GGH'lerin basınç dayanımı (Saha ve diğ. (2020) çalışmasından düzenlenmiştir)



Şekil 2.6. GGH'lerin $MgSO_4$ çözeltisinde bekletme süresine göre basınç dayanımı ve kütle kayıpları (Saha ve diğ. (2020) çalışmasından düzenlenmiştir)

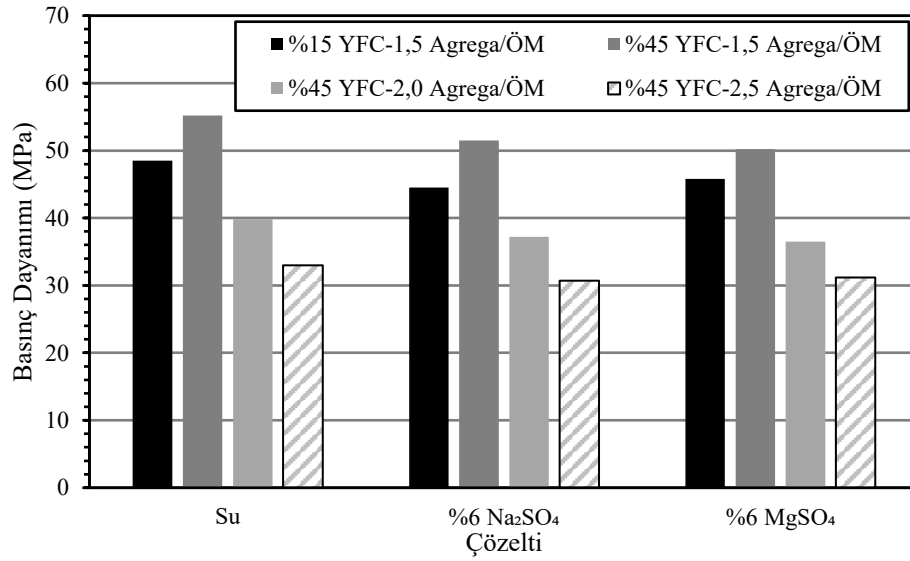
Kumar ve Mishra (2022) tarafından YFC ve UK esaslı, GDBA'lı geopolimer betonların dayanım ve dayanıklılık özellikleri araştırılmıştır. ÖM'de YFC ve UK beraber kullanılmış, bunların ÖM içindeki oranları deneme yanılma yoluyla YFC/ÖM oranının 0,4, 0,6 ve 0,8 olduğu durumlar için incelenmiştir. İnce agrega olarak tamamıyla doğal agrega kullanılmış, iri agreganın %0, %25, %50, %75 ve %100'ü kadar GDBA'nın kullanıldığı karışımlar oluşturulmuştur. AÇ olarak 14 M SH çözeltisi ve SS/SH oranı 1,8 olacak kadar SS çözeltisi karışımı dikkate alınmıştır. Toplam agreganın ÖM'ye oranı 3,0 olmuştur. AÇ/ÖM oranı 0,5 olarak seçilmiş ve polikarboksilat esaslı katkı ÖM'nin %0,60'ı olacak kadar AÇ ile karışıma eklenmiştir. Hazırlanan geopolimer beton numuneler oda koşullarında 3, 7 ve 28 gün kür edildikten sonra basınç dayanımı deneyleri yapılmıştır. Yarmada çekme ve eğilme dayanımı 28 gün kür sonunda belirlenmiştir. Taze beton özellikleri olarak slump ve priz süresi belirleme deneyleri yapılmıştır. Ayrıca yoğunluk, su emme ve boşluk oranları da belirlenmiştir. Basınç dayanımlarının 61-83 MPa arasında değiştiği belirlenmiştir (Şekil 2.7). Eğilme dayanımları 7,0-7,9 MPa arasında değişmiştir. Priz başlangıç süresinin 80 dakikayı geçebildiği gözlenmiştir. YFC'nin artmasının geopolimer betonun mekanik özelliklerini olumlu yönde etkilediği, iri agregada sadece GDBA kullanılması durumunda bile istenilen dayanımda geopolimer beton elde edilebildiği belirtilmiştir.



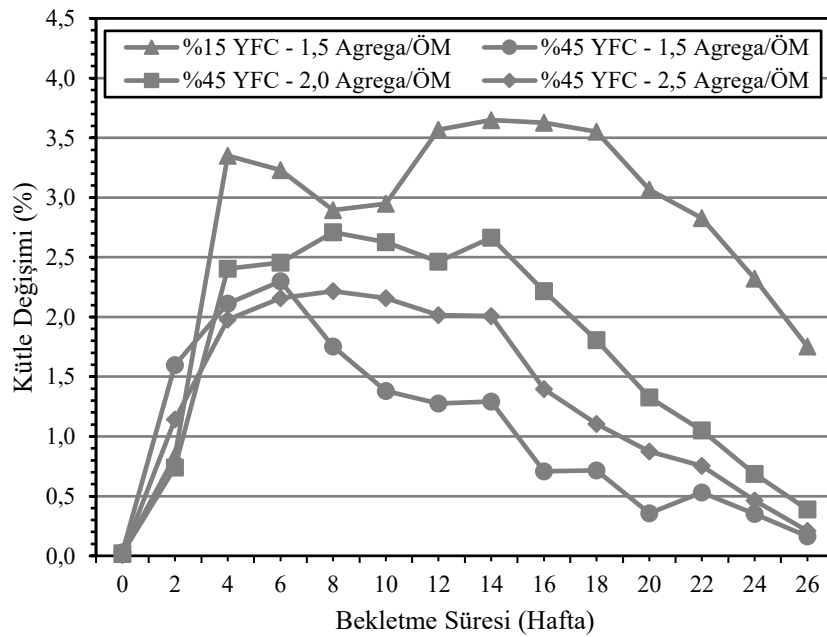
Şekil 2.7. GDBA'nın GGH performansına etkisi (Kumar ve Mishra'nın (2022) çalışmasından düzenlenmiştir)

Prusty ve Pradhan (2022), tarafından yapılan çalışmada, farklı kum/ÖM oranları ile üretilen UK ve YFC esaslı geopolimer harçların sülfatlı ve asidik ortamlardaki performansı ve mikro yapısındaki değişimler incelenmiştir. ÖM olarak YFC ve F sınıfı UK kullanılmış olup YFC/ÖM oranı %15 ve %45 arasında değişecek şekilde belirlenmiştir. Agrega olarak deniz kumu kullanılmıştır. AÇ olarak SS/SH oranı 1,5 ve SH molaritesi 14 M olan SH ve SS karışımı kullanılmıştır. Agrega/ÖM oranı 1,5, 2,0 ve 2,5 olarak seçilmiştir. Su/ÖM oranı 0,31, 0,39 ve 0,46 olarak belirlenmiştir. Su/ÖM belirlenirken özellikle SS ve SH içerisindeki katı bileşenler de dikkate alınmıştır. Oluşturulan 50 mm kenar uzunluklarına sahip küp numuneler sülfat ve asit çözeltilerine yerleştirilmeden önce 28 gün oda koşullarında kür edilmiştir. Kür sonunda numuneler toplamda 26 hafta ayrı ayrı %6 Na₂SO₄, %6 MgSO₄, 0,62 M H₂SO₄ ve 0,62 M hidroklorik asit (HCl) çözeltilerinde bekletilmiş, bekletme boyunca belirli aralıklarla kütle değişimleri ve 26 hafta sonunda basınç dayanımları belirlenmiştir (Şekil 2.8). Ayrıca 100 mm çapında ve 200 mm boyundaki numunelerin 28 günlük oda koşullarında kür edilmesi sonunda sorptivite deneyleri yapılmıştır. SEM ve XRD analizleri gerçekleştirilmiştir. Basınç dayanımları %6 MgSO₄ çözeltisinde 26 haftalık bekletilme sonunda 30-50 MPa arasında elde edilmiş, çözeltilerde bekletme sürelerinden bağımsız olarak agrega/ÖM arttıkça dayanım azalmıştır. Düşük YFC/ÖM ve agrega/ÖM oranlarında %6 MgSO₄ çözeltisinde bekletme sonunda dayanımda %10'a yakın bir artış meydana gelmiş,

YFC/ÖM %45 ve agrega/ÖM 2,5 olduğunda %10'dan fazla dayanım kaybı olmuştur. Zararlı çözeltilerde belirli sürelerde yapılan görsel incelemelerde %15 YFC/ÖM ve kum/ÖM oranı 1,5 olan karışımın daha dayanıklı olduğu belirlenmiştir. $MgSO_4$ çözeltilerinde bekletilen numunelerde önce kütlede artış, yaklaşık 4. ve 6. haftalardan sonra kütlede azalma meydana gelmiştir. Genel olarak 26. haftada birikimli şekilde kütle artışı %0,2-%2 arasında olmuştur (Şekil 2.9).



Şekil 2.8. GGH'lerin sülfatlı çözeltilerde bekletme sonunda basınç dayanımları (Prusty ve Pradhan'ın (2022) çalışmasından düzenlenmiştir)

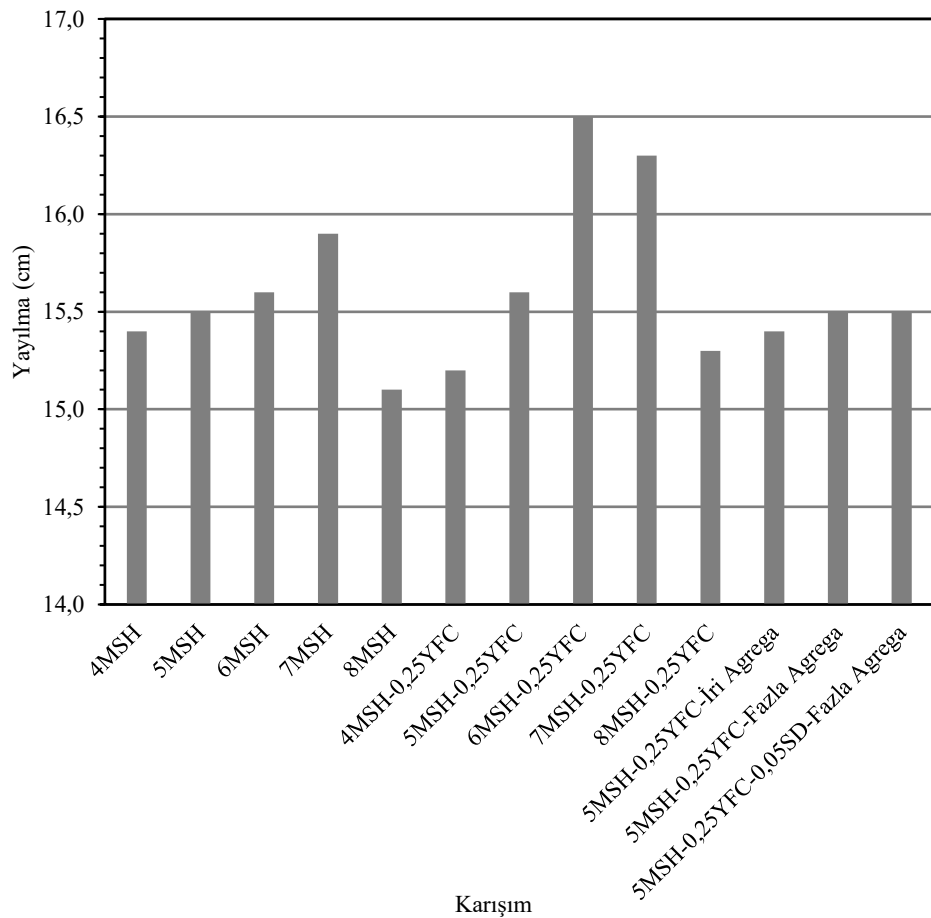


Şekil 2.9. GGH'lerin sülfatlı çözeltilerde bekletme süresince kütle değişimleri (Prusty ve Pradhan'ın (2022) çalışmasından düzenlenmiştir)

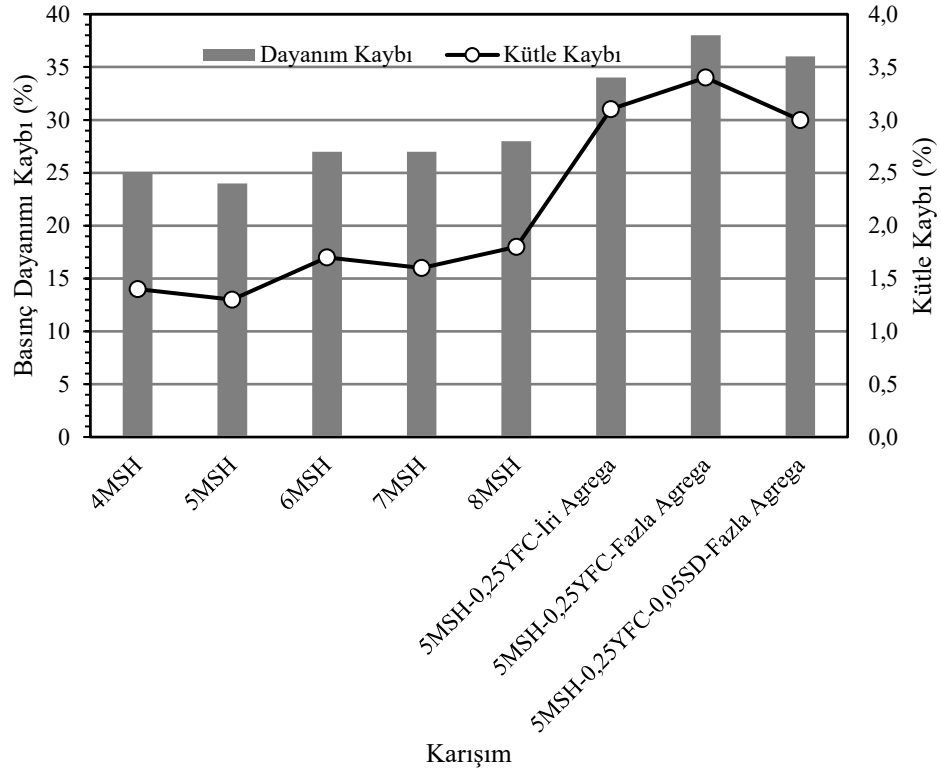
Özcelikçi ve diğ. (2023) tarafından inşaat yapım ve yıkıntı atıklarının ÖM ve GDBA'nın agregası olarak kullanıldığı durumda geopolimer harçların dayanım, dayanıklılık ve mikro yapıları incelenmiştir. Çalışmada ÖM olarak inşaat yapım ve yıkıntı atıklarından olan kiremit, tuğla, beton ve cam atıkları kullanılmıştır. ÖM karışımlarının bazılarında %20 oranında yer değiştirecek şekilde cüruf eklenmiştir. Agregası olarak beton atıklarından elde edilen GDBA ve AÇ olarak SH, SS ve kalsiyum hidroksit ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) kullanılmıştır. AÇ'de SS/SH oranı 2 değerinde sabit tutulmuş, bazı karışımlarda sadece SH ve $\text{Ca}(\text{OH})_2$, bazı karışımlarda sadece SH ve SS kullanılmıştır. GDBA/ÖM oranı 0,35, AÇ/ÖM oranı 0,23-0,33 arasında ve su/ÖM oranı 0,35 olarak seçilmiştir. Oda koşullarında (23 ± 2 °C sıcaklık ve $\%50 \pm 5$ bağıl nem) kür edilen numuneler üzerinde 7, 28 ve 90 gün sonunda basınç dayanımı deneyleri, büzülme çatlağı deneyleri, su emme deneyleri ile 90 gün kür sonunda SEM-EDX, XRD ve termogravimetrik analizler (TG/DTG) yapılmıştır. Basınç dayanımı değerleri 7 gün kür sonunda 10,3-34,4 MPa arasında; 90 gün kür sonunda 28,2-56,4 MPa arasında olmuştur. Kür süresinin 28 gün olduğu durumlarda 30-50 MPa arasında dayanım elde etmenin mümkün olduğu belirlenmiştir. SEM/EDX analizleri ile kalsiyum miktarının az olduğu bölgelerde sodyum alümina-silikat-hidrat (N-A-S-H) oluştuğu, kalsiyum miktarının fazla olduğu bölgelerde kalsiyum-silikat-hidrat (C-S-H), kalsiyum-alümina-silikat-hidrat (C-A-S-H), kalsiyum (sodyum)-alümina-silikat-hidrat (C(N)-A-S-H) yapılarının beraber bulunduğu ve bu durumda daha sıkı ve yoğun bir harç matrisinin elde edildiği gözlenmiştir.

İlcan ve diğ. (2024) tarafından yapılan bir çalışmada ÖM'sinde inşaat yıkıntı atıkları içeren, SH molaritesi düşük ve agregasında GDBA'nın kullanıldığı çevre dostu geopolimer harç özellikleri araştırılmıştır. ÖM olarak tuğla ve beton atıkları uygun boyutlarda öğütülerek YFC ve SD ile birlikte kullanılmıştır. ÖM'nin %55-%85 kadarı tuğla atığı, %15'i beton atığı, bazı karışımlarda %25'i YFC ve bir karışımda %5'i SD olarak seçilmiştir. Agregası olarak en büyük tane çapı 2 mm ve 4,75 mm olan iki farklı granülometriye sahip GDBA kullanılmış, agreganın tamamı GDBA'dan oluşmuştur. AÇ sadece SH'den üretilmiştir. GDBA/ÖM oranı 0,5 ve 1,0 olarak seçilmiştir. Su/ÖM oranı 0,38, 0,41 ve 0,42 değerlerinde kullanılmıştır. SH çözeltisi 4, 5, 6, 7 ve 8 M olacak şekilde hazırlanmıştır. Karışımların işlenebilirliği yayılma tablası deneyleri ile incelenmiştir (Şekil 2.10). Reometre kullanılarak dinamik ve statik kayma gerilmesi, viskozite ve tiksotropi performansı araştırılmıştır. Vicat deneyi yapılarak priz başlangıç süreleri incelenmiştir. Basınç ve eğilme dayanımı deneyleri 7 ve 28 gün oda koşullarında kür edilen numuneler üzerinde yapılmıştır. Su emme ve sorptivite deneyleri 28 gün kür

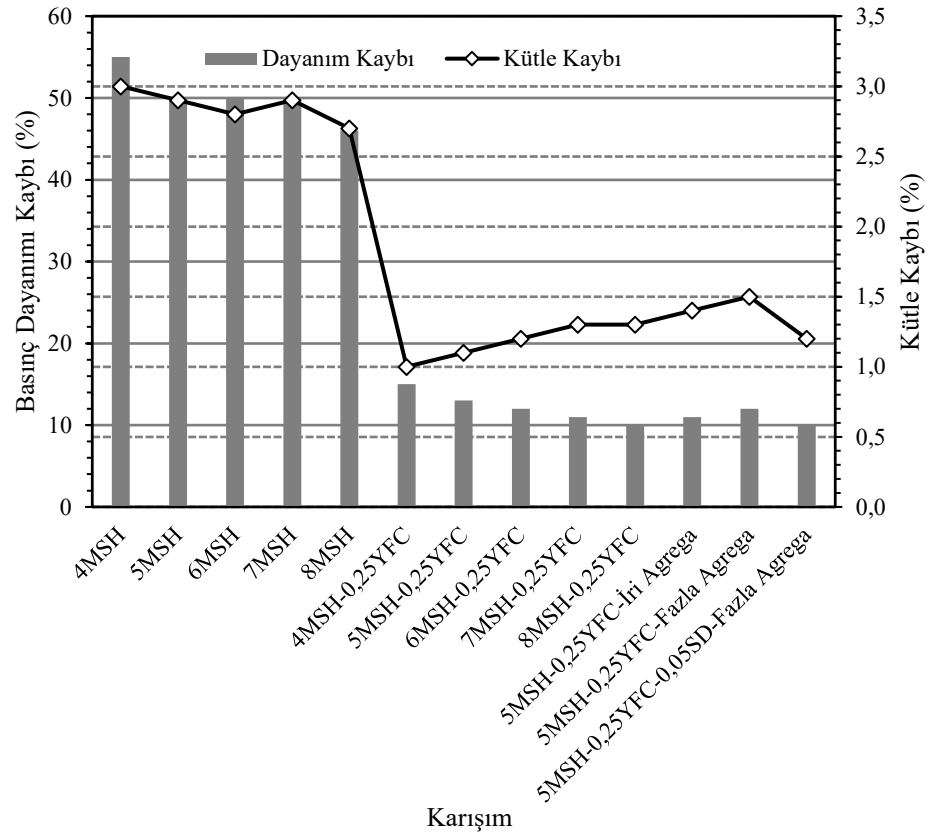
sonunda gerçekleştirilmiştir. Çiçeklenmenin etkisi 28 gün kür edilen numuneler için incelenmiş, 90 güne kadar görsel inceleme yapılmış ve basınç dayanımı değişimleri belirlenmiştir. Büzülme çatlağı deneyleri 120 güne kadar devam edecek şekilde yapılmıştır. Donma-çözülme çevrimlerinin geopolimer harç performansına etkisi 300 çevrim sonunda yapılan dayanım ve kütle kaybı ölçümleri ile incelenmiştir (Şekil 2.11). Ayrıca, 28 gün kür edilmiş numunelerin 90 güne kadar ıslatma-kurutma çevrimleri ile kütle ve dayanım kaybı takip edilmiştir (Şekil 2.12). Çalışmada oda koşullarında 28 günlük kür sonunda basınç dayanımı 24,9 MPa ve eğilme dayanımı 4,7 MPa kadar olabilen hem agregası hem de ÖM'sinin büyük çoğunluğu geri dönüştürülmüş malzemelerden oluşan geopolimer harç üretimi başarıyla gerçekleştirilmiştir. SH molaritesinin 5 M kadar olduğu baziklik derecesi düşük ortamda bile uygun geopolimer harç üretilebilmiştir. Donma-çözülme çevrimleri sonucunda %16-%30 arasında ve ıslatma-kurutma çevrimleri sonucunda %5-%55 arasında bir dayanım kaybı meydana gelmiştir.



Şekil 2.10. GGH'lerin yayılma değerleri (İlcan ve diğ. (2024) çalışmasından düzenlenmiştir)



Şekil 2.11. GGH'lerin donma-çözülme dayanıklılığı, (İlcan ve diğ. (2024) çalışmasından düzenlenmiştir)



Şekil 2.12. GGH'li ıslatma-kurutma dayanıklılığı (İlcan ve diğ. (2024) çalışmasından düzenlenmiştir)

Singh ve diğ. (2024) tarafından yapılan çalışmada, agregasının tamamı GDA'dan olan ve ÖM'si UK, YFC, SD'den seçilen geopolimer betonların sülfat ve asit saldırısına karşı dayanıklılığı incelenmiştir. ÖM için SD/ÖM oranı %0-%20 arasında, YFC/ÖM oranı %30-%60 arasında değişecek şekilde belirlenmiştir. Kullanılan GDA'nın %90'dan fazlasının beton kırıklarından meydana geldiği belirtilmiştir. Buna göre çalışmadaki GDA GDBA'ya yakın bir karakteristik özelliktedir. AÇ olarak SH ve SS çözeltisi karışımı, SS/SH oranı 2,5 olacak şekilde kullanılmıştır. SH çözeltisi 12 M derişimde hazırlanmış ve SS'nin silikat modülü 2,0 olarak belirlenmiştir. GDBA/ÖM oranı 2,6 ve AÇ/ÖM oranı 0,5 değerinde sabit seçilmiştir. Oluşturulan küp şeklinde geopolimer betonlar oda koşullarında 7, 28, 56, 90 ve 180 gün kür edilmiş ve her kür süresi sonunda basınç dayanımı belirlenmiştir. Geopolimer beton numunelerden seçilenler 28 gün kür sonunda 28, 56, 90 ve 180 gün, asitli ortamı temsil eden %5 H₂SO₄ ve sülfatlı ortamı temsil eden %5 Na₂SO₄ ve %5 MgSO₄ çözeltilerinde ayrı ayrı bekletilmiştir. Her bekletme süresi sonunda görsel inceleme yapılmış, kütle kaybı ve basınç dayanımı değişimi incelenmiştir. Zararlı ortam etkisinin mikro yapıya etkisi XRD, SEM ve cıva porozimetresi (MIP) analizleriyle araştırılmıştır. Geopolimer betonların basınç dayanımları 28 gün kür sonunda 39,15-52,15 MPa arasında değişmiştir. MgSO₄ çözeltisinde 180 günlük bekletme sonunda %2,45-%6,52 arasında kütle kaybı gözlenmişken kontrol numuneleri olan çimentolu betonlarda kütle kayıpları %13,14'e kadar çıkmıştır. MgSO₄ çözeltisinde 180 gün bekleyen geopolimer betonlarda basınç dayanımındaki kayıplar %11,3-%21,7 arasında olmuş, çimentolu betonlu kontrol numunelerinde basınç kaybı %33,3'e kadar artmıştır. Dayanımdaki kayıpların sülfatlı çözeltilerde 90 günlük ve 180 günlük bekletme süreleri arasında azaldığı gözlenmiştir. Sonuç olarak C-S-H, C-A-S-H ve N-A-S-H yapılarının geopolimer betonda daha yoğun olduğu ve çimentolu betona göre geopolimer betonun dayanım ve dayanıklılık bağlamında daha üstün olduğu belirlenmiştir.

Li ve diğ. (2023) yaptıkları çalışmada, ÖM'sinde SD ve agregasında GDBA oranı değişiminin geopolimer betonun mekanik performansına etkisi incelemiştir. ÖM'de esas olarak YFC kullanılmış ve SD/ÖM oranı 0, 0,5, 0,10 ve 0,15 olacak şekilde SD eklenmiştir. İnce agreg olarak 0,5-5 mm tane çapı aralığında doğal kum ve iri agreg olarak doğal agreg ve GDBA seçilmiştir. İri agreganın %0, %25 ve %50'si GDBA'dan oluşacak şekilde tasarımlar oluşturulmuştur. Silikat modülü 2,25 olan SS ve silikat modülünü 2,0 değerine düşürecek miktarda SH karışımı ile AÇ hazırlanmıştır. Çalışmada iri agreg ve ince agreg toplamının ÖM'ye oranı 4,31 değerinde sabit tutulmuştur. AÇ/ÖM oranı 0,33 olmuş; fakat naftalin esaslı süper akışkanlaştırıcı kullanılmıştır.

Ayrıca, ÖM'nin 0,21'i kadar ilave su karışıma eklenmiştir. Taze beton özelliği olarak priz süresi deneyleri ile priz süreleri belirlenmiştir. Hazırlanan numuneler 24 saat oda koşullarında kür edilmiş, sonra oda sıcaklığında standart bir kür tankında 3, 7 ve 28 gün kür edilip basınç dayanımı ve yarmada çekme dayanımı deneyleri yapılmıştır. Eğilme dayanımı deneyleri 28 gün kür sonunda gerçekleştirilmiştir. SEM, XRD ve nükleer manyetik rezonans (NMR) analizleri 28 günlük kür sonunda yapılmıştır. Priz başlangıç süreleri 20-32 dk arasında değişmiştir. Priz başlangıç süresi ÖM'de SD oranı düşük seviyelerde iken kısalmış, SD oranı arttıkça uzamıştır. Yapılan deneyler sonucunda 28 günlük kür sonunda basınç dayanımları 25-55 MPa arasında ve eğilme dayanımları 3,6-4,5 MPa arasında olmuştur. Dayanımlarda iri agregada %50'ye kadar GDBA kullanılması durumunda %10'a kadar azalma meydana gelirken ÖM'ye SD eklenmesi performanstaki bu olumsuz davranışı dengelemiştir. Buna göre, agregada GDBA kullanılması durumunda ÖM'de SD'nin de kullanılması tavsiye edilmiştir.

2.2. Kazıklı Radye Sistemleri ile İlgili Araştırmalar

Fattah ve diğ. (2015) tarafından farklı kum zeminlerdeki kazıklı radye sistemlerinin davranışı değerlendirilmiştir. Deneyler 1×2, 1×3, 1×4, 2×2, 2×3, 2×4, 3×3, 3×4 ve 4×4 yerleşim düzenlerindeki kazıklı radye sistemleri üzerinde yapılmıştır. Ayrıca benzer düzenlerdeki kazık grupları için de deneyler gerçekleştirilmiştir. Alüminyum plakadan yapılan radyenin boyutları yerleşim düzenlerine göre değişiklik göstermiş, kalınlığı 4 mm olarak sabit tutulmuştur. Çapı 1,2 cm ve uzunluğu 20 cm olan alüminyum borudan yapılmış kazıklar kullanılmış olup kazıklar arası mesafe tüm düzenlerde 3D_k değerinde sabit tutulmuştur. Deney tankının boyutları 45×45×50 cm olarak seçilmiş ve 5 ton kapasiteli bir yük hücresi kullanılmıştır. Tüm deneylerde deplasman hızı 1 mm/dk olan deplasman kontrollü yükleme yapılmıştır. Kazıklı radye sisteminin taşıma gücü literatürdeki farklı yöntemlere göre belirlenmiştir. Kazık sayısının 4'ten az olduğu durumlarda radyenin, kazıklı radye taşıma gücüne önemli bir katkısının olmadığı belirtilmiştir. Kazıklı radyenin yenilme anındaki taşıdığı yükün kazık grubuna göre 9 kazıklı düzende %100 daha fazla olduğu saptanmıştır. Kazık sayısının 16 olduğu durumda yenilme anında kazıklı radye ve kazık grubunun taşıdığı yük arasındaki bu fark 4 kat artmıştır.

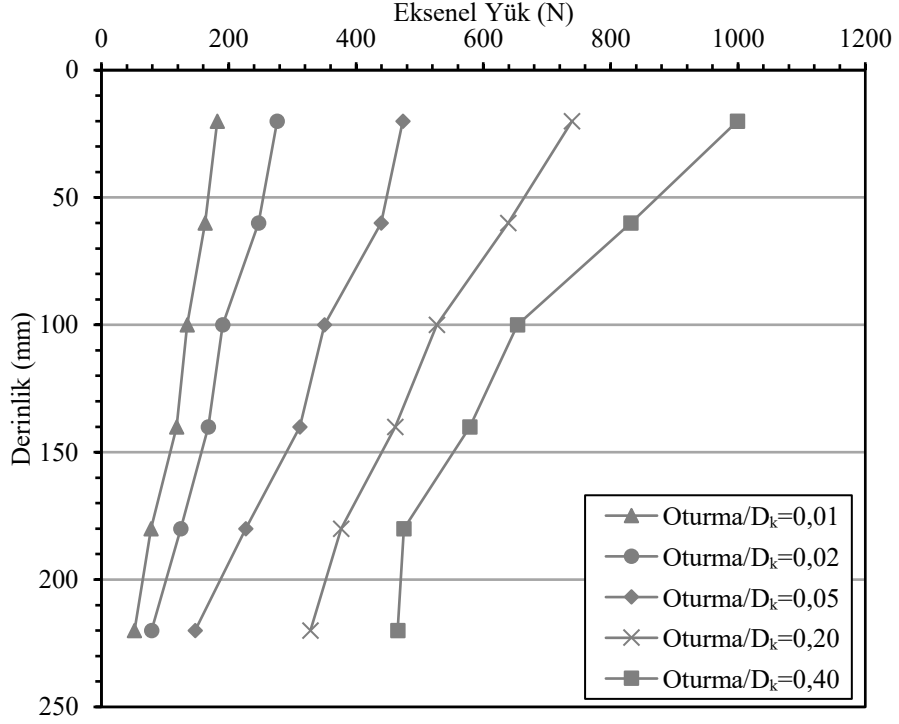
Elwakil ve Azzam (2016) tarafından yapılan çalışmada kumlu zeminlere inşa edilen radye ve kazıklı radye sistemlerinin oturma azaltıcı olarak kullanılmaları

durumunda sistemin davranışı incelenmek istenmiştir. Sadece radye ile 2×2 , 2×4 , ve 4×4 düzende kazıklı radye sistemleri ve kazık grupları için düşey yükleme yapılarak küçük ölçekli model deneyler gerçekleştirilmiştir. Kare şeklinde bir çelikten $15 \times 15 \times 1,5$ cm boyutlarında radye üretilmiştir. Kazıkların çapı 1,2 cm olup uzunlukları 10, 20 ve 40 cm olarak 3 farklı uzunlukta olacak şekilde belirlenmiştir. Kazıklar arası mesafe sabit değer olarak $3,125D_k$ seçilmiştir. Küçük ölçekli model deney tankı sınır koşullarına uygun olarak çapı 75 cm ve yüksekliği 60 cm olacak şekilde tasarlanmıştır. Yükleme adım adım yapılmıştır. Buna göre her yükleme aşamasında 5 dk boyunca arka arkaya yapılan iki oturma okuması arasındaki fark 0,01 mm'den az olunca sonraki yükleme aşamasına geçilmiştir. Deneysel analizler sonlu elemanlar yöntemi dikkate alınarak yapılan sayısal analizler ile karşılaştırılmıştır. Genel olarak kazıklı radyede, radye tarafından taşınan yük, kazık sayısı azaldıkça %55'e kadar artmıştır. Kazık sayısının 4'ten 16'ya çıktığı durumda kazıklı radyenin taşıma gücü %30 daha yüksek olmuştur.

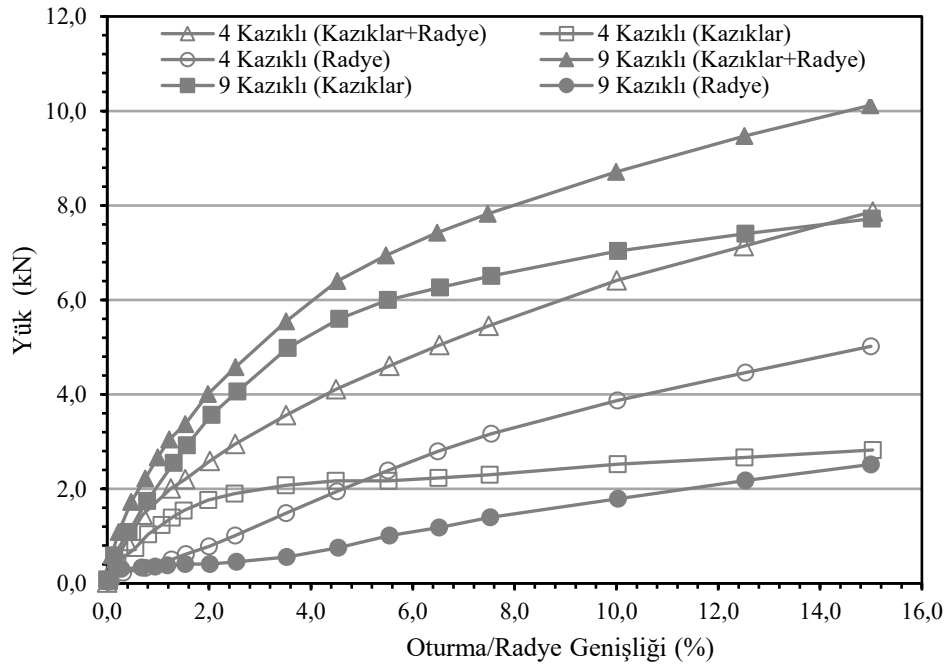
Vu ve diğ. (2018) tarafından kum zeminde eğik kazıklı olan ve olmayan kazıklı radye davranışı 1g küçük ölçekli model deneyler ile incelenmiştir. Kazıklı radye sistemlerinde düşey ve yanal yükleme yapılmıştır. Deneylerde 3×1 düzende kazıklı radye sistemi kullanılmış olup kazıklar arası mesafe $4D_k$ olarak belirlenmiştir. Çapı 2 cm ve uzunluğu 25,5 cm olan kazıklar kullanılmıştır. Kazıklarda meydana gelen etkiler (Şekil 2.13) ve kazıklı radye yük-oturma ilişkisi de değerlendirilmiştir. Oturma miktarının artmasıyla beraber kazıklar tarafından taşınan eksenel yükün 180 N seviyesinden 1000 N seviyesine kadar arttığı belirlenmiştir.

Sharafkhah ve Shooshpa (2018) tarafından çelik veya alüminyum kazıklar yerine yerinde dökme beton kazık ve radye kullandıkları kazıklı radye sistemleri ve kazık grupları üzerinde kum zeminde 1g küçük ölçekli model deneyler yapılmıştır. Sadece radye, sadece kazık, 2×2 düzende kazıklı radye sistemi, 2×2 düzende kazık grubu, 3×3 düzende kazıklı radye sistemi ve 3×3 düzende kazık grubu için düşey yükleme yapılmıştır (Şekil 2.14). Çapı 2,84 cm ve uzunluğu 25,3 cm olan kazıklar üretilmiştir. Kazıklar arası mesafe $2,64D_k$ ve $5,28D_k$ olmuştur. Kazıklı radye sisteminde kazık sayısının artmasıyla oturma miktarının büyük ölçüde azaldığı ve kazıklar arası mesafenin büyümesiyle kazıkların paylaştığı yük oranının %87'den %71'e düştüğü belirlenmiştir. Kazıklı radye için izin verilebilir yük değerine ulaşıldığında 2×2 düzen için kazıklar kendileri için izin verilebilir yük değerinin fazlasını almış ve kazıklardaki yükler kazıklar tarafından taşınabilecek en büyük yükün %77'sine kadar artmıştır. Kazıklı radye düzeninin 3×3 olduğu durumda ise kazıklardaki yükler, kazıklar tarafından taşınabilecek en büyük

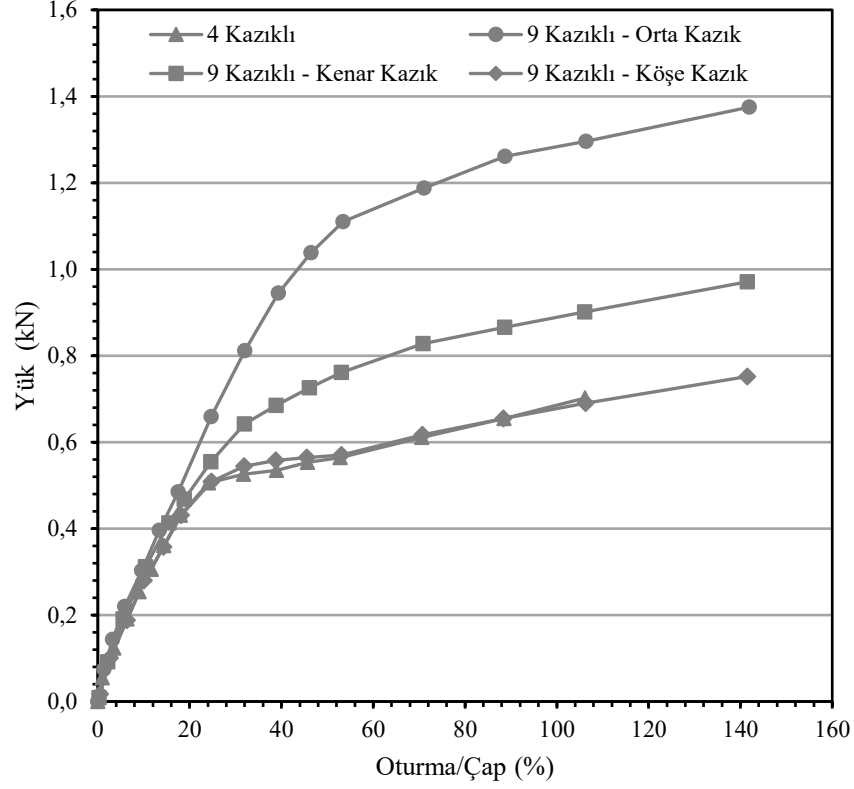
yükün; köşe kazıklar için %62'si, kenar kazıklar için %34'ü ve orta kazıklar için %22'si kadarı olmuştur (Şekil 2.15).



Şekil 2.13. Kazıklı radye sisteminde kazıklarda meydana gelen eksenel yükler (Vu ve diğ. (2018) çalışmasından düzenlenmiştir)



Şekil 2.14. Kazıklı radyede 2x2 ve 3x3 düzen için yük-oturma davranışları (Sharafkhah ve Shooshpa'nın (2018) çalışmasından düzenlenmiştir)

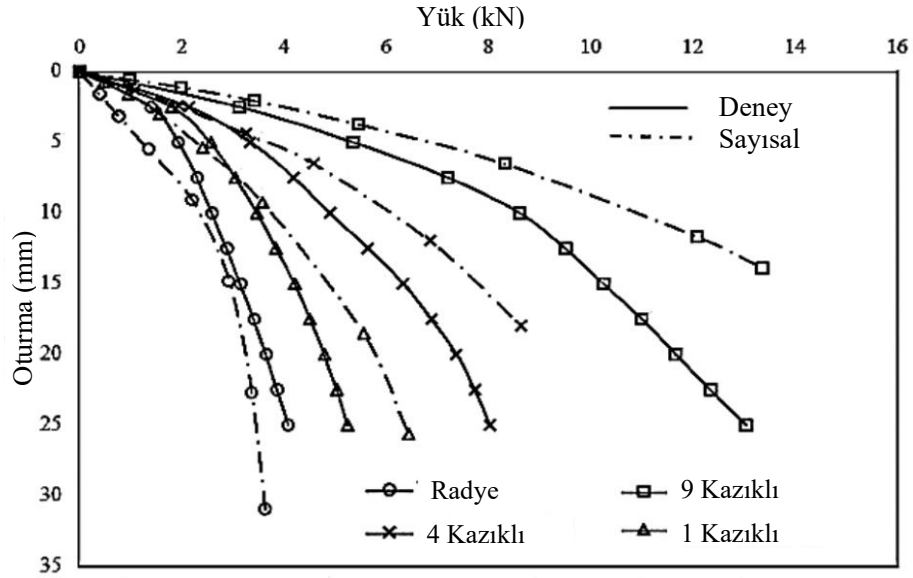


Şekil 2.15. Kazıklı radyede 2x2 ve 3x3 düzen için kenar, orta ve köşe kazık yükleri (Sharafkhah ve Shoosha'nın (2018) çalışmasından düzenlenmiştir)

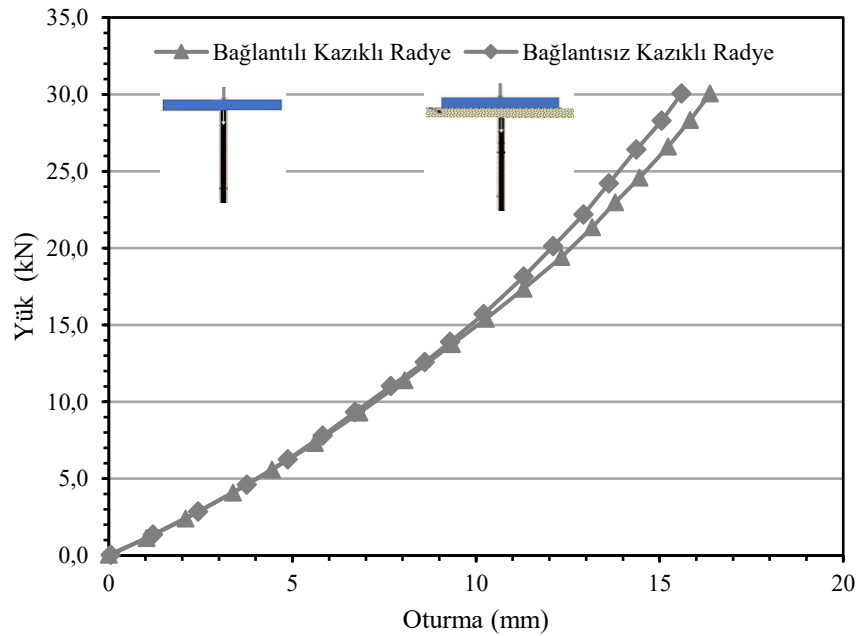
Deb ve Pal (2020) tarafından farklı tabakalardan oluşan zemine inşa edilmiş kazıklı radye sistemlerinin yük-oturma ve kazık-radye yük paylaşma davranışı 1g küçük ölçekli model deneyler ile incelenmiştir. Sadece radye, sadece kazık, 2x2 ve 3x3 düzende kazıklı radye sistemleri üzerinde deneyler yapılmıştır. Kazıklar arası mesafe $3D_k$ ve kazıkların uzunluğu 25 cm olarak seçilmiştir. Aynı zamanda 3 boyutlu numerik analizler gerçekleştirilmiştir. Kazık sayısı arttıkça taşıma gücünün arttığı; fakat radye tarafından paylaşılan yükün azaldığı belirlenmiştir. Radye temele göre kazıklı radye sisteminin kullanılması durumunda taşıma gücünde %20 ile %69'a kadar bir artış meydana gelmiştir. Sayısal analiz ile deney sonuçlarının yakın olduğu gösterilmiştir (Şekil 2.16).

Halder ve Manna (2021) tarafından yapılan çalışmada, kum zeminde düşey yükleme altında kazıklı radye ve bağlantılı olmayan kazıklı radye sistemlerinin yük taşıma ve iletme mekanizmaları 1g küçük ölçekli model deneyler ile araştırılmıştır. Bir tanesi sadece radye, bir tanesi sadece kazık, bir tanesi 2x2 düzende kazıklı radye ve bir tanesi de 2x2 düzende bağlantılı olmayan kazıklı radye olmak üzere toplam 6 tane deney yapılmıştır. Çalışmada kazıkların eğilme rijitliğine göre ölçekleme yapılmıştır. Her iki kazıklı radye türü için de kazıklı radye yük-oturma ilişkisi, kazık-radye yük paylaşımı ve

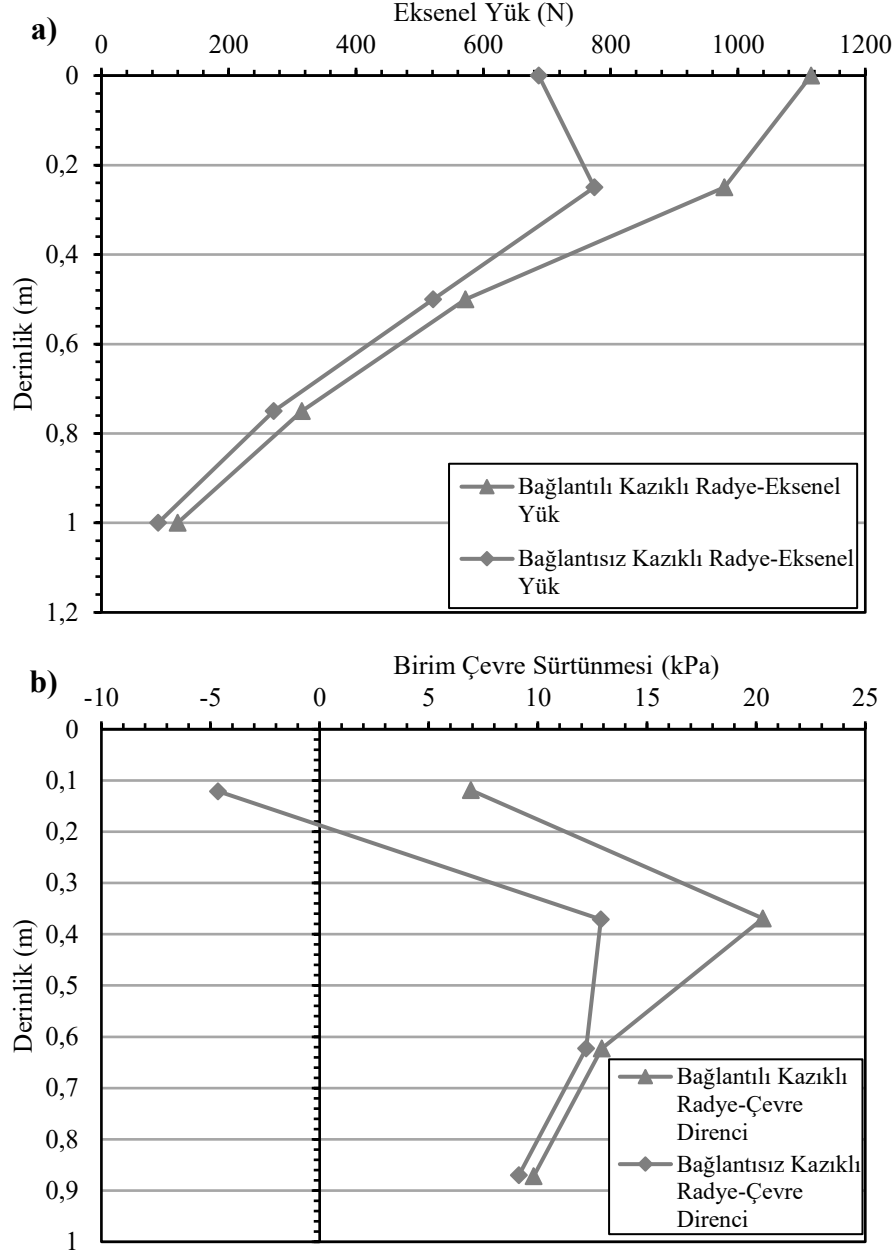
kazıklarda meydana gelen eksenel yükler incelenmiştir (Şekil 2.17 ve Şekil 2.18). Kazıklı radye sisteminde ilk başta yükün tamamını kazıkların taşıdığı, oturma arttıkça kazıklar tarafından taşınan yükün %20'ye kadar azaldığı ve kazıkların radye rijitliğini azaltıcı yönde bir etkisinin olduğu gözlemlenmiştir.



Şekil 2.16. Kazıklı radye için sayısal analiz ve deney sonuçlarının karşılaştırması (Deb ve Pal'ın (2020) çalışmasından düzenlenmiştir)



Şekil 2.17. Bağlantılı ve bağlantısız kazıklı radye sistemlerinde yük-oturma ilişkisi (Halder ve Manna'nın (2021) çalışmasından düzenlenmiştir)

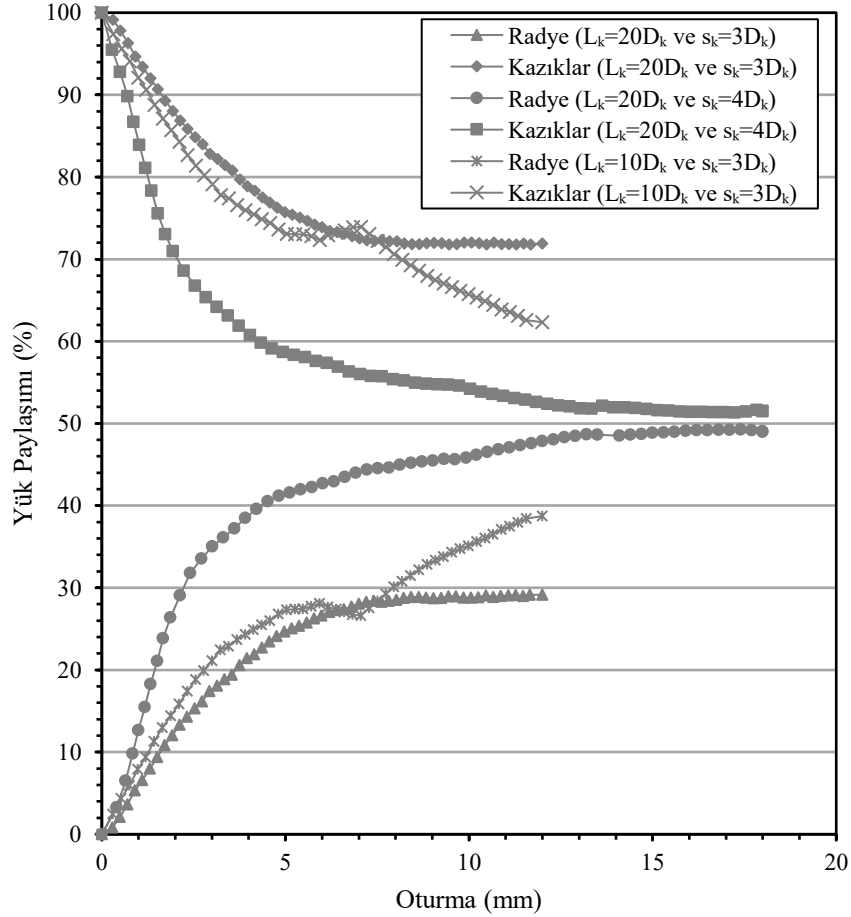


Şekil 2.18. Bağlantılı ve bağlantısız kazıklı radye sistemlerinde: a) Kazıktaki eksenel yük, b) Kazıktaki çevre sürtünmesi (Halder ve Manna'nın (2021) çalışmasından düzenlenmiştir)

Jamil ve diğ. (2022) tarafından kazık grupları ve kazıklı radye sistemlerinin düşey ve yanal yükleme altındaki davranışı 1g küçük ölçekli model deneyler ile incelenmiştir. Çalışmada, 4 ile 25 arasında kazıktan oluşan kazıklı radye ve kazık grupları için deney yapılmıştır. Kazıklar arası mesafe $3,33D_k$ ve $6,67 D_k$ arasında seçilmiştir. Radyenin taşıma gücüne etkisinin kazıklı radye sisteminde oldukça dikkat çeken nitelikte olduğu belirlenmiştir.

Bralovic ve diğ. (2023) tarafından gevşek kumda 2×2 düzenindeki kazıklı radye sistemlerinde küçük ölçekli 1g fiziksel model deneyler yapılmıştır. Toplam 12 tane deney

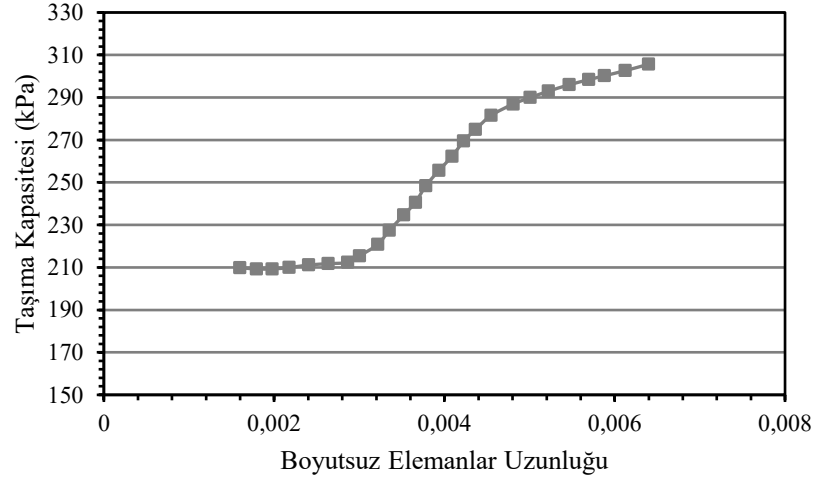
yapılmış olup, deneylerin 3 tanesi sadece radye için yapılmıştır. Geri kalan 9 deney kazıklar arası mesafelerin $3D_k$, $4D_k$ ve $5D_k$ ve kazık uzunluklarının $10D_k$, $20D_k$ ve $40D_k$ olduğu kazıklı radye sistemleri için yapılmıştır. Gevşek kum zeminlerde bu türden bir çalışmada 1g modellemenin uygun olacağı belirtilmiştir. Kazıklar arası mesafe $3D_k$ iken grup etkisinin taşıma gücü üzerinde önemli olduğunu, bu mesafenin $5D_k$ kadar olduğu durumda grup etkisinin öneminin büyük ölçüde azaldığı gözlemlenmiştir. Kazıklı radye sistemine uygulanan yükün %50'sine yakın bir miktarının kazıklar tarafından taşındığı belirlenmiştir (Şekil 2.19). Kazıklı radye sistemlerinde bütün yükün kazıklar tarafından taşındığı varsayımı ile yapılan tasarımların çok güvenli yönde kaldığı, radyenin de taşıma gücüne katkısının dikkate alınarak daha ekonomik tasarımların yapılabileceği önerilmiştir.



Şekil 2.19. Farklı kazık uzunluğu ve aralıklarına göre kazık-radye yük paylaşımı (Bralovic ve diğ. (2023) çalışmasından düzenlenmiştir)

Almaged ve Al-Abbas (2024) tarafından yapılan çalışmada kötü derecelenmiş kumlu zeminde kazıklı radye sistemlerinde kazık-radye-zemin arasındaki ilişkinin incelenebilmesi için küçük ölçekli model deneyler ve sayısal analizler gerçekleştirilmiştir. Küçük ölçekli model deney 3×3 yerleşim düzenindeki kazıklı radye için yapılmıştır. Radye boyutları 25×25×2 cm, kazık çapı 2,5 cm ve kazık uzunluğu 50 cm olarak belirlenmiştir. Kazıklar arası mesafe $3D_k$ olarak belirlenmiştir. Tank boyutları 100×100×80 cm olarak seçilmiş ve 50 ton kapasiteli bir piston kullanılmıştır. Kazıklar 1,30 mm kalınlığında içi boş alüminyum kesitlerden ve radye 20 mm kalınlığında bir levhadan oluşturulmuştur. Sadece radyenin de düşey yükleme altındaki davranışı hem deneysel çalışmada hem de sayısal analizlerle kazıklı radye ile karşılaştırma yapabilmek amacıyla incelenmiştir. Kazıklı radye ve radye üzerinde 10 kN/dk şeklinde yük kontrollü yükleme yapılmıştır. Kazıklı radyenin taşıma kapasitesi 5 mm oturmaya karşılık gelen 49 kN ve radyenin taşıma kapasitesi 10 mm oturmaya karşılık gelen 26 kN olarak belirlenmiştir. Sonuç olarak deneysel çalışmada kazıklar, radyenin taşıma kapasitesini %89 oranında iyileştirirken oturma miktarını %50 oranında azaltmış, bu oranlar sayısal analizlerde sırasıyla %95 ve %23 olarak elde edilmiştir.

Halder ve Manna (2022b) tarafından kazıklı radye sistemlerinin düşey yükleme altında L_k , kazık yerleşimi, s_k ve kuma gömülü durumdaki radyenin kalınlığının performansa etkisi sayısal analizlerle araştırılmıştır. L_k/D_k oranının 20, 40 ve 60, s_k değerinin $2-6D_k$ arasında değiştiği çalışmada 2×2, 3×3 ve 4×4 yerleşim düzeninde kazıklı radye sistemleri dikkate alınmıştır. Kum zemin Mohr-Coulomb modeli ile modellenmiş ve kazıkların s_k ve L_k değişiminden bağımsız olarak toplam uygulanan yükün %40-60 kadarını taşıyabildiği tespit edilmiştir. Kazıkların paylaştığı yükte radye genişliğinin %0,4'ü mertebesinde önemli bir azalma gözlenmiştir. Oturmanın kazık çapına oranının %0,5-1 arasında olduğu durumda kazıklarda çevre sürtünmesinin çoğunlukla tamamen etkinleştiği belirlenmiştir. Araştırmacılar, sonlu elemanlar ağının sıklığının ince ve çok ince olduğu durumlarda taşıma kapasitesinde büyük bir değişim olmadığını belirtmişlerdir (Şekil 2.20).



Şekil 2.20. Taşıma kapasitesi ile sonlu elemanlar ağı sıklığının ilişkisi (Halder ve Manna'nın (2022b) çalışmasından düzenlenmiştir)

Han ve diğ. (2019) tarafından yapılan çalışmada, zeminde yer değişme meydana getirmeden üretilen tekil kazık, kazık grubu ve kazıklı radyenin kum zeminde düşey yüklenmesi durumunda davranışı sonlu elemanlar analizleri ile araştırılmıştır. Çalışmada tekil kazık, 1×2, 1×3, 2×2 ve 4×4 düzenleri dikkate alınmıştır. Abaqus kullanılan çalışmada kazık başlığından dolayı meydana gelen taşıma gücü katkısı nedeniyle toplam grup veriminin 1'den büyük olabileceği önerilmiştir. Fakat çalışmada elde edilen bu sonucun özellikle küçük kazık gruplarında etkili olabileceği, büyük kazık gruplarında bu çalışmada elde edilen verilen uygulanamayacağı belirtilmiştir.

3. MATERYAL VE YÖNTEM

Materyal ve Yöntem bölümünde GGH üretiminde kullanılan ÖM ve küçük ölçekli model çalışmalarında kullanılan kumun özellikleri verilmiştir. Malzeme özelliklerinin verilmesinden sonra tez çalışmasının yöntemi sırasıyla ilgili alt başlıklarda açıklanmıştır.

3.1. GGH Bileşenleri ve Deney Kumu

3.1.1. Öncül malzeme (ÖM)

Geopolimer üretiminde ÖM terimi çimento teknolojisindeki çimentonun karşılığı olarak kabul edilebilir. Tez çalışması kapsamında GGH öncül malzemesi olarak UK, SD ve YFC kullanılmıştır. ÖM olarak kullanılan F sınıfı UK Seyitömer Termik Santrali, SD Antalya Ferrokrom Fabrikası ve YFC Karabük Demir Çelik Fabrikası'ndan temin edilmiştir (Şekil 3.1).

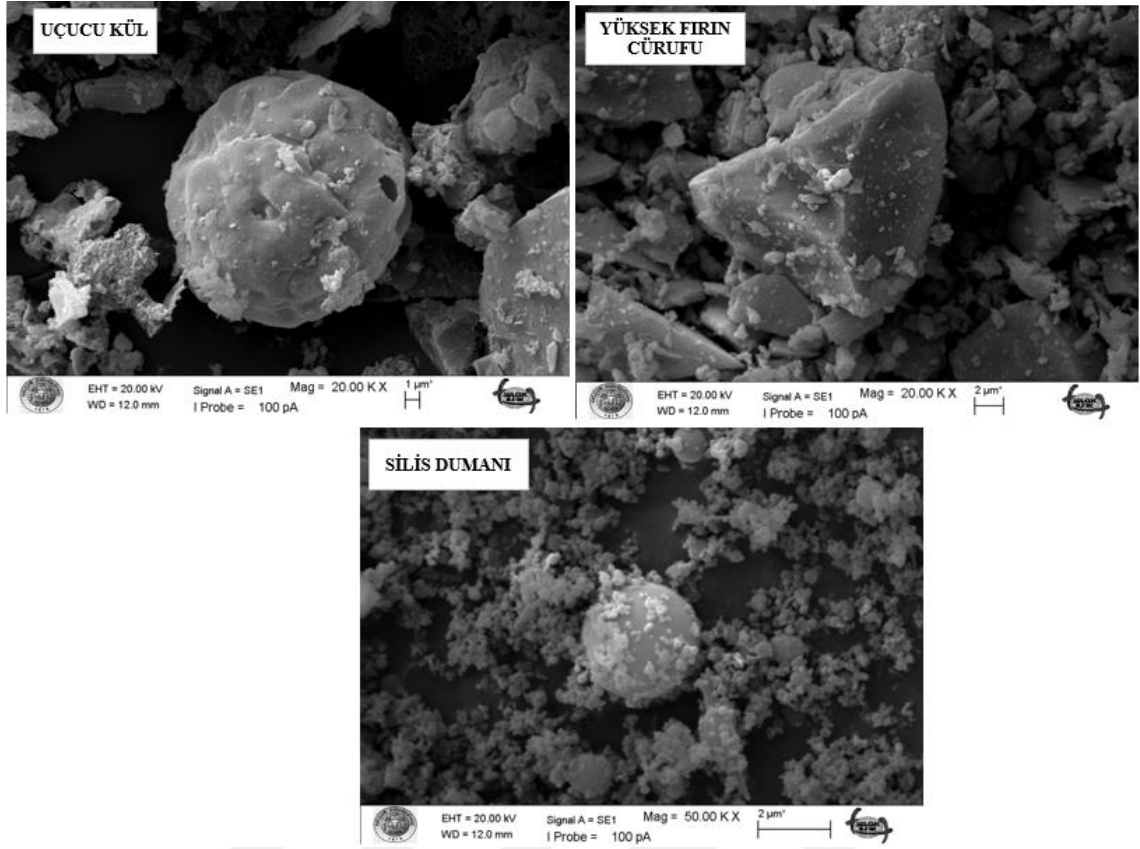


Şekil 3.1. UK, YFC ve SD'nin görünümü

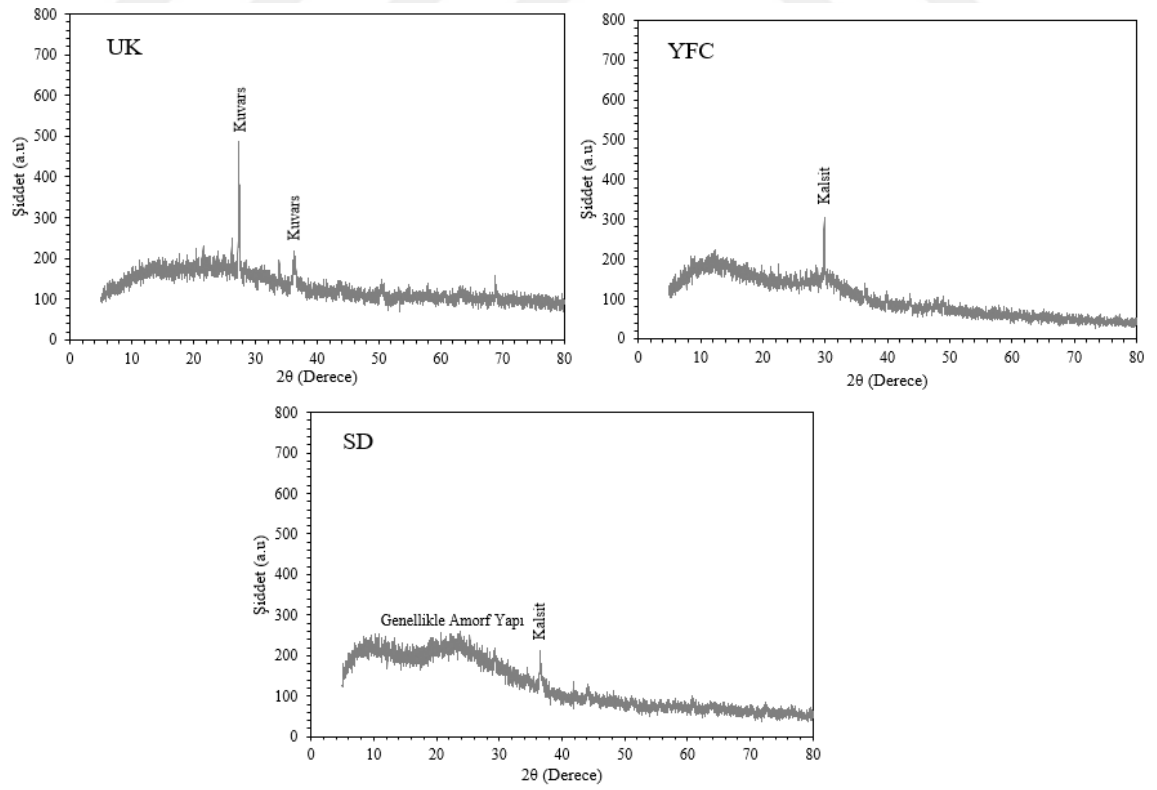
ÖM'lerin mikro yapısı ile ilgili bilgi edinebilmek için SEM, XRF ve XRD analizleri yapılmıştır. SEM analizi görüntülerine göre SD'nin küresel tane yapısına sahip olduğu, UK'nin de küresel özellikte tane içerdiği ve YFC'nin tane yapısının köşeli olduğu görülmektedir (Şekil 3.2). XRF analizi sonuçlarına göre UK ve YFC'nin silikat ve alüminat miktarı bakımından GGH oluşturabilmek için yeterli olduğu belirlenmiştir (Çizelge 3.1). XRF analizi, UK'nin SiO_2 , Al_2O_3 ve Fe_2O_3 toplamının %70'ten fazla olması nedeniyle F sınıfında olduğunu göstermiştir. Bunun yanında SD'nin kimyasal yapısının %85'ten fazlası SiO_2 kökenlidir. Bu nedenle SD'nin alüminatlar da içeren UK ve YFC ile beraber kullanılması geopolimerizasyonun gerçekleşebilmesi için gerekli olmaktadır. XRD analizi ile SD'nin amorf fazlarının oldukça yüksek olduğu ve UK'nin kuvars içerdiği belirlenmiştir (Şekil 3.3).

Çizelge 3.1. ÖM bileşenlerinin kimyasal içeriği

Bileşik	UK (%)	YFC (%)
SiO_2	48,30	35,84
Al_2O_3	16,44	12,71
Fe_2O_3	13,14	1,85
CaO	5,58	34,66
MgO	6,72	6,04
SO_3	0,26	1,84
K_2O	1,18	0,96
Na_2O	0,90	≈0,00
Diğer	≈8,50	≈7,00
Kızdırma Kaybı	1,30	≈0,00



Şekil 3.2. UK, YFC ve SD'nin SEM analizi görüntüleri



Şekil 3.3. UK, YFC ve SD'nin XRD analizi kırınım desenleri

3.1.2. Aktivatör çözelti (AÇ)

GGH üretim aşamalarında reaksiyonların gerçekleşebilmesi için gerekli bazik ortam, su yerine AÇ kullanılarak oluşturulmaktadır. Tez çalışması kapsamında GGH AÇ'si olarak SH ve SS kullanılmıştır. SH %98 oranında saflıkta katı pul şeklinde (Şekil 3.4) ve SS ise silikat modülü değeri 2 olacak şekilde endüstriyel üretim yapan firmalardan çözelti şeklinde (Şekil 3.5) temin edilmiştir. Kullanılan SS çözeltisi içindeki H_2O oranı %48-52 arasında değişmektedir. SS çözeltisi özellikle prizin hızlı gerçekleşmesini önlediği ve daha sağlıklı bir geopolimerizasyon sürecinin gerçekleşmesine yardımcı olduğu için SH ile birlikte kullanılmıştır.



Şekil 3.4. Katı halde SH



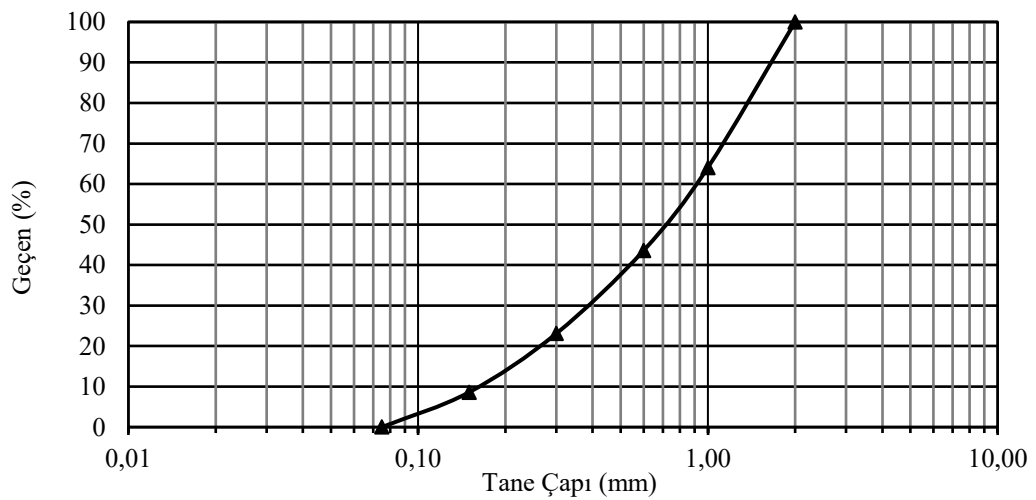
Şekil 3.5. SS çözeltisi

3.1.3. Agregas (GDBA)

Geopolimerli harç veya betonların agregası olarak doğal veya standart kırmataş agregalar kullanılabilir. Bu tezin amaçlarından bir tanesi doğal kaynakların kullanımını hem ÖM hem de agrega bakımından azaltmaktır. Bu nedenle tez çalışması kapsamında GGH agregası olarak kum boyutlarında GDBA kullanılmıştır. GDBA üretiminde basınç dayanımları en az 25 MPa olan betondan üretilmiş atık parke ve bordürler seçilmiştir. Atık parke ve bordürler laboratuvar tipi çeneli kırıcı kullanılarak kırılmış (Şekil 3.6) ve en büyük tane çapı 2 mm olacak şekilde düzenlenmiştir (Şekil 3.7). Bu parçalara ayrılmış beton kırıkları agregas olarak kullanılmak üzere GDBA adını alır.



Şekil 3.6. Laboratuvar tipi çeneli kırıcı



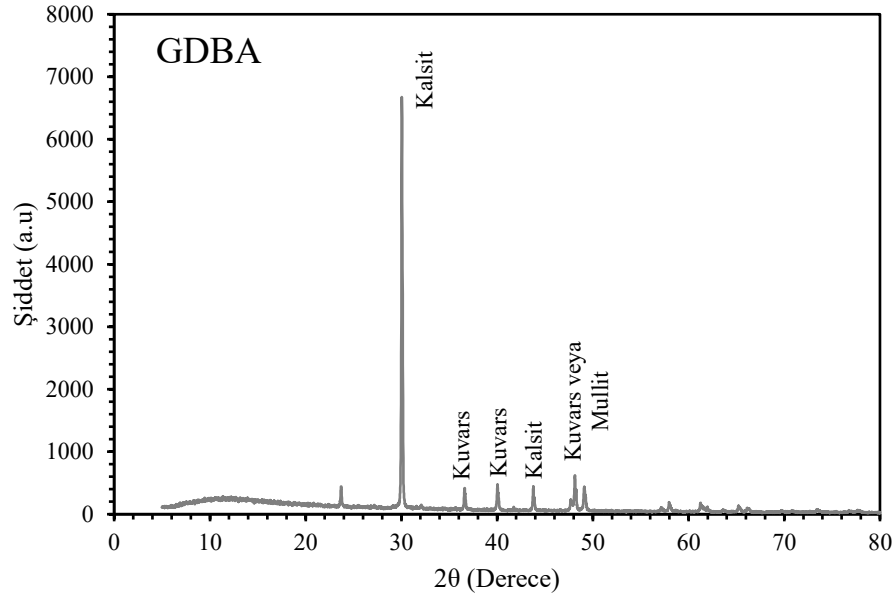
Şekil 3.7. GDBA'nın tane çapı dağılımı

GDBA'nın fiziksel özelliklerini belirlemek için bir dizi laboratuvar deneyi yapılmıştır (Çizelge 3.2). Bu deneyler genel malzeme deneyleri olduğundan ayrıntılı bir şekilde açıklanmamış, ilgili standartlara atıf yapılmıştır. GDBA'nın tane yoğunluğunun düşük ve su emme kapasitesinin oldukça yüksek olduğu belirlenmiştir. Ayrıca, Los Angeles aşınma kaybı ve $MgSO_4$ dayanıklılığı kütle kaybının da çok yüksek olduğu görülmektedir. GDBA'nın bu davranışını büyük oranda bünyesindeki yapışık çimento harcı etkilemektedir.

GDBA'nın mikro yapısı ile ilgili bilgi edinebilmek için XRD analizi yapılmıştır (Şekil 3.8). GDBA'da yapışık çimento harcı nedeniyle karbonatlaşma etkisi ve agregasının kireçtaşı olması nedenleriyle kalsit içerdiği görülmüştür. Ayrıca kuvars içerdiği belirlenmiştir.

Çizelge 3.2. GDBA'nın fiziksel özellikleri

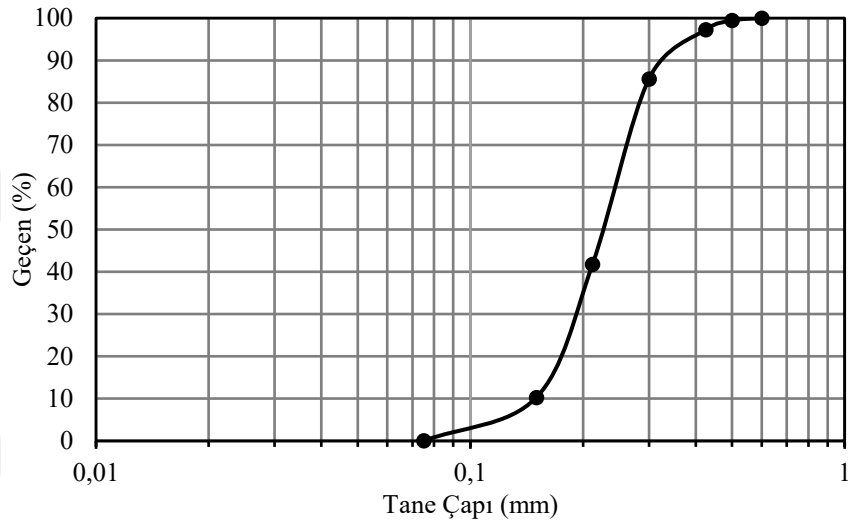
Özellik	Değer	Standart
Tane Yoğunluğu (g/cm^3)	2,41	ASTM C128 (2022)
Su Emme (%)	6,24	ASTM C128 (2022)
Los Angeles Aşınma (%)	43,42	ASTM C131 (2020)
$MgSO_4$ Dayanıklılığı Kütle Kaybı (%)	20,15	ASTM C88 (2018)
Yassılık Endeksi (%)	6,47	TS EN 933-3 (2012)



Şekil 3.8. GDBA'nın XRD analizi kırınım deseni

3.1.4. Küçük ölçekli model deneylerde kullanılan kum

Tez kapsamında küçük ölçekli model deneylerde kullanılmak üzere kum zemin olarak silis kumu temin edilmiştir (Şekil 3.9). Silis kumunun tane özgül yoğunluğu (ASTM D854, 2023), en büyük boşluk oranı (ASTM D4254, 2016), en küçük boşluk oranı (ASTM D4253, 2016) belirlenmiş ve diğer fiziksel özellikleri ile beraber Çizelge 3.3'te verilmiştir. Silis kumunun sınıfı Birleştirilmiş Zemin Sınıflandırma Sistemi'ne (USCS) göre (ASTM D2487, 2017) kötü derecelenmiş kum (SP) olarak belirlenmiştir.



Şekil 3.9. Kumun tane çapı dağılımı

Çizelge 3.3. Kumun fiziksel özellikleri

Özellik	Değer
D ₁₀	0,15
D ₃₀	0,19
D ₅₀	0,22
D ₆₀	0,23
C _u	1,53
C _r	1,05
Tane Yoğunluğu (g/cm ³)	2,653
En Küçük Boşluk Oranı	0,647
En Büyük Boşluk Oranı	0,990

Tekil kazık ve kazıklı radyenin deneysel olarak düşey yükleme, zeminin rölatif sıkılığının (D_{rkum}) 0,35, 0,50 ve 0,65 olduğu 3 farklı durumda gerçekleştirilmiştir. Sonrasında, elde edilen deney verileri yapılan sayısal analizler ile kıyaslanmıştır. Sayısal analizlerde zemin ortamı ile tekil kazıklar ve kazıklı radye sisteminin radye ve

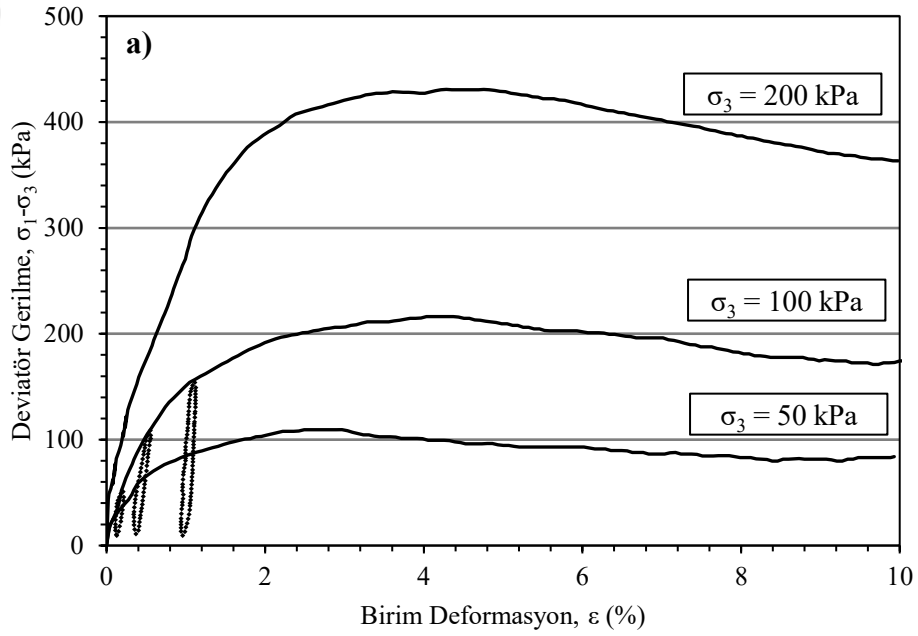
kazıklarının modellenmesi gerekmektedir. Buna göre, her malzeme için gerekli ve uygun bünye modelinin kullanılması kararlaştırılmıştır. Zemin ortamı için pekleşen zemin modeli kullanılmıştır. Pekleşen zemin modeli için zeminin sekant modülü ($E_{50,ref}$), boşaltma - yeniden yükleme modülü ($E_{ur,ref}$), içsel sürtünme açısı (ϕ) ve kohezyon (c) gibi dayanım ve gerilme-birim deformasyon davranışı özelliklerinin belirlenmesi gerekmektedir. Zeminin bu özelliklerinin belirlenebilmesi için en uygun geleneksel geoteknik deneyi olarak üç eksenli basınç deneyleri (Şekil 3.10) yapılmıştır. Ayrıca ödometrik modül ($E_{oed,ref}$) pekleşen zemin modelinde kullanılmakta olup, ödometre deneyiyle belirlenmiştir. Gerilmeyle beraber rijitliğin değişimini gösteren bir katsayı olan m_r de pekleşen zemin modelinde dikkate alınan başka bir zemin özelliğidir. Bu değer de ödometre deneyleri ile bulunmuştur.

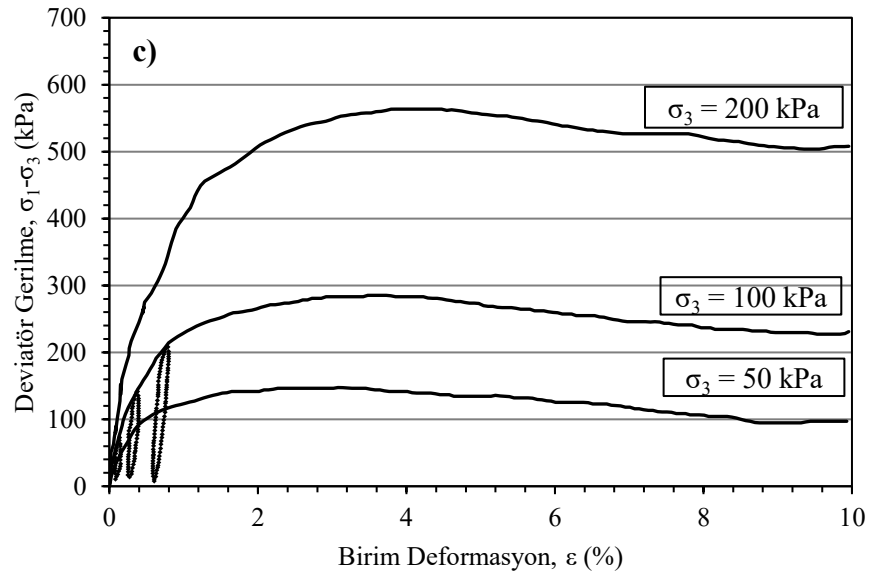
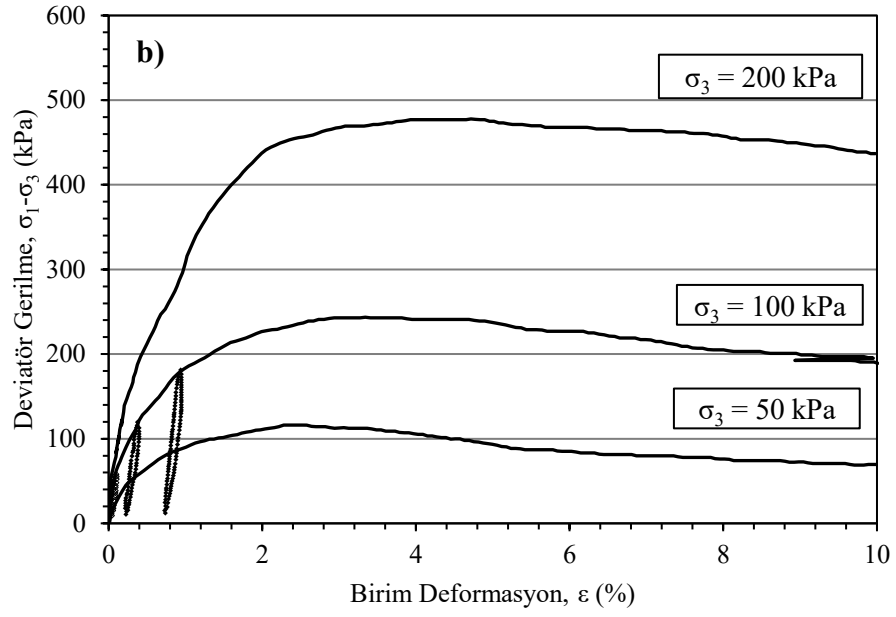
Üç eksenli basınç deneyi numuneleri, deneyin gerçekleştirildiği yerde çapı 50 mm ve boyu 100 mm olan ayrılabilen kalıpta uygun kalınlıkta membran kullanılarak hazırlanmıştır. Numune hazırlama aşamasında, istenilen sıkılığı elde edebilmek için öncelikle pek çok deneme yanılma yapılmıştır. Numune yerleştirme aşamasında vakum uygulanmıştır. Kalıba doldurulan numunelerin üstüne yerleştirilen bir başlık ile ayrıca ikinci bir vakum uygulanmıştır. Ayrılabilen kalıp ikiye ayrılmış ve üst başlıkta, hücre basıncı verilene kadar vakum uygulanmaya devam edilmiştir. Üç eksenli basınç hücresi yerleştirilmiş ve içerisine su doldurularak hücre basıncı verilmiş, bu esnada vakum kaldırılmıştır. Yükleme hızı, %10 birim deformasyon (ϵ) değerine 30 dakikada ulaşılacak şekilde ayarlanmıştır. Deneyler 50, 100 ve 200 kPa hücre basınçları ile gerçekleştirilmiştir. Burada, 100 kPa hücre basıncındaki deney sonuçlarından E_{50} ve E_{ur} elde edilmiştir. Zeminin kayma mukavemeti parametrelerinden olan içsel sürtünme açısı (ϕ) 3 hücre basıncından elde edilen sonuçlara göre belirlenmiştir. Üç eksenli basınç deney sonuçlarına göre (Şekil 3.11) 100 kPa hücre basıncında pekleşen zemin modelinde kullanılmak üzere $D_{rkum} = 0,35$ için $E_{50,ref}$ değeri 19200 kN/m² ve $E_{ur,ref}$ değeri 58300 kN/m², $D_{rkum} = 0,50$ için $E_{50,ref}$ değeri 26600 kN/m² ve $E_{ur,ref}$ değeri 82400 kN/m², $D_{rkum} = 0,65$ için $E_{50,ref}$ değeri 36200 kN/m² ve $E_{ur,ref}$ değeri 115300 kN/m² olmuştur. Üç eksenli basınç deneylerindeki büyük asal gerilme (σ_1) ve küçük asal gerilme (σ_3) değerlerine göre çizilen Mohr daireleri (Şekil 3.12) ile ϕ değeri $D_{rkum} = 0,35$ için 31,32°, $D_{rkum} = 0,50$ için 33,17° ve $D_{rkum} = 0,65$ için 35,86° olarak bulunmuştur. Üç eksenli basınç deneylerinden elde edilen deviatör gerilme ($\sigma_1 - \sigma_3$) – birim deformasyon (ϵ) grafikleri incelendiğinde, beklendiği gibi, hücre basıncı arttığında yenilmenin daha yüksek gerilme seviyelerinde gerçekleştiği ve hücre basınçları azaldıkça deformasyon artışıyla beraber gerilmenin

değişmediği (kalıcı) bölgenin belirgin hale geldiği gözlenmiştir. Yine beklendiği gibi D_{rkum} değerinin artışıyla beraber zeminin kayma mukavemetinde ve rijitliğinde kayda değer bir artış meydana gelmiştir.

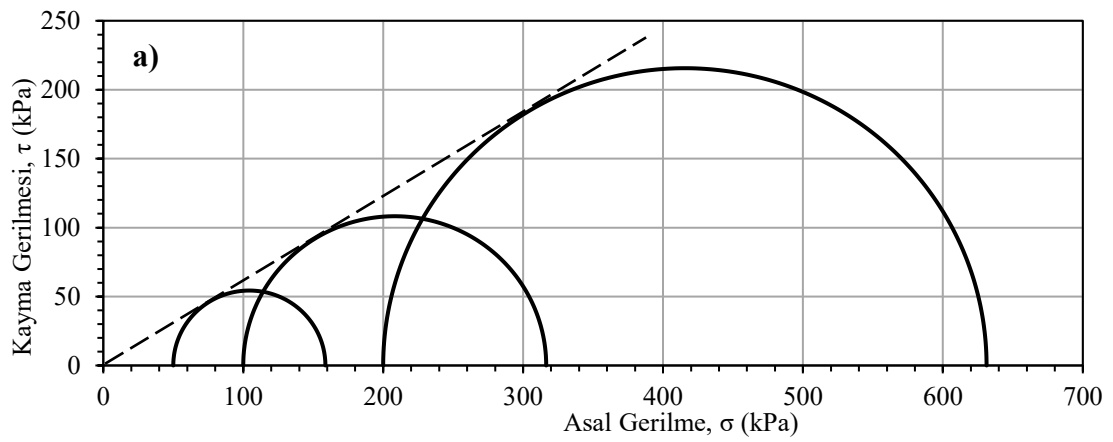


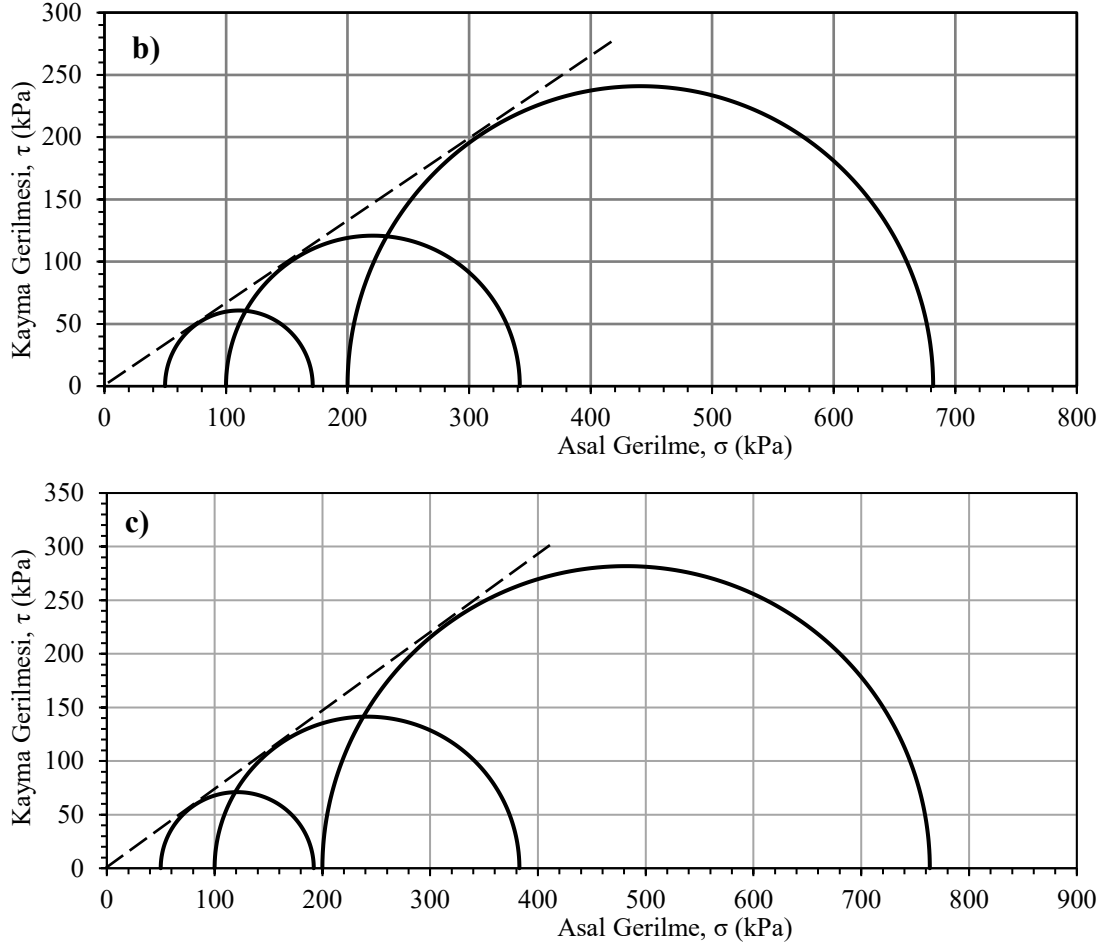
Şekil 3.10. Üç eksenli basınç deneyi





Şekil 3.11. Üç eksenli basınç deneyi sonuçları: a) $D_{rkum} = 0,35$, b) $D_{rkum} = 0,50$, c) $D_{rkum} = 0,65$

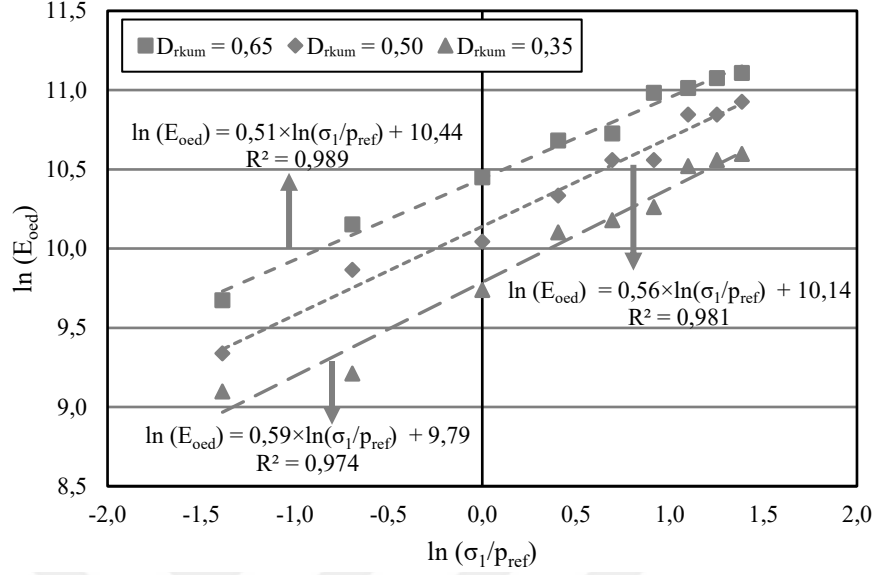




Şekil 3.12. Mohr daireleri ve yenilme zarfları: a) $D_{rkum} = 0,35$, b) $D_{rkum} = 0,50$, c) $D_{rkum} = 0,65$

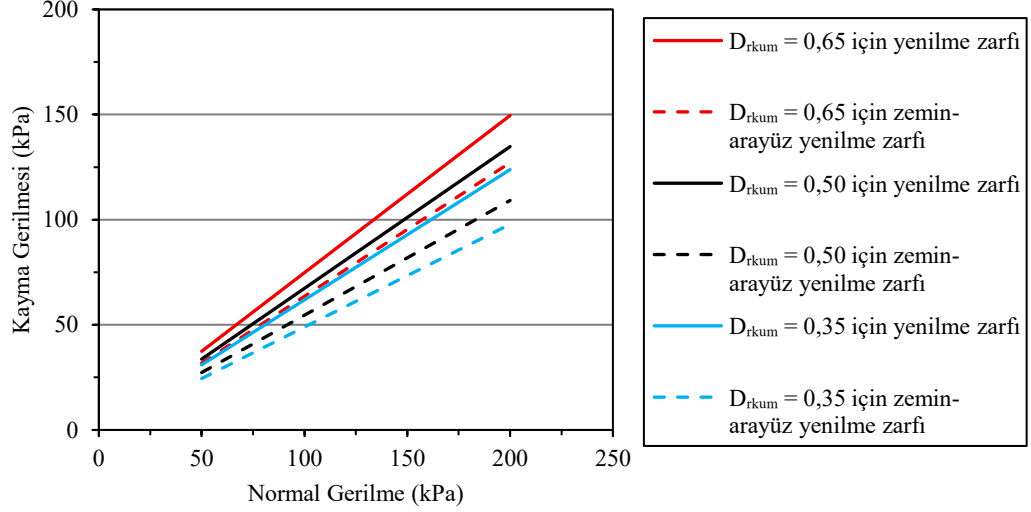
Ödometre deneyi numuneleri 50 mm çapında ve 20 mm boyundaki ödometre kalıplarında istenilen sıklıklarda kuru olarak hazırlanmış ve 25 kPa'dan 400 kPa gerilme seviyesine kadar 50 kPa kademelerle (25 kPa yüklemeden sonra 50-100-150 kPa... şeklinde yükleme) gerilmeler artırılarak kademeli yükleme yapılmıştır. Ödometre deneyleri ile m_r değerleri Eşitlik 3.1'in doğal logaritma tabanında dönüştürülmesiyle bulunmuştur (kohezyonun sıfır olduğu durumda). Buna göre her yükleme kademesindeki ödometrik modül (E_{oed}) değerleri gerilme farkının deformasyon farkına oranlanması ile elde edilmiştir. E_{oed} değerleri için doğal logaritma tabanında çizilmiş Şekil 3.13'te verilen grafikler ile m_r değerleri belirlenmiştir. Grafikte gerilme oranlarının katsayısı m_r değerini ve sabit sayı $E_{oed,ref}$ değerinin doğal logaritma tabanındaki karşılığını göstermektedir. Buna göre m_r 0,59, 0,56 ve 0,51 olarak D_{rkum} 'un sırasıyla 0,35, 0,50 ve 0,65 değerleri için elde edilmiştir. $E_{oed,ref}$ değerleri D_{rkum} değerinin 0,35, 0,50 ve 0,65 olduğu durumlar için sırasıyla 17900, 25300 ve 34200 kN/m³ olarak elde edilmiştir.

$$E_{\text{oed}} = E_{\text{oed,ref}} \left(\frac{\sigma_1}{p_{\text{ref}}} \right)^{m_r} \quad (3.1)$$



Şekil 3.13. Üç eksenli basınç deneyi

Sayısal analizlerde Plaxis 3D yazılımında, GGH harç ve çelik ile kum zemin arasındaki sürtünmenin göstergesi olan R_{inter} değeri kesme kutusu deneyleri ile belirlenmiştir. Bu deneylerden elde edilen arayüz sürtünme açısının tanjantının içsel sürtünme açısının tanjantına oranı R_{inter} olarak belirlenmektedir. Buna göre kazık imalatında kullanılan optimum GGH harç ve radye olarak kullanılan çelik plakalar üç farklı $D_{\text{şkum}}$ için pürüzlendirilmiştir. Pürüzlendirme özel bir epoksi ile öncelikle yüzeylerin yapışkan hale getirilmesi ve kumun uygun bir şekilde bu pürüzlü yüzeye yapıştırılması şeklinde gerçekleştirilmiştir. Kesme kutusu deney aletinde önce kum zeminin 0,2 mm/dk hızla deplasman uygulanarak içsel sürtünme açısı belirlenmiştir. R_{inter} değeri belirlemek için önce kesme kutusu deney kalıbının ayrılabilen alt parçası yerine kesme kutusu deney cihazına uygun boyutlarda üretilmiş pürüzlü GGH harç ve uygun boyutlarda imal edilmiş pürüzlü çelik plaka kullanılmıştır. Üst plakanın içine yine üç farklı sıklıkta kum yerleştirilmiş ve 0,2 mm/dk hızla deneyler gerçekleştirilmiştir. GGH harç ve çelik plakanın yüzeyine özel epoksi sürülmüş olduğundan harç ve çelik plakanın R_{inter} değerleri birbirine çok yakın olmuş; $D_{\text{şkum}}$ değerinin 0,35, 0,50 ve 0,65 değerleri için R_{inter} değerleri hem GGH harç hem de çelik plaka için 0,79, 0,81 ve 0,85 olarak Şekil 3.14'ten elde edilmiştir.



Şekil 3.14. R_{inter} değerinin belirlenmesi için yapılan kesme kutusu deney sonuçları

3.2. GGH Performansının İncelenmesi

GGH bileşenleri ile GGH oluşturabilmesi ve performansının incelenebilmesi için deneysel tasarım yöntemlerinden olan kesin eleme tasarımı (KET) ve merkezi kompozit tasarım (MKT) kullanılmıştır. KET ile birçok değişkenin GGH performansına etkisi genel olarak araştırılarak değişken sayısı azaltılmıştır. KET yöntemi, değişkenlerin elenmesi amacıyla oluşturulmuştur. MKT’de KET sonucunda belirlenen değişkenlere göre daha ayrıntılı bir tasarım oluşturulmuş, GGH performansı daha detaylı incelenmiş ve optimizasyon çalışması yapılmıştır.

3.2.1. KET oluşturulması ve değişkenlerin belirlenmesi

KET, bir sonuç üzerinde birden çok değişkenin etkili olduğu ve bu değişken sayısının da çok fazla olması durumunda tercih edilebilen bir tasarım yöntemidir (Montgomery, 2019). KET kullanılmasıdaki asıl amaç, ilgili sonuç üzerinde etkili olan girdi değişkenlerinden en etkili olanlarını ayıklamak ve seçmektir. Literatür araştırmaları neticesinde, bu tez çalışmasında kullanılan malzemeler de dikkate alınarak; YFC/ÖM, SD/ÖM, SH molaritesi, SS/SH, AÇ/ÖM ve GDBA/ÖM oranı olmak üzere 6 farklı değişkenin GGH performansını belirlemede etkili olduğu kararlaştırılmıştır. Yapılan deneyler ve kısıtlı malzeme miktarları göz önünde bulundurulduğunda, bu değişkenlerin tümü ile MKT oluşturmak, çok fazla sayıda deney yapılmasına neden olacaktır ki bu ekonomik bir çözüm olmamaktadır. Bu nedenle KET ile GGH performansı üzerinde,

diğerlerine göre daha az etkili olan girdi değişkenleri elenmiştir. Toplamda 6 farklı girdi değişkeni ve bunların eleme esnasında dikkate alınacak seviyeleri (değerleri) ile oluşturulan KET Çizelge 3.4'te verilmiştir. Çizelgelerdeki tüm oranlar kütleye göre dikkate alınmıştır. Çizelgede dikkat edildiği üzere, her değişkenin 3 seviyesi mevcuttur. Literatür araştırması sonucunda bu seviyelerin kullanılması uygun görülmüştür. Bu 3 seviyeden 2 tanesi alt ve üst sınırları, 1 tanesi de merkez değeri göstermektedir. Merkez değer varlığı, klasik eleme tasarımlarından farklı olarak, KET'in ikinci dereceden terimlerin etkisini de belirlemede kullanılabileceğini ortaya koymaktadır. Yine de ikinci dereceden terimlerin etkisinin KET ile belirlenmesinde sakıncalar mevcuttur. Bu nedenle KET'in sadece en etkili değişkenlerin tespitinde kullanılması daha uygun olmaktadır.

GGH'nin genel performansı çoğunlukla basınç dayanımı ile paralellik göstermektedir. Bu nedenle, KET için sadece 7 gün kür sonundaki basınç dayanımları dikkate alınmış ve varyans analizi (ANOVA) yapılmıştır. Ayrıca işlenebilirlik özelliği olarak yayılma değerleri performans değerlendirmesinde incelenmiştir. Böylece, girdi değişkenlerinin sonuçlara etki dereceleri istatistiksel anlamlılık çerçevesinde Araştırma Sonuçları ve Tartışma bölümünde incelenmiştir. Literatür bilgileri (BS EN 1015-11, 2019; Reig ve diğ., 2022) ve homojen karışım elde edilebilmesi için gerekli kıvamın sağlanabilmesi durumu dikkate alınarak, KET ile üretilecek her karışım için yayılma tablası deneyleri sonucunda yaklaşık olarak 17 cm yayılma değerine karşılık gelecek İS miktarının belirlenmesi ve buna göre her karışım için hesaplanacak İS/ÖM oranının basınç deneyi numunelerinin üretilmesinde kullanılması uygun görülmüştür. Bu yayılma değerinde GGH kıvamının hem yeterli akıcılığı sağlayabildiği hem de homojen bir karışım elde edilmesine imkan verdiği tespit edilmiştir. Böylece KET'teki tüm karışımlar için benzer ve yeterli akışkanlığı sağlayacak kıvamda numune üretilmesinin mümkün olacağı görülmüştür. Bu amaçla, ASTM C1437 (2020) prosedürüne uygun olarak yayılma tablası deneyleri en az 3 farklı kıvam için yayılma değeri elde edilecek ve 17 cm yayılma değeri bu değerler arasında enterpolasyon yapılarak bulunacak şekilde farklı İS/ÖM oranlarında numuneler üzerinde gerçekleştirilmiştir. Yayılma tablası deneylerinden elde edilen 17 cm yayılma değerine karşılık gelen İS/ÖM oranları Çizelge 3.4'teki değişkenlerle beraber 5×5×5 cm boyutlarındaki basınç deneyi numunelerini oluşturmak için dikkate alınmıştır. Oluşturulan numunelerde 7 gün oda koşullarında kür sonunda ASTM C109 (2021) kriterleri dikkate alınarak basınç deneyleri yapılmıştır. Uygun olan girdi değişkenleri MKT oluşturulması için seçilmiştir.

Çizelge 3.4. Toplam 6 değişkenden oluşan KET tablosu

Karışım	SD/ÖM	YFC/ÖM	SS/SH	SH Molaritesi	AÇ/ÖM	GDBA/ÖM
KET1	0,25	0,4	2,50	14	1,0	3,5
KET2	0,25	0,2	1,00	10	0,6	2,5
KET3	0,35	0,3	2,50	10	0,6	3,5
KET4	0,15	0,3	1,00	14	1,0	2,5
KET5	0,35	0,4	1,75	14	0,6	2,5
KET6	0,15	0,2	1,75	10	1,0	3,5
KET7	0,35	0,2	2,50	12	1,0	2,5
KET8	0,15	0,4	1,00	12	0,6	3,5
KET9	0,35	0,2	1,00	14	0,8	3,5
KET10	0,15	0,4	2,50	10	0,8	2,5
KET11	0,35	0,4	1,00	10	1,0	3,0
KET12	0,15	0,2	2,50	14	0,6	3,0
KET13	0,25	0,3	1,75	12	0,8	3,0

3.2.2. MKT oluşturulması ve performans değerlendirmesi

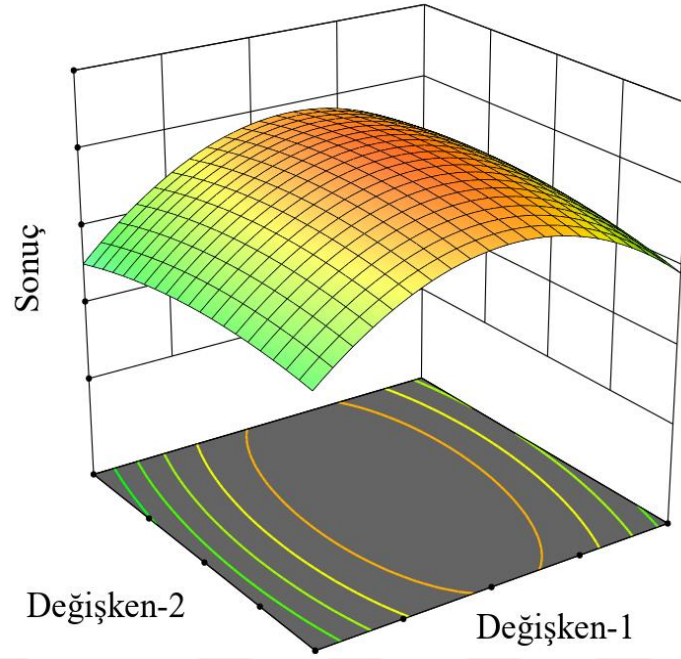
Belirli sonuçlar üzerindeki birçok değişkenin etkisini araştırmak, ayrıca regresyon modelini oluşturmak ve analiz etmek için kullanılan YYY (Box ve Wilson, 1951) bir deneysel tasarım yöntemi olup, günümüzde makine çalışma prensiplerinden tarımda verimliliğe kadar geniş bir perspektifte uygulama alanı bulmaktadır. Bu yöntem ile istatistiksel analiz de yapılarak bir sonuca etki eden değişkenlerin etki dereceleri belirlenebilmekte, optimizasyon çalışmaları yapılabilmektedir. Ana etki terimlerinin yanı sıra, ikinci dereceden etki terimlerinin ve ikili etkileşim terimlerinin sonuçlar üzerinde etkisini belirlemekte kullanılabilen YYY ile sonuçlar ile girdi değişkenleri arasındaki ilişkiler genel olarak grafiklerle yüzey olarak gösterilmektedir (Şekil 3.15). Bu yüzeyler farklı şekillerde olabildiği gibi, iç bükey veya dış bükey şeklinde olursa optimum noktalar elde edilmiş olmaktadır. Şeklin iç bükey, dış bükey, eyer vb. olması ise üzerinde araştırma yapılan konunun doğasına bağlı olmaktadır.

YYY ile optimizasyon yapılabilmesi için sonuçlar ve girdi değişkenleri arasındaki ilişki istatistiksel analizler yardımıyla kurulan modeller ile incelenmektedir. YYY için tutarlı bir model, sonuçlar ve girdi değişkenleri arasında istatistiksel olarak anlamlı bir ilişkinin varlığını göstermektedir. YYY’de model, en basit anlamında, sonuçlar ve girdi değişkenleri arasında oluşturulabilecek; ana etki terimlerini, ikinci dereceden etki terimlerini ve ikili etkileşim terimlerini içeren Eşitlik 3.2 ile gösterilmektedir. Eşitlikte;

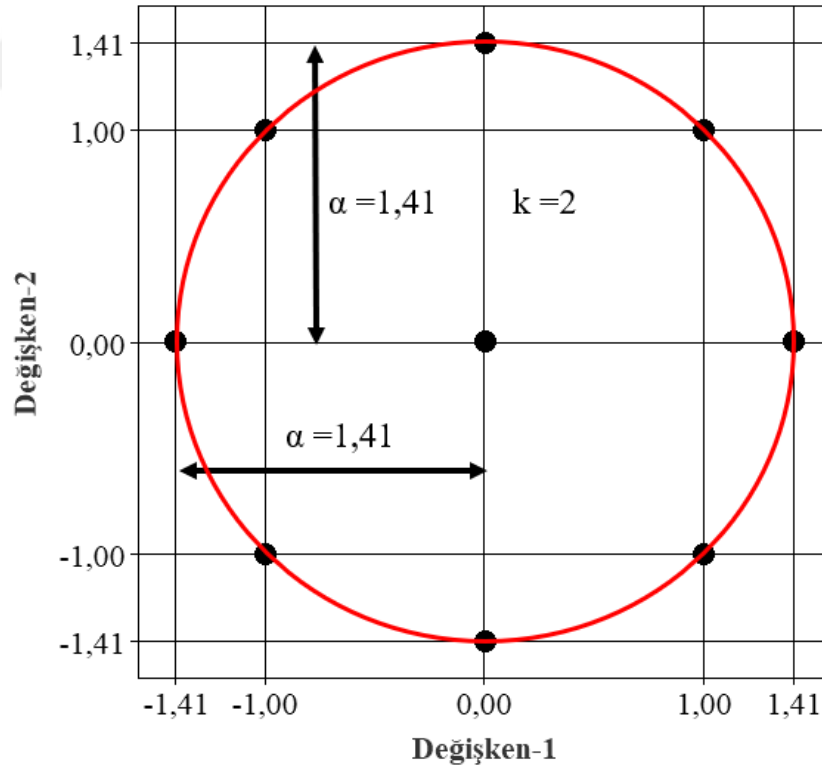
β_0 sabiti, x değişkenleri ve y sonucu göstermektedir. Eşitlik 3.2 model formülü olmaktadır. Buna göre, sonuç ve girdi değişkenleri arasındaki ilişkinin istatistik bilimi yardımıyla ve kabul edilen yöntemler ile incelenmesi gerekmektedir. İstatistiksel olarak anlamlılık, en yaygın kullanılan yöntemlerden olan ANOVA ile belirlenebilmektedir. ANOVA ile elde edilen F değerleri, p değerleri ve determinasyon katsayısı (R^2) istatistiksel anlamlılığı belirlemede kullanılmaktadır.

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_{0i} x_i + \sum_{i < j} \sum \beta_{ij} x_i x_j + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i^2 + \varepsilon_{hata} \quad (3.2)$$

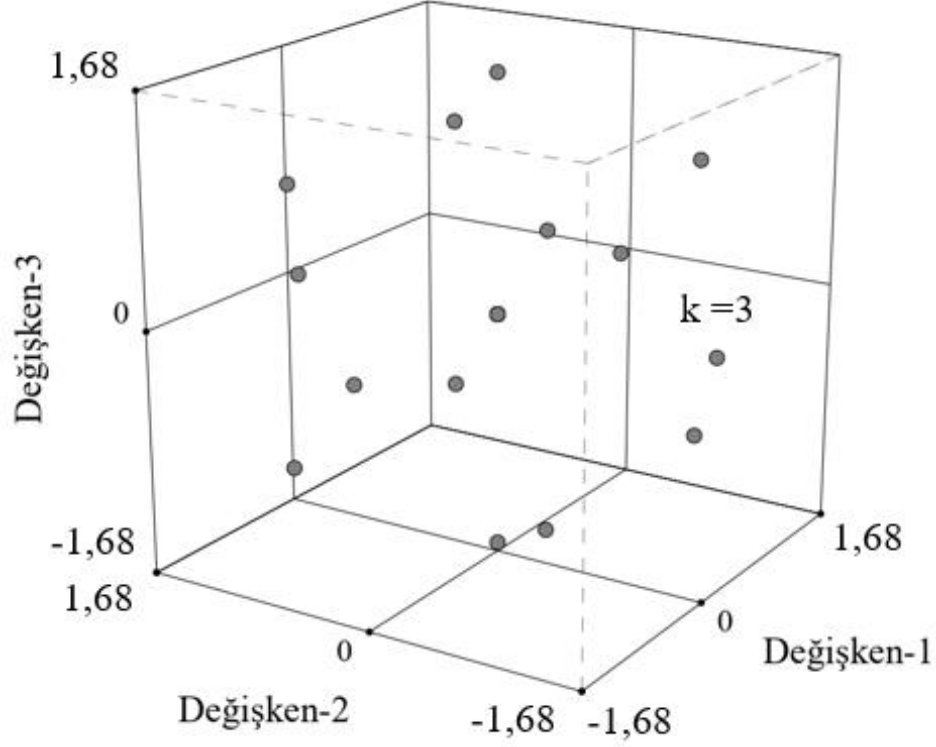
YYY'nin farklı türleri olup, en yaygını olan MKT'nin bu tez çalışması kapsamında seçilmesi kararlaştırılmıştır. MKT ile oluşturulan tasarımın grafik olarak gösterimi Şekil 3.16'da verilmiştir. Buna göre, tasarımdaki her girdi değişkeni için 5 seviye (yani her değişken için 5 farklı değer) belirlenmektedir. Bu 5 seviyeden 1 tanesi merkez nokta, 2 tanesi eksenel nokta ve 2 tanesi de faktöriyel nokta (köşe noktası/kübik nokta) olmaktadır. Faktöriyel noktalar ana etki terimlerinin, merkez nokta ikinci dereceden etki terimlerinin ve eksenel noktalar da ikili etkileşim terimlerinin sonuçlar üzerindeki etkisinin ayırt edilebilmesini/belirlenebilmesini sağlamaktadır. Merkez nokta, faktöriyel noktaların ortasında olup, merkez nokta ile eksenel noktalar arasındaki uzaklık α katsayısı ile belirlenmektedir. Bu katsayı, bir küp ve küre oluşturacak şekilde seçilebilir. Özellikle eksenel noktaların seçimi, tüm eksenel noktaların tahmin edilen varyansının sabit olmasını sağlamak için ortogonal ve döndürülebilirliğin sağlanması açısından önemli olmaktadır (Montgomery, 2019). Döndürülebilirlik ise α katsayısının değerine doğrudan bağlıdır. Merkez nokta ile eksenel noktalar arasındaki uzaklık olan α katsayısı, girdi değişkeni sayısına (k) bağlı olarak $(2^k)^{1/4}$ şeklinde seçildiğinde döndürülebilirliğin şartı sağlanmış olmaktadır. Tez çalışması kapsamında döndürülebilir bir tasarım alanı oluşturabilecek α katsayısı seçimi uygun görülmüştür. Bu durumda, deneysel tasarımı hazırlayan araştırmacı faktöriyel noktaları çalışma alanının doğasını ve sınırlarını dikkate alarak belirlemelidir. Geriye kalan noktalar MKT mantığı çerçevesinde belirlenmiştir. Şekil 3.17'de 3 boyutlu ortogonal ve döndürülebilir bir tasarım bölgesi gösterilmiştir.



Şekil 3.15. YYY'de değişken ve sonuçlar arasındaki ilişki için yüzey grafiği örneği



Şekil 3.16. İki girdi değişkenli MKT için tasarım bölgesi



Şekil 3.17. Üç girdi değişkenli MKT için tasarım bölgesi

KET'e göre belirlenen karışımlar üzerinde yapılan deneyler sonucunda SD/ÖM, YFC/ÖM, AÇ/ÖM ve GDBA/Karışım oranları bağımsız değişken (girdi değişkeni) olarak kabul edilmiş ve 27 karışımdan oluşan MKT tablosu hazırlanmıştır (Çizelge 3.5). SD/ÖM için 0,15-0,35, YFC/ÖM için 0,20-0,40, AÇ/ÖM için 0,90-1,30 ve GDBA/Karışım için 0,500-0,600 değerleri sınır seviyeleri olarak kabul edilmiştir. KET ile yapılan değerlendirmede GDBA/ÖM olan değişken MKT'de GDBA/Karışım olarak değiştirilmiştir. MKT'de ÖM ile ilgili birçok değişken olmasının ANOVA sonuçlarına göre sağlıklı yorum yapılabilmesine yardımcı olması amacıyla bu değişiklik yapılmıştır. Ayrıca, KET ile yapılan değerlendirmenin aksine İS/ÖM belirleme aşaması yerine İS/ÖM oranı 0,10 değerine sabitlenmiştir. Bunun nedeni, MKT'de bir değişken olmamasına rağmen kıvamı düzenlemek için olsa bile İS/ÖM oranlarının her karışımda değişmesinin sonuçlar üzerinde esas değişkenlerin etkilerini yorumlamada ve tutarlı bir istatistiksel model oluşturmada sağlıklı bir kanıya varmayı zorlaştıracak olması ihtimalidir. Yani, tasarım tablosunda değişken olarak değerlendirilmeyen İS/ÖM oranının sonuçlar üzerinde etkisinin yüksek olması ihtimali nedeniyle İS/ÖM oranının sabit olmasının da doğru olacağı anlaşılmıştır. Bu durumda yeterli işlenebilirliğin sağlanabilmesi için AÇ/ÖM oranının KET ile yapılan değerlendirmede seçilmiş olan 0,6-1,0 arasındaki

seviyelerinin Çizelge 3.5’te gösterildiği gibi 0,9-1,3 arasında olacak şekilde düzenlenmesi gerekmiştir. SS/SH oranının MKT’de 2,5 değerine sabitlenmesinin istenilen işlenebilirlik için gerekli olduğu ve geopolimerin yeterli mekanik performans gösterebilmesi için SH molaritesinin 12 M olmasının uygun olduğu belirlenmiştir. SS/SH oranı ve SH molaritesinin sabit bir değer seçilmesinin bir başka nedeni de agregası ve bağlayıcısı bütünüyle geri dönüşüm veya atık malzemelerden üretilecek bir harcın performansının bu malzemelerle (GDBA, UK, YFC ve SD) ilişkili değişkenler ile incelenmek istenmesidir.

Çizelge 3.5. Toplam 27 değişkenden oluşan MKT tablosu

Karışım	SD/ÖM	YFC/ÖM	AÇ/ÖM	GDBA/Karışım
MKT1	0,20	0,25	1,0	0,525
MKT2	0,30	0,25	1,0	0,525
MKT3	0,20	0,35	1,0	0,525
MKT4	0,30	0,35	1,0	0,525
MKT5	0,20	0,25	1,2	0,525
MKT6	0,30	0,25	1,2	0,525
MKT7	0,20	0,35	1,2	0,525
MKT8	0,30	0,35	1,2	0,525
MKT9	0,20	0,25	1,0	0,575
MKT10	0,30	0,25	1,0	0,575
MKT11	0,20	0,35	1,0	0,575
MKT12	0,30	0,35	1,0	0,575
MKT13	0,20	0,25	1,2	0,575
MKT14	0,30	0,25	1,2	0,575
MKT15	0,20	0,35	1,2	0,575
MKT16	0,30	0,35	1,2	0,575
MKT17	0,15	0,30	1,1	0,550
MKT18	0,35	0,30	1,1	0,550
MKT19	0,25	0,20	1,1	0,550
MKT20	0,25	0,40	1,1	0,550
MKT21	0,25	0,30	0,9	0,550
MKT22	0,25	0,30	1,3	0,550
MKT23	0,25	0,30	1,1	0,500
MKT24	0,25	0,30	1,1	0,600
MKT25	0,25	0,30	1,1	0,550
MKT26	0,25	0,30	1,1	0,550
MKT27	0,25	0,30	1,1	0,550

3.2.3. GGH numunelerinin oluşturulması

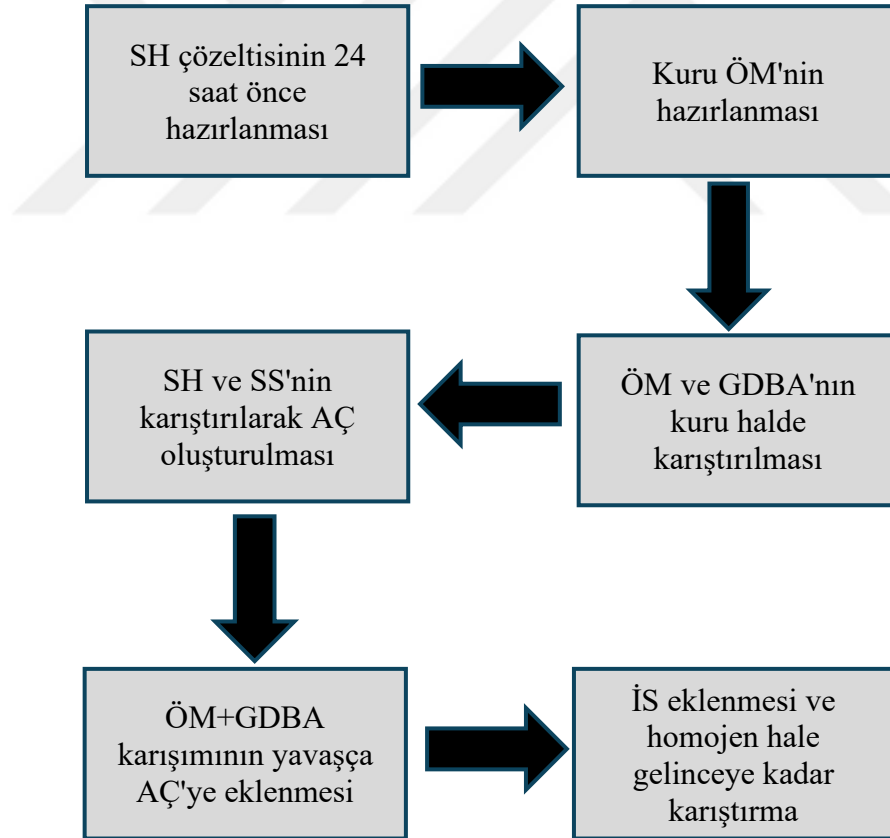
GGH numunelerinin oluşturulması aşamasını gösteren akış şeması Şekil 3.18’de verilmiştir. Numune oluşturulması kısaca şu aşamalardan meydana gelmektedir:

1. SH çözeltisinin stabil hale gelmesi için belli bir süre geçmesi gerektiğinden, 24 saat önceden istenilen molaritede SH çözeltisi hazırlanmış ve kuru malzeme karışımına eklenmesine kadar bekletilmiştir.

2. ÖM’yi oluşturan malzemeler (UK+YFC+SD) ile GDBA kuru halde homojen hale gelene kadar karıştırılmıştır.

3. SS ve SH çözeltisi karıştırılmış, böylece AÇ hazırlanmıştır.

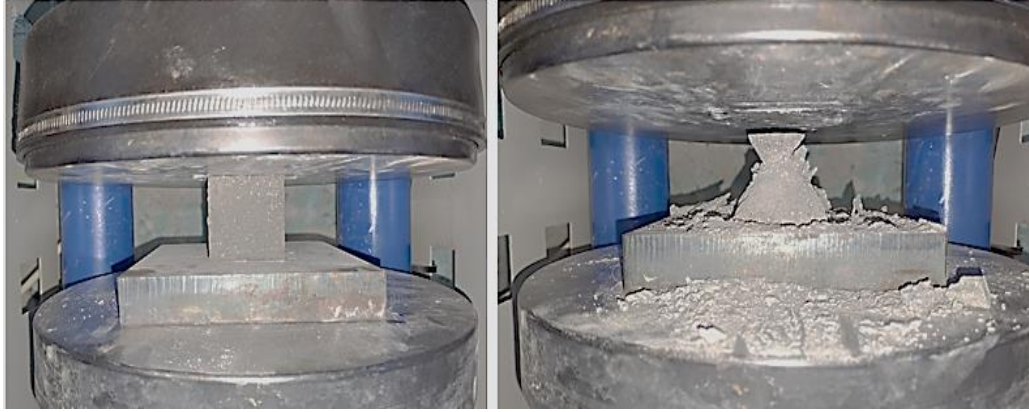
4. ÖM ve GDBA karışımı AÇ’ye yavaşça eklenerek homojen hale gelinceye kadar karıştırılmıştır. Bu aşamada, gerekli miktarda İS eklenmiştir. Sonrasında ilgili deneyler için numuneler ilgili bölümlerde anlatılacağı şekilde hazırlanmıştır.



Şekil 3.18. GGH numunelerinin oluşturulma aşamaları

3.2.4. Basınç ve eğilme dayanımı deneyleri

GGH'nin sertleşmiş harç özelliklerinden olan basınç ve eğilme dayanımı değerleri ile mekanik performansı incelenmiştir. Basınç dayanımı için ASTM C109 (2020) ve eğilme dayanımı için ASTM C348 (2021) standartları dikkate alınmıştır. Bölüm 3.2.3'te açıklanan numune hazırlama yöntemi sonunda oluşturulan numuneler basınç dayanımı deneyleri (Şekil 3.19) için $5 \times 5 \times 5$ cm ve eğilme dayanımı deneyleri (Şekil 3.20) için $4 \times 4 \times 16$ cm kalıplara dökülmüş, sarsma ve sıkıştırma ile yerleştirilmiştir. Yaklaşık 2 gün sonra numuneler kalıplardan çıkarılmış ve oda koşullarında deney yapılacak güne kadar kür edilmiştir. Basınç ve eğilme dayanımı deneylerinde sırasıyla yükleme hızı 54 kN/dk ve 2,5 kN/dk olarak seçilmiştir. KET için sadece oda koşullarında 7 gün kür sonunda basınç dayanımı deneyleri yapılmıştır. MKT karışım numunelerinde, oda koşullarında 7 ve 28 günlük kür sonunda basınç ve eğilme deneyleri yapılmıştır.



Şekil 3.19. Basınç dayanımı deneyinin yapılması



Şekil 3.20. Eğilme dayanımı deneyinin yapılması

3.2.5. GGH'nin dayanıklılığının değerlendirilmesi

Geopolimer harcın dayanıklılık özelliklerini incelemek amacıyla, MKT tablosuna göre hazırlanan numuneler oda koşullarında 28 gün kür edilmiştir. Kür işlemi sonunda numuneler 1, 2, 3, 4 ve 6 ay %5 NaCl ve %5 MgSO₄ çözeltilerinde ayrı ayrı bekletilmiştir (Şekil 3.21). Çözeltiler uygun pH değerlerinde hazırlanmış ve bekletilme süresi boyunca bu pH değerlerinin korunmasına dikkat edilmiştir. Her bir bekletme süresi sonunda çözeltilerden çıkarılan numunelerin MgSO₄ ve NaCl çözeltilerine karşı dayanıklılığının değerlendirilebilmesi için kütle kayıpları belirlenmiş, basınç ve eğilme dayanımı deneyleri yapılmıştır. Böylece GGH'nin zararlı ortam şartları etkisi altındaki basınç ve eğilme dayanımlarının zamanla değişimi ve performansı değerlendirilmiştir.

Sodyum Klorür Çözeltisinde Bekletilen Numuneler



Magnezyum Sülfat Çözeltisinde Bekletilen Numuneler



Şekil 3.21. Çözeltilerde bekletilen numuneler

3.2.6. GGH'nin işlenebilirlik ve priz süresi belirleme deneyleri

GGH'nin taze harç özelliklerinden olan işlenebilirlik özelliği yayılma değerleri ile incelenmiştir. Yayılma değerleri yayılma tablası deneyi (ASTM C1437, 2020) ile belirlenmiştir (Şekil 3.22). Bu deneyde hazırlanan harç zaman geçmeden yayılma tablasına bir kesik koni ile yerleştirilir. Koni kaldırıldıktan sonra tabla 2,5 cm yükseklikten 15 defa düşürülür ve bu işlemin sonunda harcın yayılma çapı ölçülür. Priz başlangıç süreleri ASTM C807'ye (2021) göre belirlenmiştir (Şekil 3.23). Priz başlangıç süresi, modifiye Vicat deney aletinde harç numunelerinin karıştırılmaya başlanmasından Vicat iğnesinin 10 mm'den daha az battığı ana kadar geçen süre olarak belirlenir.



Şekil 3.22. Yayılma tablası deneyi



Şekil 3.23. Priz süresi belirleme deneyi

3.2.7. Optimum GGH belirlenmesi

Dayanım, işlenebilirlik ve priz başlangıcı dikkate alınarak Design Expert yazılımı aracılığıyla optimum GGH belirlenmiştir. Yazılımda, birçok sonucun aynı anda optimizasyonu için Derringer ve Suich (1980) tarafından geliştirilen istenirlik fonksiyonu (desirability function) yöntemi ile tüm sonuçlar için hedeflere uygun olarak bir amaç fonksiyonu oluşturulmaktadır. Amaç fonksiyonu optimizasyon yapılacak formül olmaktadır. Amaç fonksiyonunun optimum noktaları sayısal, sezgisel, meta sezgisel vb. optimizasyon yöntemleriyle belirlenebilmektedir. Design Expert yazılımında Nelder ve Mead (1965) tarafından geliştirilen ve aslında en küçük nokta bulmak için ortaya konulmuş yöntem, amaç fonksiyonunun optimizasyonunda kullanılmaktadır. Bu iki yöntem beraber dikkate alınarak optimizasyon işlemi gerçekleştirilmektedir.

Derringer ve Suich istenirlik fonksiyonu yönteminde, sonuçlar için belirlenen hedeflere göre istenirlik değeri hesaplanır. Bu değer 1 ile sıfır arasında değişir. Değerin 0 olması durumu istenmeyen yani hedeflere ulaşılamadığı ve 1 olması durumu istenen yani hedeflere tam olarak ulaşıldığı durumu göstermektedir. Yöntemin önemli özelliği, birçok sonuç için elde edilen bireysel istenirlik değerlerinin tek bir fonksiyonda birleştirilebilmesi ve genel/toplam istenirlik değeri (D_D) hesaplanmasına imkan vermesidir. Sonuç için belirlenen hedefin en büyük olması (Eşitlik 3.3), en küçük olması (Eşitlik 3.4) ve belirli bir değer olması (Eşitlik 3.5) durumlarına göre 3 farklı biçim söz konusu olmaktadır. Eşitliklerde A_D alt sınır, H_D hedef, U_D üst sınır, y_i sonuç, r_D ve s_D eğim katsayılarıdır. Bu biçimlere göre genel istenirlik fonksiyonu Eşitlik 3.6'da gösterildiği gibi oluşturulur. Eşitlik 3.6'da d_i bireysel istenirlik, w_i her sonucun önem katsayısı ve D_D genel istenirlik fonksiyonudur. Böylece birçok sonuç için genel bir istenirlik fonksiyonu oluşturulmaktadır.

$$d_i = \begin{cases} 0, & y_i < A_D \\ \left(\frac{y_i - A_D}{H_D - A_D} \right)^s, & A_D \leq y_i \leq H_D \\ 0, & y_i > H_D \end{cases} \quad (3.3)$$

$$d_i = \begin{cases} 1, & y_i < H_D \\ \left(\frac{U_D - y_i}{U_D - H_D} \right)^s, & H_D \leq y_i \leq U_D \\ 0, & y_i > U_D \end{cases} \quad (3.4)$$

$$d_i = \begin{cases} 1, & y_i < A_D \text{ veya } y_i > U_D \\ \left(\frac{y_i - A_D}{H_D - A_D}\right)^r, & A_D \leq y_i \leq H_D \\ \left(\frac{U_D - y_i}{U_D - H_D}\right)^s, & H_D < y_i \leq U_D \end{cases} \quad (3.5)$$

$$D_D = \left(\prod_{i=1}^n d_i^{w_i}\right)^{1/\sum w_i} \quad (3.6)$$

Nelder ve Mead optimizasyon yöntemi bir türev bilgisi ve işlemi gerektirmemektedir. Bunun yerine belirli boyutlu uzayda bu boyutun bir fazlası kadar çözüm noktasından oluşan bir simplex (2 boyutlu uzayda üçgen ve 3 boyutlu uzayda bir dört yüzlü gibi) meydana getirilir. Simplex'in her bir noktasında amaç fonksiyonunun değeri hesaplanır. Amaç fonksiyonu değerinin en kötü olduğu (belirlenen hedeften en uzak olduğu) nokta belirlendikten sonra aşağıdaki işlemler gerçekleştirilir:

1. Yansıma: En kötü değerin elde edildiği nokta simplex'in geri kalan noktalarının merkezinden dışa yansıtılır (Eşitlik 3.7).
2. Genişleme: Yansıma noktasında fonksiyon değeri en iyi ise (yansıma başarılı) o yönde ilerlenerek daha iyi bir nokta aranır (Eşitlik 3.8).
3. Dış daralma: Yansıma noktasında fonksiyon değeri ikinci en kötü fonksiyon değerinden daha iyi ise (yansıma orta düzeyde başarılı) mesafe azaltılarak yeni bir adım denenir (Eşitlik 3.9).
4. İç daralma: Yansıma noktasında fonksiyon değeri ikinci en kötü fonksiyon değerinden daha kötü ise (yansıma başarısız) mesafe azaltılarak yeni bir adım denenir (Eşitlik 3.10).
5. Küçültme: Bir değişiklik olmazsa simplex boyutu küçültülür ve aramaya dar bir bölgede tekrar başlanır (Eşitlik 3.11).

Aşağıda yöntemde kullanılan eşitlikler verilmiştir. Bu eşitliklerde x_y , x_m , x_{n+1} , x_g , x_{dd} , x_{id} , x_k , x_{ei} , α_{nm} , γ_{nm} , β_{nm} ve δ_{nm} sırasıyla yansıma noktası, merkez nokta, en kötü nokta, genişleme noktası, dış daralma noktası, iç daralma noktası, küçültme noktası, en iyi nokta, yansıma katsayısı, genişleme katsayısı, daralma katsayısı ve küçültme katsayısıdır. Katsayılar için genel olarak $\alpha_{nm} = 1$, $\gamma_{nm} = 2$, $\beta_{nm} = 0,5$ ve $\delta_{nm} = 0,5$ değerleri sabit olarak seçilir.

$$x_y = x_m + \alpha_{nm}(x_m - x_{n+1}) \quad (3.7)$$

$$x_g = x_m + \gamma_{nm}(x_y - x_m) \quad (3.8)$$

$$x_{dd} = x_m + \beta_{nm}(x_y - x_m) \quad (3.9)$$

$$x_{id} = x_m + \beta_{nm}(x_{n+1} - x_m) \quad (3.10)$$

$$x_k = x_{ei} + \delta_{nm}(x_k - x_{ei}) \quad (3.11)$$

YYY ile optimizasyon sürecinde istenirlik fonksiyonu yönteminde öncelikle her sonuç (tez çalışmasında dayanım, işlenebilirlik ve priz başlangıç süresi) için istatistiksel olarak anlamlı modeller elde edilir. Her sonuç için hedefler belirlenir. Tez çalışması için dayanımın en fazla ve yeterli işlenebilirlik için yayılma değerinin belirli bir değerde olmasının istenmesi hedef belirlemeye örnek verilebilir. Hedefler doğrultusunda her sonuç için bireysel istenirlik fonksiyonları belirlenir. Ağırlıklı geometrik ortalamalara göre fonksiyonlar birleştirilir ve toplam/genel istenirlik fonksiyonu oluşturularak genel/toplam D_D hesaplanır. Bu noktada Nelder ve Mead yöntemi devreye girer ve D_D 'nin en büyük olmasını sağlayan değişken seviyelerini arar. En büyük D_D değerinin elde edildiği değişken seviyeleri optimum nokta olur.

3.2.8. Optimum karışım için GDBA'lı geopolimer beton dayanımının ve dayanıklılığının belirlenmesi

Optimum GGH belirlendikten sonra optimum GGH bileşenlerinin seviyelerinin aynı kalması kaydıyla iri agregasının 2-20 mm arasında tanelere sahip olan GDBA'nın kullanıldığı 15×15×15 cm boyutlarında geopolimer beton numuneleri oluşturulmuştur. Bu betonlarda ince agrega olarak 0,75-2 mm arasında tanelere sahip olan ve GGH üretiminde agrega olan GDBA kullanılmıştır. Bu noktada iri GDBA'nın tüm GDBA içindeki oranı %65 olarak seçilmiştir. Sadece iri GDBA için 20, 16, 12,5, 10, 4,75 ve 2 mm eleklerden geçen yüzdelere sırasıyla %100, %80, %60, %35, %10 ve %0 olarak seçilmiştir. Bu boyutlar da laboratuvar tipi kırıcı ile elde edilmiştir. GDBA'lı geopolimer betonlar, GGH'ye benzer şekilde oluşturulmuş; fakat numune kalıbına yerleştirilirken şişleme ve sarsma işlemleri uygulanmıştır. BS-EN 12390-3 (2019) standardı dikkate alınarak yükleme hızı 0,4 MPa/s olacak şekilde basınç dayanımı deneyi yapılmıştır (Şekil 3.24). Ayrıca 1, 2, 3, 4 ve 6 ay $MgSO_4$ ve $NaCl$ çözeltilerinde bekletilmek üzere basınç dayanımı numuneleri oluşturulmuş ve bekletme süreleri sonunda dayanım deneyleri yapılmıştır.



Şekil 3.24. GDBA'lı geopolimer beton için basınç deneyinin yapılması

3.3. Küçük Ölçekli Model Deneyler ve Sayısal Analizler

Kazıklı radye sisteminin düşey yükleme altındaki davranışının değerlendirilmesinde literatürde hala önemli eksikliklerin olduğu Giriş ve Kaynak Araştırması bölümlerinde açıklanmıştır. Bu konuya açıklık getirmek amacıyla tezde küçük ölçekli model deneyler ve buna uygun olarak sayısal analizler yapılmıştır. Ayrıca tekil kazıklarda da küçük ölçekli model deneyler ve sayısal analizler gerçekleştirilmiştir. Küçük ölçekli model deneyler ve sayısal analizler ile yük-oturma (kazıklı radyede gerilme-oturma) ilişkisi, kazık-radye yük paylaşımı, kazıklarda oluşan aksenal kuvvetler, çevre sürtünmesi ve zeminde meydana gelen gerilmeler incelenmiştir.

3.3.1. Kazıklı radye için Taguchi L9 tasarımı ve tekil kazıklar için tasarım

Küçük ölçekli model deneylerinde tekil kazık ile 4, 6 ve 9 kazıktan oluşan kazıklı radye sistemlerinin düşey yükleme altındaki davranışları incelenmiştir. Deney tankının boyutları ve deney düzeneği dikkate alındığında kazık çapı (D_k) değeri 2,5 cm olarak seçilmiştir. Kazık uzunluğu (L_k)/ D_k oranına bağlı olarak L_k değeri en fazla 62,5 cm olarak belirlenmiş, kazık aksları arası mesafe (s_k) $2,5D_k$ ile $5D_k$ arasında olacak şekilde seçilmiştir. Kum zeminin dayanım özelliklerinin etkisini de araştırabilmek için D_{rkum} değerleri 0,35 ile 0,65 arasında olacak şekilde seçilmiştir. Bu özellikler ile deneysel çalışma için L_k/D_k , s_k , D_{rkum} ve kazık sayısı (N_k) olmak üzere 4 farklı değişken belirlenmiştir. Parametrik bir çalışmada bu tez kapsamında belirlenmiş 4 değişken için

deney sayısı, çalışmanın tamamlanabilmesi için gerçekçi olamayacak kadar fazla olacaktır. Deney sayısını azaltabilmek, kaynaktan ve zamandan tasarruf edebilmek için Taguchi deneysel tasarım yöntemi kullanılmıştır.

Taguchi deneysel tasarım yöntemi birden çok değişkenin etkilediği sonuçlar için, hangi değişkenin daha etkili olduğunu belirlemeye ve değişkenler için optimizasyon işleminin yapılmasına imkan vermektedir (Montgomery, 2019). Taguchi yönteminde ses/gürültü (S/N) oranına göre analizler yapılmaktadır. S/N oranı, optimizasyon sonuçlarının en büyük olması isteniyorsa Eşitlik 3.12 ve en küçük olması isteniyorsa Eşitlik 3.13'e göre belirlenmektedir. Bu eşitliklerde $Y_1, Y_2, \dots, Y_n$ deney sonuçlarını ve n deneyin tekrar sayısını göstermektedir. S/N oranları ve ANOVA'ya göre sonuçlar üzerinde en etkili değişkenler ve bunların etki derecesi belirlenmektedir. Sadece değişkenlerin sonuçlar üzerindeki etkisinin belirlenmesi isteniyorsa S/N değerleri yerine gerçek sonuçların ortalaması kullanılarak ANOVA gerçekleştirilebilmekte ve ana etki grafikleri ile değişkenlerin değişiminin sonuçlar üzerindeki etkisi yorumlanabilmektedir. Tez kapsamında, Çizelge 3.6'da verilen 9 tasarımdan oluşan Taguchi L9 ortogonal tasarımı kullanılmıştır. Tasarımda L_k/D_k , s_k , D_{rkum} ve N_k değişkenlerinin her biri için 3 seviye belirlenmiştir. Buna göre Çizelge 3.6'da gösterilmiş olan L9 Taguchi tasarımı ile düşey yükleme durumunda 9 adet kazıklı radye sistemi için küçük ölçekli model deney gerçekleştirilmiştir. Ayrıca, tekil kazık için s_k bir değişken olamayacağından $3^2=9$ adet durumdan oluşan bir faktöriyel tasarım oluşturulmuş ve düşey yükleme için 9 adet küçük ölçekli model deney gerçekleştirilmiştir (Çizelge 3.7). Tekil kazıklardaki bu tasarımda D_{rkum} değeri 0,35, 0,50 ve 0,65 ve L_k/D_k değeri 15, 20 ve 25 olarak seçilmiştir. Tekil kazıklar için örnek bir adlandırma şu şekildedir: L25Dr65 tasarımında L_k/D_k oranı 25 ve D_{rkum} oranı 0,65 olarak seçilmiştir.

$$S/N = -10 \times \log_{10} \times \left[\left(\frac{1}{Y_1^2} + \frac{1}{Y_2^2} + \dots + \frac{1}{Y_n^2} \right) / n \right] \quad (3.12)$$

$$S/N = -10 \times \log_{10} \times \left[(Y_1^2 + Y_2^2 + \dots + Y_n^2) / n \right] \quad (3.13)$$

Çizelge 3.6. Kazıklı radye sistemlerinin küçük ölçekli model deneyleri için oluşturulmuş Taguchi L9 tasarımı

Tasarım	L_k/D_k	s_k	D_{rkum}	N_k
T1	15	$2,5D_k$	0,35	4
T2	15	$3,5D_k$	0,50	6
T3	15	$5,0D_k$	0,65	9
T4	20	$2,5D_k$	0,50	9
T5	20	$3,5D_k$	0,65	4
T6	20	$5,0D_k$	0,35	6
T7	25	$2,5D_k$	0,65	6
T8	25	$3,5D_k$	0,35	9
T9	25	$5,0D_k$	0,50	4

Çizelge 3.7. Tekil kazıkların küçük ölçekli model deneyleri için oluşturulmuş tasarım

Tasarım	L_k/D_k	Dr_{kum}
L25Dr65	25	0,65
L20Dr65	20	0,65
L15Dr65	15	0,65
L25Dr50	25	0,50
L20Dr50	20	0,50
L15Dr50	15	0,50
L25Dr35	25	0,35
L20Dr35	20	0,35
L15Dr35	15	0,35

3.3.2. Deney düzeneği

Deneyler için düşey yüklemenin yapılabileceği laboratuvar ölçekli bir deney düzeneği tasarlanmıştır. Deney kazıklarının düşey yüklenmesi esnasında sınır şartları sağlanacak şekilde deney tankı boyutları $1,7 \times 1,7 \times 1,6$ m olarak belirlenmiştir. Fakat yükleme çerçevesinin deney tankı üzerindeki yüksekliği, yağmurlama sisteminde kullanılan eleğin çıkarılabildiği en büyük yükseklik ve yüklemeyi gerçekleştiren pistonun uzunluğu dikkate alındığında deney tankı içerisinde kum yerleştirilebilecek en büyük yükseklik 1,6 m yerine 1,35 m olmuştur. Yükleme çerçevesi çelik profillerden üretilmiştir. İki kolon ve bir kirişten oluşan yükleme çerçevesi, kirişten destek alınarak 10 ton yük uygulanabilecek şekilde tasarlanmıştır (Şekil 3.25 ve Şekil 3.26). Düşey yük hidrolik bir piston ile uygulanmıştır. Yükleme hızı literatür bilgileri (Al-Mosawi ve diğ., 2011; Halder ve Manna, 2022a; Deb ve diğ., 2022) dikkate alınarak 0,5 mm/dk olarak seçilmiştir.



Şekil 3.25. Deney düzeneği çerçevesi ve deney tankı



Şekil 3.26. Deney düzeneği, yükleme sistemi ve kum eleği

3.3.3. Deney kazıklarının üretilmesi

Küçük ölçekli modellerde kullanılan kazıklar, tezin ilk aşamasında optimizasyon çalışması sonucunda belirlenmiş olan GGH karışımı ile ön üretim şeklinde imal edilmiştir. Öncelikle kazıkların ayrı bir tankta, deneysel ölçümlerde kullanılan aynı kum

zemin içerisinde açılacak deliklerde kazık çapı kadar muhafaza boruları kullanılarak oluşturulması planlanmıştır. Fakat kazıkların çapının küçük olması nedeniyle kazıklar bu şekilde oluşturulmak istendiğinde uygun geometride kazıklar oluşturulamamıştır. Bu nedenle kazıklar, iç çapı 2,5 cm ve et kalınlığı 1,5 mm olan ortadan ayrılabilen çelik borulardan yapılmış kalıpların (Şekil 3.27) içine GGH dökülerek oluşturulmuştur. Kazıkların başında mini yük hücrelerinin bağlanabilmesi için 2 cm'sinin içi boş olan ve 2 cm'lik dolu kesitinin 1,4 cm'lik kısmının içine 8 mm'lik yiv açılmış 4 cm uzunluğunda çelik başlıklar (Şekil 3.28) olması gerektiğinden çelik başlıklar, kazıklar çelik kalıbın içine dökülmeden önce çelik kalıpların tepesine sabitlenmiştir (başlıkların boş kısmı çelik boruların içine bakacak şekilde). Böylece çelik başlıkların da içine GGH'nin çelik kalıplara dökülmesi esnasında GGH dolabilmiştir. Üç gün sonra çelik kalıplar ayrılmış ve kazık elde edilmiştir (Şekil 3.29). Kazıkların pürüzlendirilmesi için kazıkların yüzeylerine özel epoksi sürülmüştür. Derinliği en az kazık uzunluğu kadar olan kovalar içinde epoksi sürülmüş kazıklar sabitlenmiş ve kovanın içine Taguchi L9 tasarımlarında dikkate alınmış olan 0,35, 0,50 ve 0,65 D_{rkum} durumlarının elde edilmesini sağlayacak şekilde eleklerden geçirilerek kum doldurulmuştur. Kovanın içine doldurulan kum zemin aynı zamanda epoksi sürülmüş olan kazıkların yüzeyine yapışmış ve bu şekilde kazıklar pürüzlendirilmiştir (Şekil 3.30). Böylece zemin içinde oluşan geopolimer kazıklarda gerekli pürüzlülük arazi uygulamalarına benzer şekilde sağlanmıştır. Ayrıca, kazıklı radye sistemlerinin radyesinin de MKT karışımları için optimum GGH karışımının radye boyutlarında kalıplara dökülmesiyle üretilmesi planlanmasına rağmen bu şekilde radye oluşturulması gerçekleştirilememiştir. Bunun yerine çelik plakalardan radyeler üretilmiştir (Şekil 3.31). GGH radyeden çelik radye kullanımına geçiş durumunda eğilme rijitliğinin aynı kalabilmesi için plaka eğilme rijitliğinin göstergesi olan Eşitlik 3.14'ten (Wood, 2004) hesaplanan rijitliklerin aynı olması istenmiştir. Eşitlikte; K_r , E_r , E_z , ν_z , ν_r , B_r , L_r , t_r sırasıyla radye rijitliği, radye malzemesinin elastisite modülü, zeminin elastisite modülü, zeminin poisson oranı, radye malzemesinin poisson oranı, radye kısa kenar uzunluğu genişliği, radyenin uzun kenar uzunluğu ve radye kalınlığını göstermektedir. GGH için daha önce planlanan kalınlık 2,5 cm, GGH elastisite modülü 39200 MPa, GGH poisson oranı 0,2, çelik elastisite modülü 200000 MPa ve çelik poisson oranı 0,3 olduğuna göre çelik radye kalınlığı 1,43 cm olarak hesaplanmıştır. Taguchi L9 tasarımı için üretilen çelik radyelerde kazık-mini yük hücresi-radye bağlantısının sağlanabilmesi için delikler açılmıştır. Bu deliklerin içinden geçen dişli çelik çubuklar ve bunların somunlar ile radyeye sabitlenebilmesi ile radye-mini yük hücresi bağlantısı gerçekleştirilebilmiştir.

Çelik radyelerin zemine temas eden yüzünün de pürüzlendirilebilmesi için radyelerin bir yüzeyine özel epoksi sürülmüştür. Kum zeminin farklı değerlerine göre radye yüzeyine kum eleklerden elenerek serpilmiş ve pürüzlendirme kumun epoksiye yapışması ile tamamlanmıştır (Şekil 3.32)

$$K_r = \pi^{\frac{3}{2}} \times \frac{E_r \times (1 - v_z^2)}{E_z \times (1 - v_r^2)} \times \left(\frac{B_r}{L_r}\right)^{\frac{1}{2}} \times \left(\frac{t_r}{L_r}\right)^3 \quad (3.14)$$



Şekil 3.27. Ortadan ayrılabilen çelik kalıp



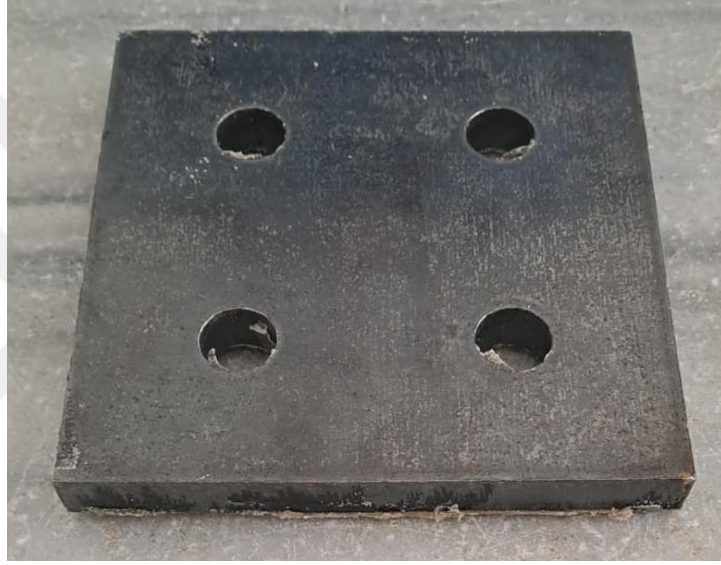
Şekil 3.28. Kazık-mini yük hücresi bağlantısını sağlayan çelik başlık



Şekil 3.29. Üretilen GGH kazık



Şekil 3.30. Pürüzlendirilmiş ve gerinim ölçer pul yerleştirilmiş GGH kazık



Şekil 3.31. Çelik radye



Şekil 3.32. Pürüzlendirilmiş çelik radye

3.3.4. Küçük ölçekli model deneylerde ölçümler

Kazıklara gelen eksenel kuvvetler kazık ile aynı ya da kazığa çok yakın çapa sahip mini yük hücresiyle ölçülmüştür (Şekil 3.33a). Bu sensörün tercih edilmesinin nedeni cihazın her iki yönünün yivli olması sayesinde radyeye ankastre olarak bağlanabilmesi ve kazık üstündeki yükün doğrudan ölçülebilmesine imkan vermesidir. Kazık başlığına, GGH üretimi esnasında bu yük hücresine uygun çelik başlık yerleştirilerek kazığın yük hücresine ankastre mesnetli olması sağlanmıştır. Böylece bu mini yük hücresi radye ve kazık arasında hem rijit bir mesnet teşkil etmiş hem de düşey yükün doğrudan ve en doğru şekilde ölçülmesini sağlanmıştır. Mini yük hücresi kullanılarak bir kazığa gelen eksenel yük belirlenirken, aynı zamanda kazık-radye yük paylaşımında kazık tarafından taşınan yükün miktarı da belirlenmiştir. Kullanılan mini yük hücreleri 500 kg kapasiteli olup yaklaşık çapı 2,5 cm'dir. Ayrıca, kazık uzunluğu boyunca $L_k/4$ mesafe aralıklarla yerleştirilen gerinim ölçer pullar ile kazık uzunluğu boyunca eksenel kuvvetin değişimi belirlenmiştir (Şekil 3.33b). Gerinim ölçer pulların kazık başlığına yakın olanı kazık üstünden itibaren $0,10L_k$ ve kazık ucuna yakın olanı $0,97L_k$ konumuna yerleştirilmiştir. Eksenel kuvvetler ve çevre sürtünmeleri değerlendirilirken çizilen grafiklerde her gerinim ölçer pulun konumu “konum/ L_k ” ifadesiyle tanımlanmıştır. Buna göre kazık başlığından ucuna doğru gerinim ölçer pullar sırasıyla 0,10, 0,25, 0,50, 0,75 ve 0,97 konum/ L_k bölgelerine yerleştirilmiştir (Şekil 3.34). Kazıklar üzerine yerleştirilen mini yük hücreleri ile bir kazığa gelen toplam eksenel kuvvet ölçülebilmıştır. Gerinim ölçer pullar ile yükleme altında kazık uzunluğu boyunca meydana gelen eksenel kuvvetler belirlenmiştir. Gerinim ölçer pullardan elde edilen birim deformasyon değerleri ile kazık malzemesi olan optimum GGH'nin elastisite modülünün çarpılması ile eksenel gerilme hesaplanmıştır. Kazık çapı 2,5 cm olduğundan, bu eksenel gerilmenin kazığın dairesel alanı ile çarpılmasıyla kazığın gerinim ölçer pul yerleştirilmiş noktalarındaki eksenel kuvveti bulunmuştur. Mini yük hücresi ile ölçülen eksenel kuvvet ile gerinim ölçer pulların ölçtüğü eksenel kuvvetlerin farkı çevre sürtünmesi değeri olarak elde edilebilmiştir. Çünkü kazık uzunluğu boyunca kazık üst ucundan kazık alt ucuna doğru gerinim ölçer pullar ile ölçülen eksenel kuvvet değerleri azalmış olur. Böylece kuvvetin belirli bir kısmının çevre sürtünmesi aracılığıyla taşındığı gözlemlenebilmiştir. Ayrıca, uç direnci en alttaki gerinim ölçer pul tarafından ölçülen eksenel kuvvete yakın bir değer olur. Gerinim ölçer pulların 120 Ω dirençli olmasının yeterli olduğu öngörülmüş ve buna uygun gerinim ölçer pul kullanılmıştır. Deney verileri ve sayısal veriler değerlendirilirken

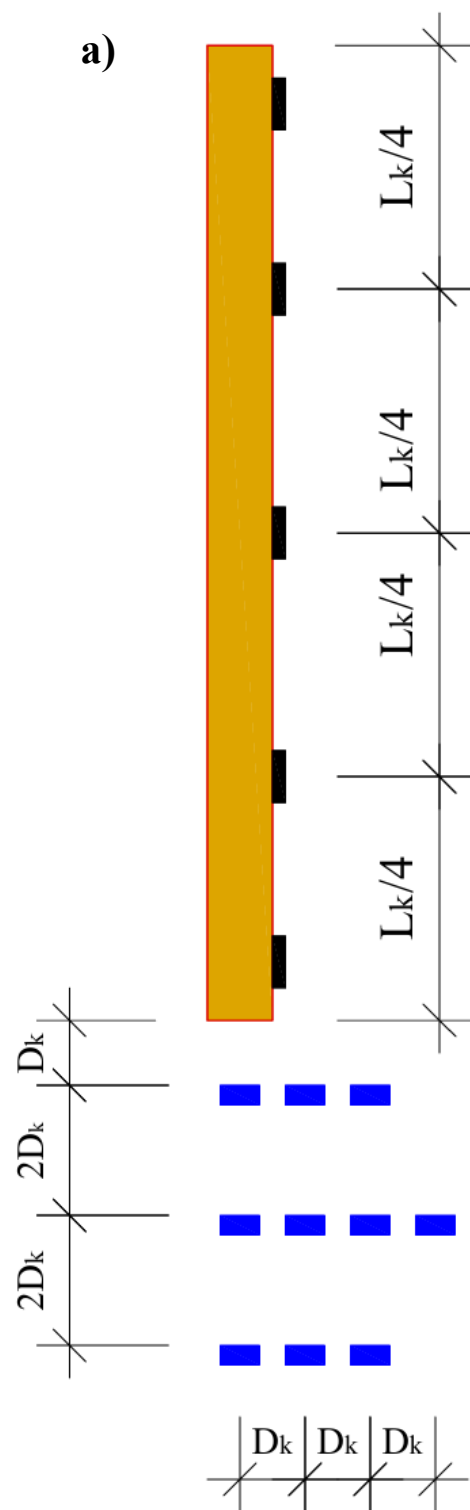
kullanılan çevre sürtünmeleri kazık boyunca eklenik olarak meydana gelen çevre sürtünmeleri olmuştur. Çevre sürtünmelerinin eksenel kuvvetlere oranı hesaplanırken kazıklı radye sistemlerinde kazıklarda meydana gelen eklenik çevre sürtünmelerinin ortalaması (OÇS) ve eksenel kuvvetlerin ortalaması (OEK) kullanılmıştır. Böylece kazıklı radye sistemlerinde OÇS/OEK oranları ve tekil kazıklarda çevre sürtünmesi/eksenel kuvvet oranları dikkate alınmıştır.

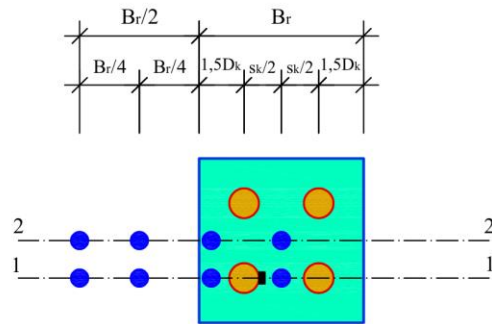
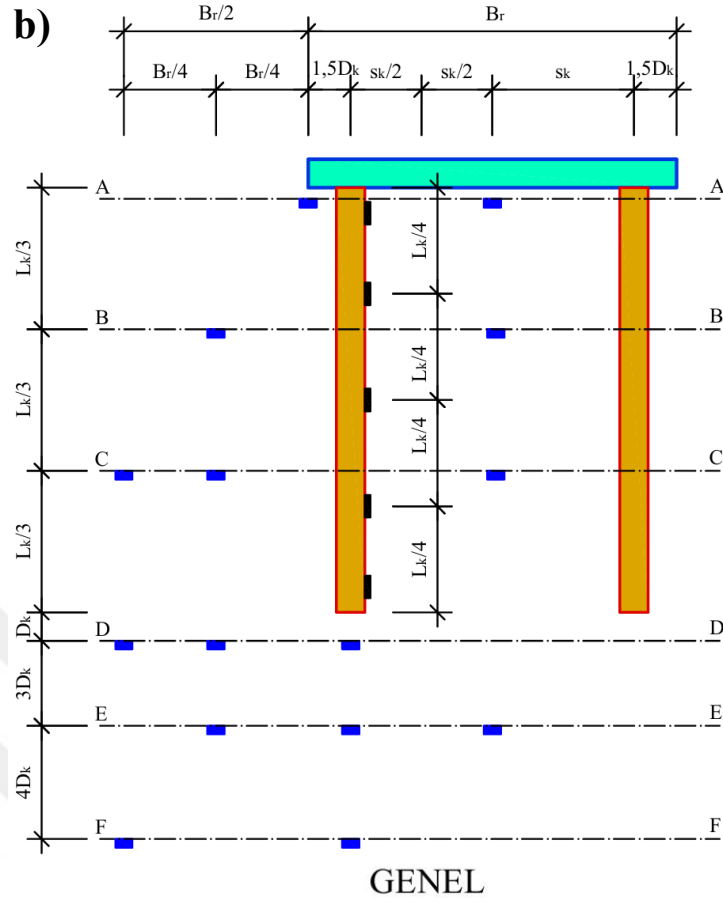
Kazıklı radye ile yapı yüklerinin zemine aktarılması ile zeminde meydana gelen gerilme dağılımlarının belirlenebilmesi yapı-zemin etkileşiminin incelenmesinde büyük öneme sahiptir. Bunun için düşeyde kazıklı temellerin ucundan itibaren D_k 'nin 8 katı derinliğe kadar ve yatayda radye sınırından itibaren $B_r/2$ kadar mesafede ölçümler yapılacak şekilde zemin basınç ölçerler yerleştirilmiştir (Şekil 3.33c ve Şekil 3.34). Deneysel çalışmada zemin basınç ölçerler ZB kısaltmasıyla isimlendirilmiştir. Tekil kazıklarda uçtan itibaren düşeyde D_k 'nin 5 katına ve yatayda D_k 'nin 3 katına kadar bir mesafede zemin basınç ölçer sensörler yerleştirilmiştir. Zemin basınç ölçer sensörler 2000 kPa kapasiteli olacak şekilde seçilmiştir.

Eksenel kuvvet, çevre sürtünmesi ve zeminde meydana gelen gerilmelerin ölçümünü yapan sensörlerin yanı sıra radyenin düşey yükleme altında oluşan deplasmanlarının ölçülmesi için 10 cm deplasman kapasiteli lineer potansiyometre cihazları kullanılmıştır. Yine düşey yükleme esnasında uygulanan toplam yük, kapasitesi 10 ton olan yük hücresi vasıtasıyla ölçülmüştür. Tüm ölçüm cihazlarının verilerinin toplanması ve işlenmesi için bir veri kayıt sistemi kullanılmıştır (Şekil 3.35). Veri kayıt sistemi olarak 64 kanallı 32 bit ve 240×120 piksel bir sistem seçilmiştir.

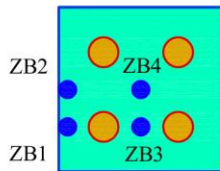


Şekil 3.33. Küçük ölçekli model deneylerde kullanılan ölçüm cihazları: a) Mini yük hücresi, b) Gerinim ölçer pulu, c) Zemin basınç ölçer

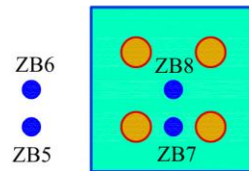




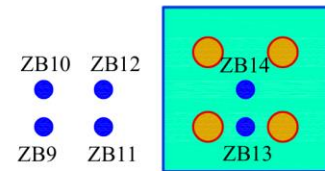
A-A Seviyesi



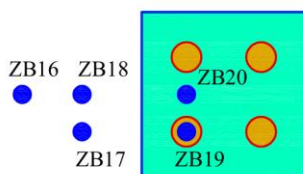
B-B Seviyesi



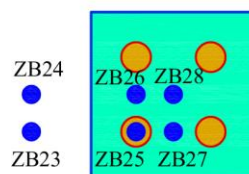
C-C Seviyesi



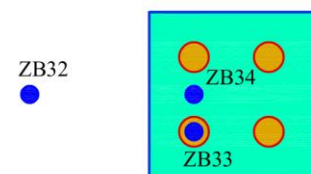
D-D Seviyesi

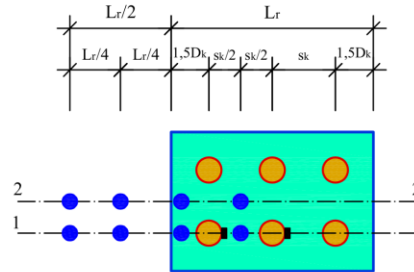
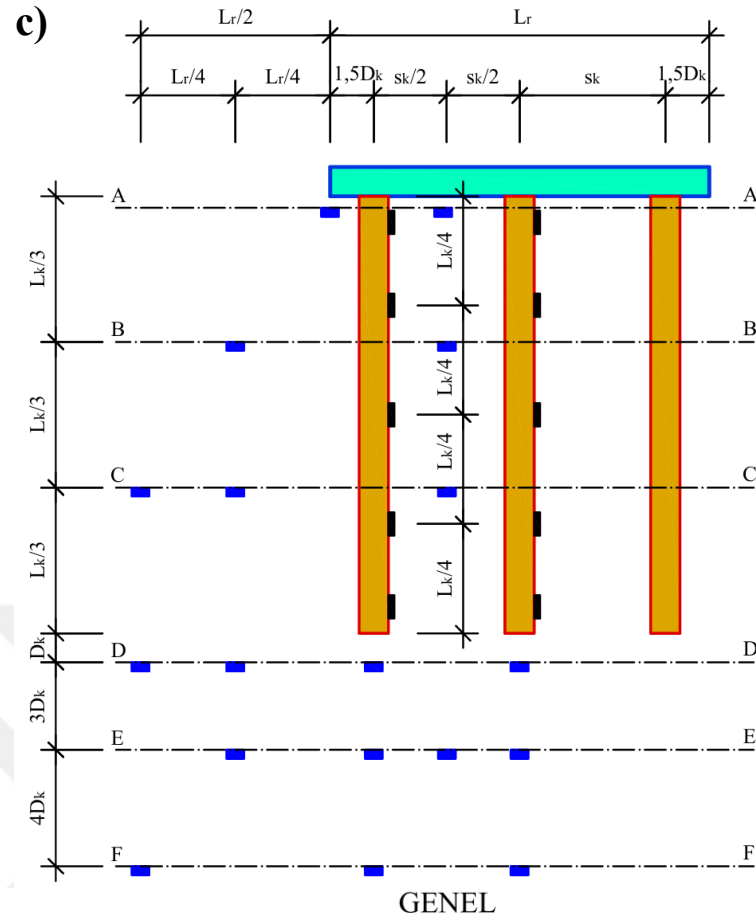


E-E Seviyesi

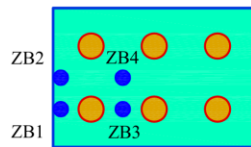


F-F Seviyesi

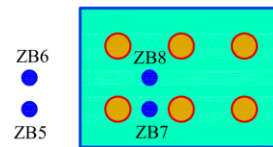




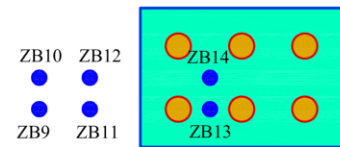
A-A Seviyesi



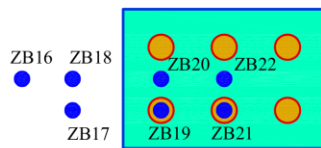
B-B Seviyesi



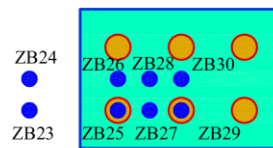
C-C Seviyesi



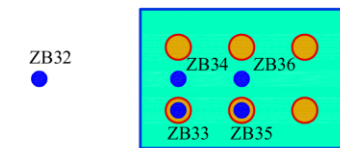
D-D Seviyesi

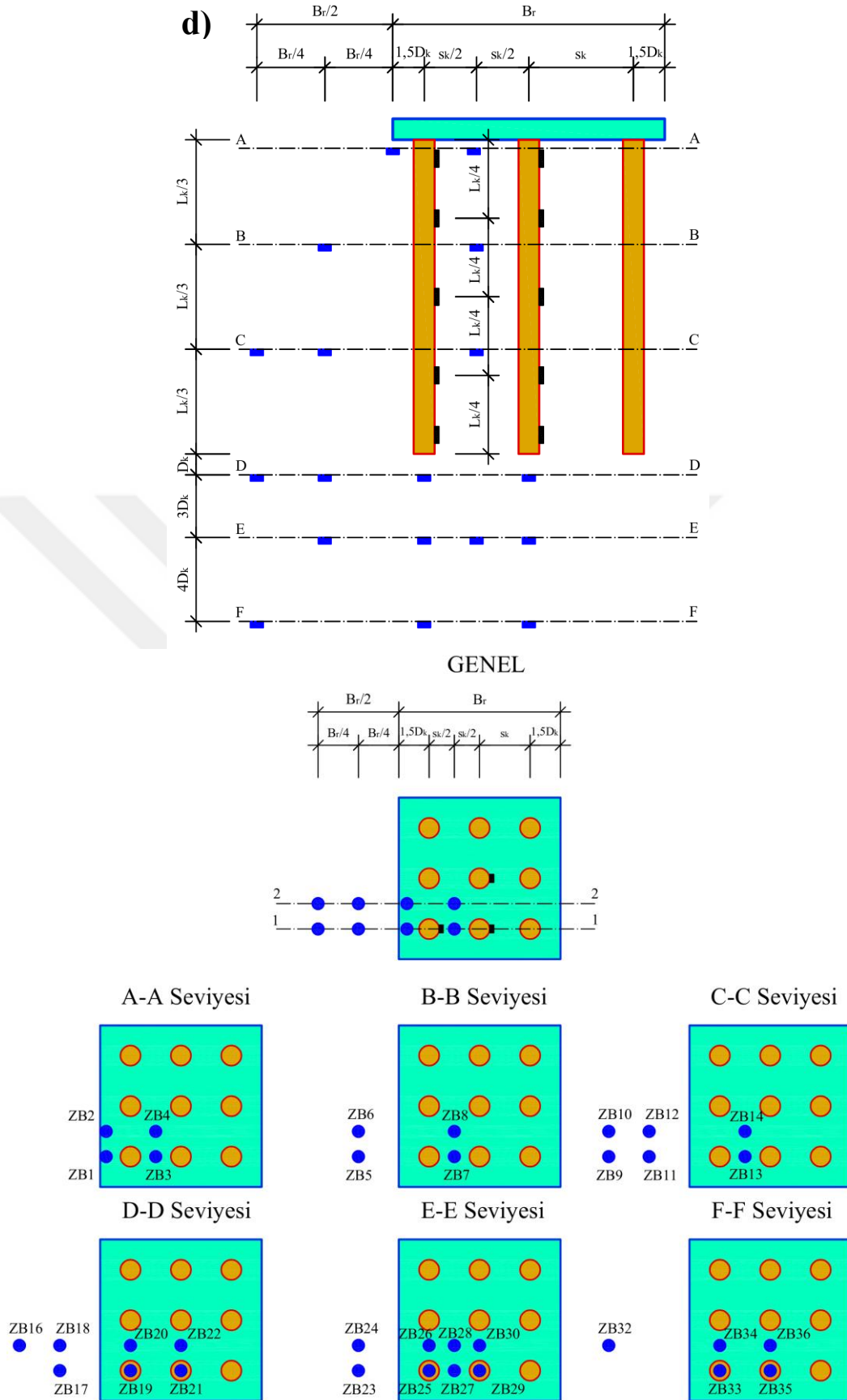


E-E Seviyesi



F-F Seviyesi





Şekil 3.34. Düşey yükleme durumunda kazıklı radye ve tekil kazık için ölçüm sensörlerinin temsili gösterimi ve örnek tasarımlar için konumları: a) Tekil kazık, b) Dört kazıklı radye, c) Altı kazıklı, d) Dokuz kazıklı radye



Şekil 3.35. Veri kayıt sistemi

3.3.5. Deney kumunun ve kazıkların yerleştirilmesi

Küçük ölçekli model deneylerde kullanılan kumun tane çapı dağılımı (0,075-0,500 mm aralığında) ölçek etkisini en aza indirebilecek şekilde belirlenmiştir. Literatür incelendiğinde model kazık elemanın çapının kum zeminin ortalama tane çapından (D_{50}) olabildiğince büyük olması gerektiği bu sayede ölçek etkisinin en aza indirilebileceği belirtilmektedir. Buna göre, D_k/D_{50} oranının literatürde en az 30 olması gerektiği belirtilmiştir (Fattah ve diğ., 2017; Halder ve Manna, 2022a). Tez çalışmasında bu oranın 30'dan fazla ve en az 50 olmasına dikkat edilmiştir.

Deney tankına kum zeminin belirlenen sıklıkta yerleştirilmesi hem küçük ölçekli model deney değişkenlerinin doğru seçilmesi hem de sayısal analizlerin tutarlılığı açısından kritik öneme sahiptir. Kum yerleştirmede kullanılan yaygın yöntemlerden bir tanesi yağmurlama yöntemidir. Bu yöntem, kumun belirli bir yükseklikten belirli bir hızda dökülerek tanka yerleştirilmesi esasına dayanmaktadır. Hemen her araştırmacı kendi özgün düzeneğini üretmiş olsa da tüm düzenekler iki farklı temel ilkedен birini benimsemektedir:

- Birinci ilke deney tankının üzerinde bulunan bir kum haznesinin altına farklı uzunluklarda iletim boruları yerleştirilerek kumun tabakalar halinde ve hep belirli bir yükseklikten düşürülerek tanka serilmesi yöntemine dayanır, yani serilen kum kalınlığı

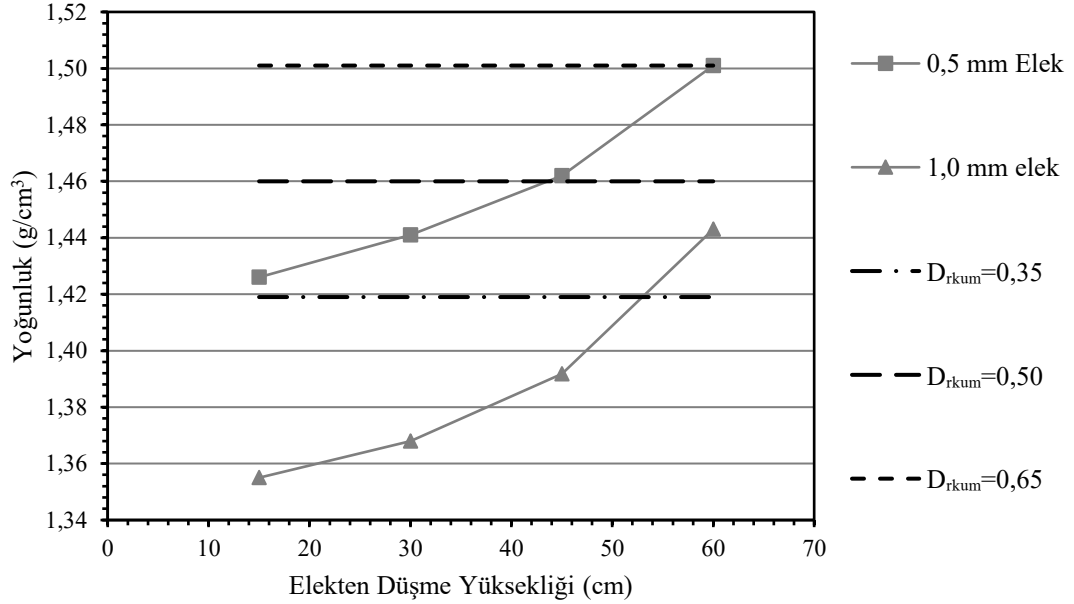
arttıkça sistem de yukarı hareket eder (Fattah ve diğ., 2017; Tabaroei ve diğ., 2017; Fattah ve diğ., 2020). İletim hattının sonuna belli aralıklarda elekler yerleştirilerek kum akışının laminar olması sağlanır. Eleklerin göz açıklığı ve düşme yüksekliğinde yapılan değişikliklerle denemeler yapılarak istenilen sıklık elde edilir.

- İkinci ilke ise kumun bulunduğu hazne düşeyde hareket etmeksizin ya da uzunluğu ayarlanan iletim hattı olmaksızın kumun sabit bir yükseklikten tanka yerleştirilmesi yöntemine dayanır (Chanda ve diğ., 2022; Jamil ve diğ., 2022). Burada kritik düşme yüksekliği (H_{kr}) kavramı öne çıkar. Buna göre sabit akışa sahip kum, H_{kr} ve daha büyük yüksekliklerden döküldüğünde, düşme yüksekliği kumun sıklığını değiştirmez. Örneğin, H_{kr} 60 cm olarak belirlendiğinde yağmurlama düzeneği tanktaki kumun en üst seviyesinden en az 60 cm yukarıdan kum dökecek şekilde ayarlanır. Bu yöntemle göre H_{kr} kullanılan düzeneğe özel olarak belirlenir. İstenen sıklığın elde edilmesi eleklerin göz açıklığı ve elek sayısı gibi özellikler değiştirilerek sağlanır.

Tez çalışmasında ikinci ilkenin benimsendiği bir yağmurlama düzeneği oluşturulmuştur. Buna göre 0,5 ve 1,0 mm göz açıklıklarına sahip olan elekler seçilmiştir. Bu eleklerle kum yerleştirildiğinde 0,35, 0,50 ve 0,65 D_{rkum} değerlerinin deney tankında elde edilebilmesi için eleklerin kum doldurulan tabakadan yüksekliği ve göz açıklığının D_{rkum} değişimine etkisini belirleyebilmek amacıyla ön deneyler yapılmıştır. Bu deneylerde eleklerin yüksekliği 500 kg kapasiteli diferansiyel palanga (zincirli caraskal) ile ayarlanmıştır. Sonrasında bir helezon konveyör ile eleklerin üstüne kum boşaltılmış ve kum, eleklerden belli yüksekliklerden elenerek tanka yerleştirilmiştir. Bu işlem 15 cm tabakalar halinde gerçekleştirilmiş ve her tabakada tankın belirli yerlerine konumlandırılmış olan 40 cm çapında ve 15 cm yüksekliğinde silindirik kutularda aynı anda kumla dolmuştur. Her tabakada silindirik kutulara dolan kumun kütlesi belirlenmiş ve D_{rkum} değeri o tabaka için hesaplanmıştır. Bu işlem tankın 1,35 m'lik yüksekliği için iki elekte birkaç defa tekrarlanmış, elekten kumun düşme yüksekliği ve elek çapına göre D_{rkum} değerlerinin değişimi grafiği çizilmiştir (Şekil 3.36). Bu grafik göz önüne alınarak kazıklı radye ve tekil kazıkların küçük ölçekli model deneylerinde D_{rkum} değerlerinin elde edilebilmesi için uygun elek çapı ve elek yüksekliği kullanılmıştır. Deney tankına dolacak kumun yüksekliği ve tank alanı dikkate alındığında kum zeminin tanka elle doldurulması ve tanktan elle boşaltılması neredeyse imkansız hale gelmiştir. Kumun bu şartlarda tanka doldurulması ve tanktan ölçüm sensörlerine zarar vermeksizin boşaltılması zor ve önemli bir iş olduğundan, taneli ve toz formunda çok çeşitli malzemenin iletiminde kullanılan bir esnek helezon konveyör kullanılmıştır. Helezon konveyör kum iletimi için özel bir

şekilde düzenlenmiştir. Toplam uzunluğu 6 m, taşıma yüksekliği 3,0 m ve kapasitesi saatte 5 m³ kum taşıyabilecek şekilde ayarlanmıştır.

Deney tankının tabanından en alttaki zemin basınç sensörünün seviyesine kadar kum yerleştirildikten sonra kablolama işlemi tamamlanan sensörler planlandığı şekilde kuma yerleştirilmiş (Şekil 3.37) ve bir sonraki sensör katmanına kadar kum yerleştirilmeye devam edilmiştir (Şekil 3.38). Kazık uçlarının konumlanması gereken seviyeye gelindiğinde kazıklar, radye üzerinde olmaları gereken konumda sabit kalmalarını sağlamak için iki adet boşluklu şablon ile tankın içine yerleştirilmiştir. Bu şablonlar hem kazıkların düşey doğrultusunu ve tank içindeki konumlarını sabit tutmuş hem de boşluklu olması sayesinde yağmurlama yöntemiyle yerleştirilen kumun, kazıkların arasına dolmasına engel olmamıştır.



Şekil 3.36. Kumun düşme yüksekliği ve elek göz açıklığına göre D_{rkum} değerleri

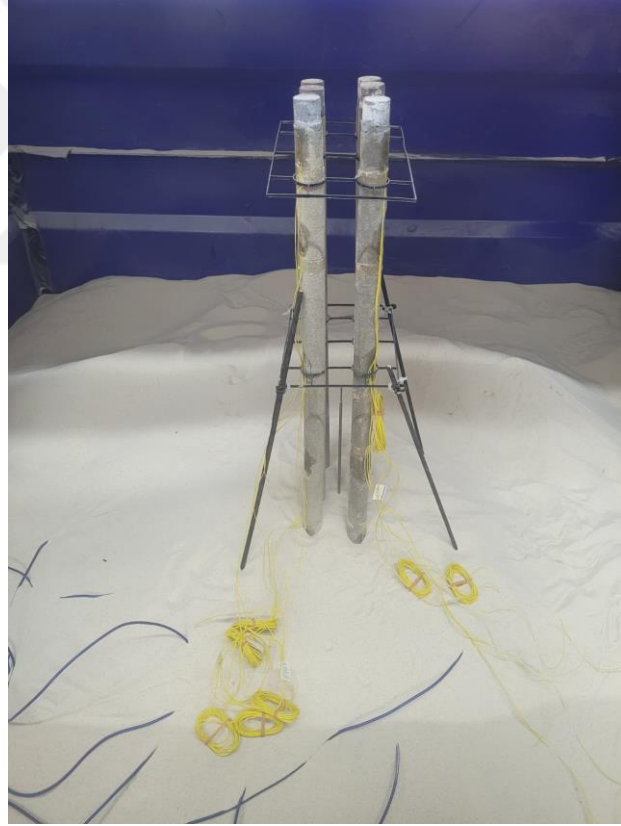


Şekil 3.37. Zemin basınç ölçerlerin yerleştirilmesi



Şekil 3.38. Esnek helezon konveyör ve deney tankına kum yerleştirilmesi

Gerinim ölçer pullar önceden kazık yüzeyine özel bir yapıştırıcı kullanılarak yapıştırılmıştır. Kazık aralarında konumlanması gereken sensörler yine belirlenen bölgelere yerleştirilerek yağmurlama işlemi aşamalı şekilde kazık üst seviyesine kadar devam etmiştir (Şekil 3.39). Kazık üst seviyesine gelindiğinde kazık uçlarına vidalı mini yük hücrelerinin montajı yapılmış (Şekil 3.40) ve radyenin hemen altında bulunan zemin basınç sensörleri de zarar görmemeleri için radye tabanından 1 cm aşağıda olacak şekilde zemin içine yerleştirilmiştir. Radye plakasında bulunan deliklerden çıkan mini yük hücresi vidalarına radye üstünden somunlarla sıkılarak hem kazık-radye ankastre mesneti teşkil edilmiş hem de radyenin altındaki zeminle teması sağlanmıştır (Şekil 3.41). Tekil kazıklar için de benzer şekilde kum yerleştirme işlemi gerçekleştirilmiş ve kazıklarda düşey yükleme yapılmıştır (Şekil 3.42). Tekil kazıklarda değişkenler sadece D_{rkum} ve L_k/D_k olmuştur.



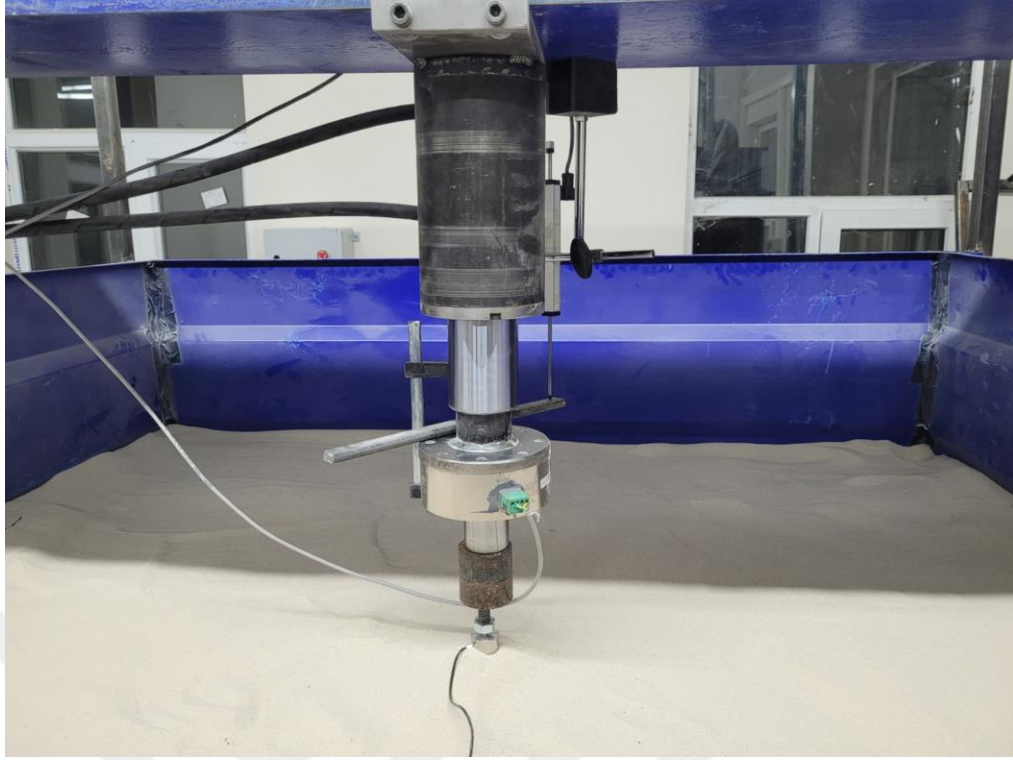
Şekil 3.39. Şablon ile sabitlenmiş kazıklar ve sensörlerin yerleştirilmesi



Şekil 3.40. Mini yük hücreleri montajı yapılmış kazık başlıkları



Şekil 3.41. Radye ve kazıkların bağlantısının yapılmış olduğu son hali



Şekil 3.42. Tekil kazıkların düşey yüklenmesi

3.3.6. Deneysel verilerin değerlendirilmesi

Deneysel çalışmalar ile düşey yükleme durumunda kazıklı radye yük-oturma davranışı, kazıklarda oluşan eksenel kuvvetler, kazık-radye yük paylaşımı ve zeminde oluşan gerilmeler; tekil kazıklar için yük-oturma davranışı, kazıklarda oluşan eksenel kuvvetler ve zeminde oluşan gerilmeler belirlenmiştir. Kazıklı radye sistemlerinin düşey yüklenmesinde L_k/D_k , s_k , D_{rkum} ve N_k değişkenlerinin sonuçlar üzerindeki etkisi Taguchi yöntemi ile incelenmiştir. Zemin basınç ölçerler aracılığıyla, düşey yükleme altında zemin içinde meydana gelen gerilme değişimleri, bu değişimlerin düşey/yatay doğrultuda kazık ve radyeden uzaklığına göre dağılımı elde edilebilmiştir.

Kazıklı radye sistemlerinde radye genişlikleri ve altılı kazıklı durumlarda ise hem x hem de y yönünde radye boyutlarının değişmesi nedeniyle radye alanının karekökü alınarak hesaplanmış olan eşdeğer radye genişliğine (L_{er}) göre normalize edilmiş oturma seviyelerinde deney verilerinin elde edilmesi uygun görülmüştür. Buna göre oturmanın (u_v) L_{er} 'ye oranının (u_v/L_{er}) %3,5 değerine kadar deney verileri kaydedilmiştir. Tekil kazıklarda, deney verilerinin u_v 'nin D_k 'ye oranı ile normalize edilmiş oturma seviyelerinin kullanılması uygun görülmüş ve u_v/D_k oranının %50 değerine kadar veriler kaydedilmiştir.

Deney verileri elde edildikten sonra kazıklı radye sistemleri için u_v/L_k oranının %0,05, 0,50 ve 2,00 seviyelerindeki değerler kullanılarak ANOVA yapılmıştır. Fakat oluşturulan Taguchi tasarımları doygun olduğundan F ve p değerleri hesaplanamamış, bunun yerine her terimin kareler toplamının toplam kareler toplamına oranı ile hesaplanan katkı dereceleriyle değişkenlerin sonuçlar üzerindeki etki derecesi üç farklı oturma seviyesi için değerlendirilmiştir. Değişkenlerin sonuçları pozitif veya negatif yönde etkilemesi ise S/N oranları yerine gerçek sonuçların ortalamalarına göre çizilen ana etki grafikleriyle incelenmiştir. Tekil kazıklar için u_v/D_k oranının %0,50, 5,00 ve 20,00 seviyelerindeki değerleri doğrudan tasarım değişkeni olarak hesaba katılmış ve daha önceki değişkenlerin seviyeleri dikkate alındığında 9 olan tasarım sayısı yeni durumda $9 \times 3 = 27$ (3 farklı oturma seviyesi olduğundan) olacak şekilde ANOVA yapılmıştır. Bu durumda tasarım tablosu 3 seviyesi olan 3 değişken için bir tam faktöriyel tasarım tablosuna dönüşmüştür.

Literatürde; yapılan yüklemelerden kaynaklı tekil kazık ve kazıklı radye bileşenleri üzerinde ve etrafındaki zeminde oluşan gerilme dağılımlarının incelendiği detaylı bir çalışmaya rastlanılmamıştır. Tez çalışmasında küçük ölçekli model deneylerle kazıklı radye ve tekil kazık durumları için zemin içindeki gerilme dağılımı doğrudan ölçümlerle bulunmuştur. Böylece, kazıklı radye sistemlerinde zemine aktarılan yüklerden dolayı zeminde oluşan deplasmanların ve oturmaların hesaplanmasında kullanılan gerilme artışları belirlenebilmiştir.

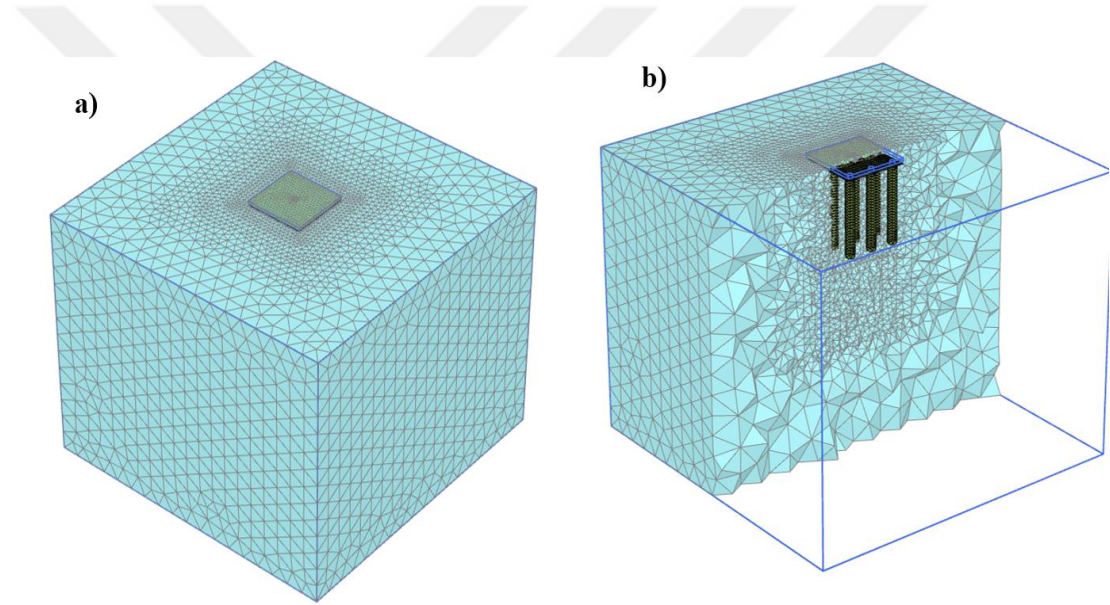
3.3.7. Sayısal analizler ve deney verileri ile karşılaştırma

Küçük ölçekli model şartları için sonlu elemanlar yöntemini esas alan sayısal analizler Plaxis 3D yazılımı kullanılarak yapılmıştır. Küçük ölçekli model deneyler için Çizelge 3.6'da gösterilmiş olan Taguchi L9 tasarımı ile düşey yükleme durumunda 9 adet kazıklı radye ve Çizelge 3.7'deki tasarımlarda tekil kazıkta düşey yükleme durumu için 9 adet küçük ölçekli model boyutlarında olmak üzere toplam 18 adet sayısal analiz yapılmıştır.

Sayısal analizde zemin bünye modeli olarak pekleşen zemin modeli kullanılmıştır. Pekleşen zemin modeli Mohr Coulomb yenilme kriterleri ile birlikte zeminin deformasyon etkisi (veya gerilme etkisi) ile değişen rijitliğinin göz önüne alınabildiği gelişmiş bir zemin modelidir. Pekleşen zemin modelinde rijitlik tanımlaması haricinde Mohr Coulomb zemin modeli ile benzer değişkenler kullanılmaktadır. Zemin rijitliği için

üç farklı durumu temsil eden elastisite modülleri (E_{50} , E_{oed} ve E_{ur}) ve gerilme-rijitlik üssü (m_r) kullanılmaktadır (Plaxis Materials Manual, 2022). Küçük ölçekli model deneylerde dikkate alınan farklı D_{rkum} değerleri için analizlerde kullanılan zeminin mukavemet ve rijitlik parametreleri, üç eksenli basınç deneyleri ve ödometre deneyleri ile Materyal ve Yöntem bölümünde açıklandığı gibi belirlenmiştir. Zeminin dilatasyon açısı (ψ) içsel sürtünme açısının 30 eksiği olacak şekilde seçilmiştir. GGH kazıklar ve çelik radye hacim eleman olarak modellenmiş ve model geometrisi oluşturulmuştur (Şekil 3.43). Kum zemin, GGH kazık, ve çelik radye için seçilen malzeme modeli türü, malzeme modeli parametreleri ve sonlu elemanlar modeline ait önemli parametreler Çizelge 3.8’de verilmiştir. Sayısal analizlerde sonlu elemanlar ağı için Plaxis 3D’de mevcut olan ince (fine) sıklık kullanılmıştır. İnce eleman yapısı tüm modele uygulanırken hem kazıklı radye hem de tekil kazıklarda belirli derinlik ve yatay mesafelerde kademeli bir şekilde ek sıklıklar Plaxis 3D’deki kabalık faktörü (coarseness factor) aracılığıyla modelde kullanılmıştır (Şekil 3.44 ve Şekil 3.45). Buna göre kazıklı radye radye sınırından itibaren B_r veya L_r ’nin dörtte biri, yarısı ve misli kadar mesafelerde, kazıklar altında $5D_k$ ve $20D_k$ kadar mesafede ek sıklıklar uygulanmıştır. Tekil kazık ortasından itibaren D_k , $2,5D_k$, $4D_k$ ve $6D_k$ kadar radyal mesafelerde; kazık altından itibaren $8D_k$ kadar mesafede ek sıkılaştırma işlemi gerçekleştirilmiştir. Sonuç olarak 9 adet kazıklı radye ve 9 adet tekil kazık için Çizelge 3.9’da verilen sayılarda elemana sahip sonlu elemanlar modeli oluşturulmuştur. Kullanılan sonlu elemanlar ağı yapısının, ağın ince sıklıktan çok ince sıklığa geçişinde ağ sayısı değişiminden etkilenme derecesi kazıklı radyede T3 ve tekil kazıklarda L25Dr65 tasarımı için ince ve çok ince ağ ile oluşturulmuş sayısal analizlerin gerilme-oturma ve kuvvet-oturma eğrilerinin karşılaştırılması ile incelenmiştir (Şekil 3.46). İnce ve çok ince ağ ile oluşturulmuş sonlu elemanlar modellerinin analizleri sonucunda yükleme boyunca çok ince ağa sahip modelde gerilmelerin ve kuvvetlerin daha az olduğu; fakat bu farkın T3 tasarımı için %0,89 ve L25Dr65 tasarımı için %0,51 olduğu belirlenmiştir. Bu oranların oldukça düşük olduğu ve oluşturulan sonlu elemanlar modellerinin ve yapılan sıkılaştırmaların sayısal analizlerde kullanılabileceği kabul edilmiştir. Model geometrileri oluşturulduktan sonra analiz aşamalandırılmıştır (Şekil 3.47). Buna göre, aşamaları basitleştirmek için kazıklı radye sistemlerinde başlangıç aşaması olarak kazıkların üstüne kadar zemin olduğu kabul edilmiştir. Sonraki aşamada (1. Aşama) kazıklar ve arayüzler aktifleştirilmiştir. 2. Aşamada radye ve radye arayüzü aktifleştirilmiştir. Son olarak 3. Aşamada deplasman (prescribed displacement) radye üstünden uygulanacak şekilde aktifleştirilmiştir. Tekil kazıklar için de sayısal analiz

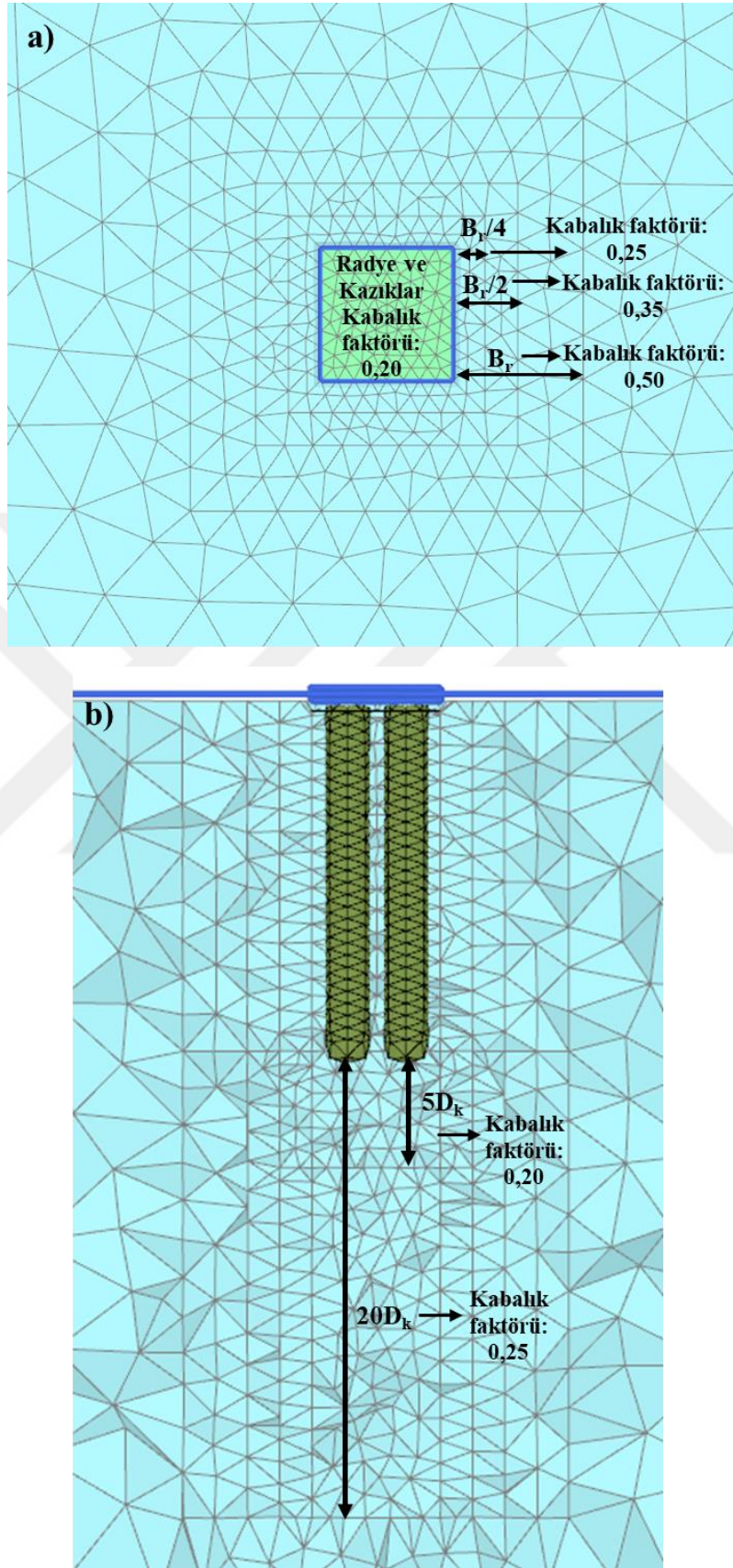
aşamaları benzer şekilde oluşturulmuştur. Tekil kazıklarda sadece radye ile ilgili aşama olmamıştır. Sayısal analizlerde düşey yükleme durumu için kazıklı temel gerilme-oturma davranışı, kazıklarda oluşan eksenel kuvvetler, kazık-radye yük paylaşımı ve zeminde oluşan gerilmeler elde edilmiştir. Tekil kazıklar için radye olmayacağından kuvvet-oturma davranışı, kazıklarda oluşan eksenel kuvvetler ve zeminde oluşan gerilmeler elde edilmiştir. Sayısal analizlerden elde edilen bu veriler küçük ölçekli model deneylerde ölçüm sensörleriyle de elde edildiği için bu sonuçlar kıyaslanmıştır. Karşılaştırma için deney verileri ile sayısal analiz verileri arasında ortalama mutlak yüzde hata (MAPE), sayısal analiz verisi/deney verisi (sayısal/deney olarak kullanılmıştır) ve sayısal analiz verileri ile deney verileri arasında R^2 hesaplanmıştır. Karşılaştırma MAPE, sayısal/deney ve R^2 değerleri üzerinden yapılmıştır.



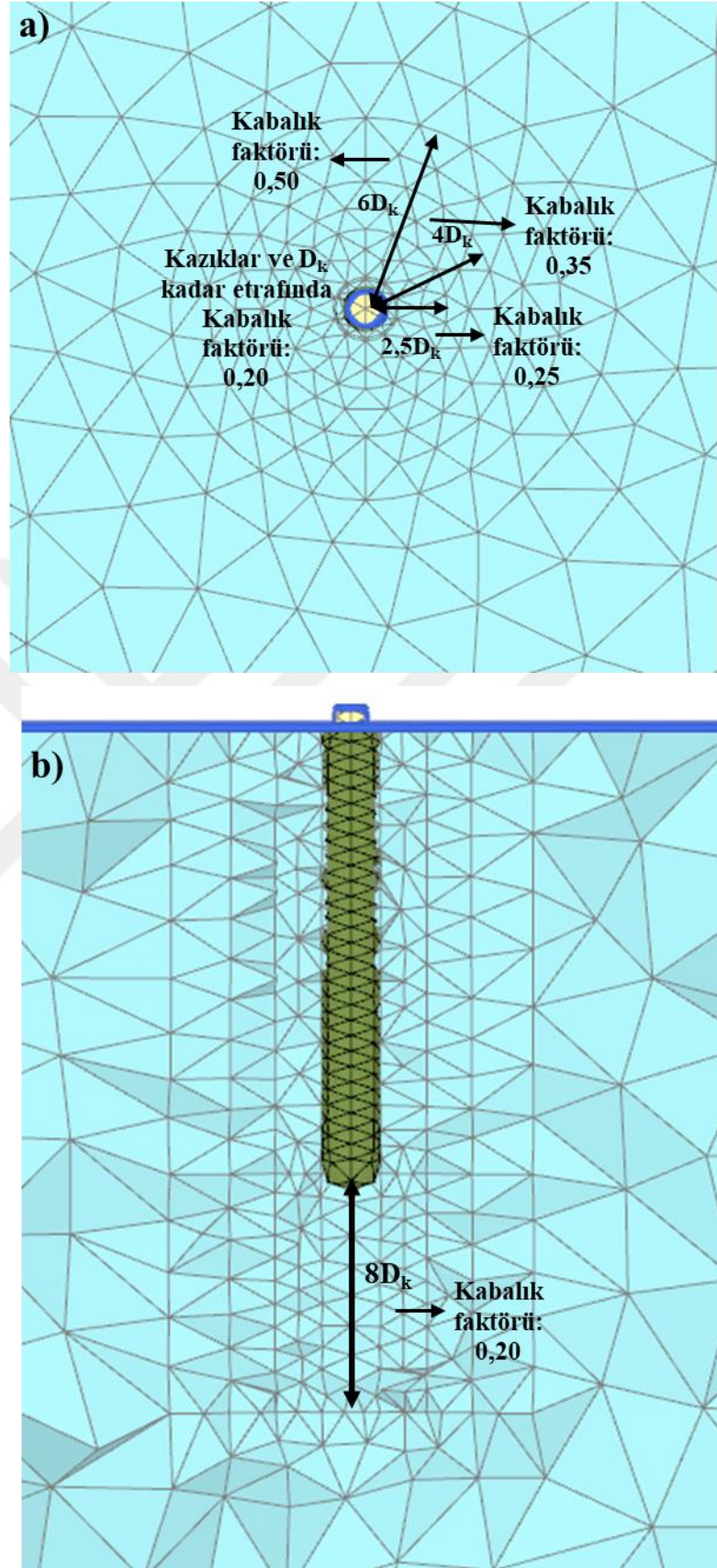
Şekil 3.43. Örnek bir sayısal analiz modeli

Çizelge 3.8. Sayısal analizlerde kullanılan malzeme özellikleri

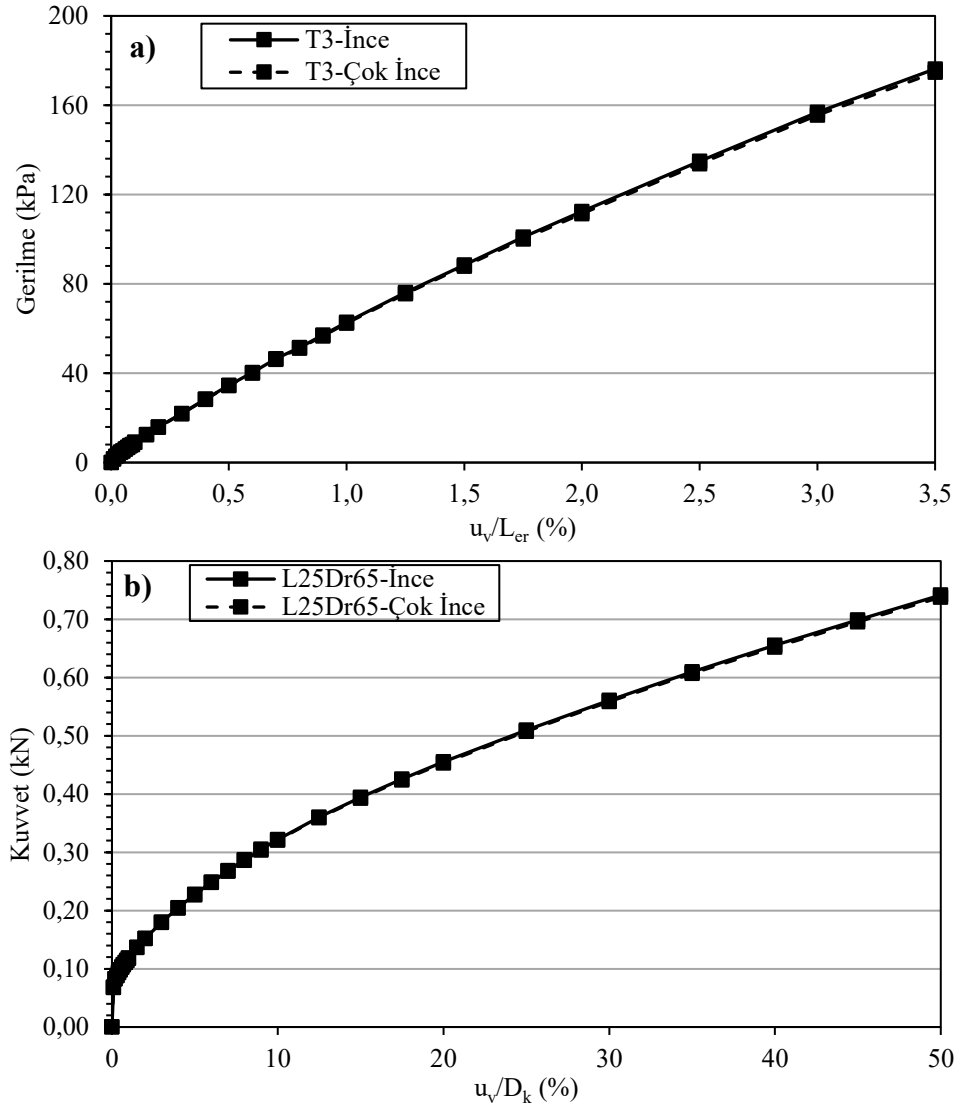
Özellik	Zemin			Radye (Çelik)	Kazık (GGH)
	$D_{rkum} = 0,35$	$D_{rkum} = 0,50$	$D_{rkum} = 0,65$		
Model	Pekleşen Zemin	Pekleşen Zemin	Pekleşen Zemin	Lineer Elastik	Lineer Elastik
$E_{50,ref}$ (kN/m ²)	19200	26600	36200	-	-
$E_{oed,ref}$ (kN/m ²)	17900	25300	34200	-	-
$E_{ur,ref}$ (kN/m ²)	58300	82400	115300	-	-
ν_{ur}	0,2	0,2	0,2	-	-
m_r	0,59	0,56	0,51	-	-
ϕ (°)	31,32	33,17	35,86	-	-
ψ (°)	1,32	3,17	5,86	-	-
R_{inter}	0,79	0,81	0,85	-	-
E (kN/m ²)	-	-	-	200000×10^3	39200×10^3
ν	-	-	-	0,3	0,2



Şekil 3.44. Kazıklı radye sayısal analiz modelinde örnek bir tasarımda sıkılaştırma bölgeleri: a) Plan, b) Profil



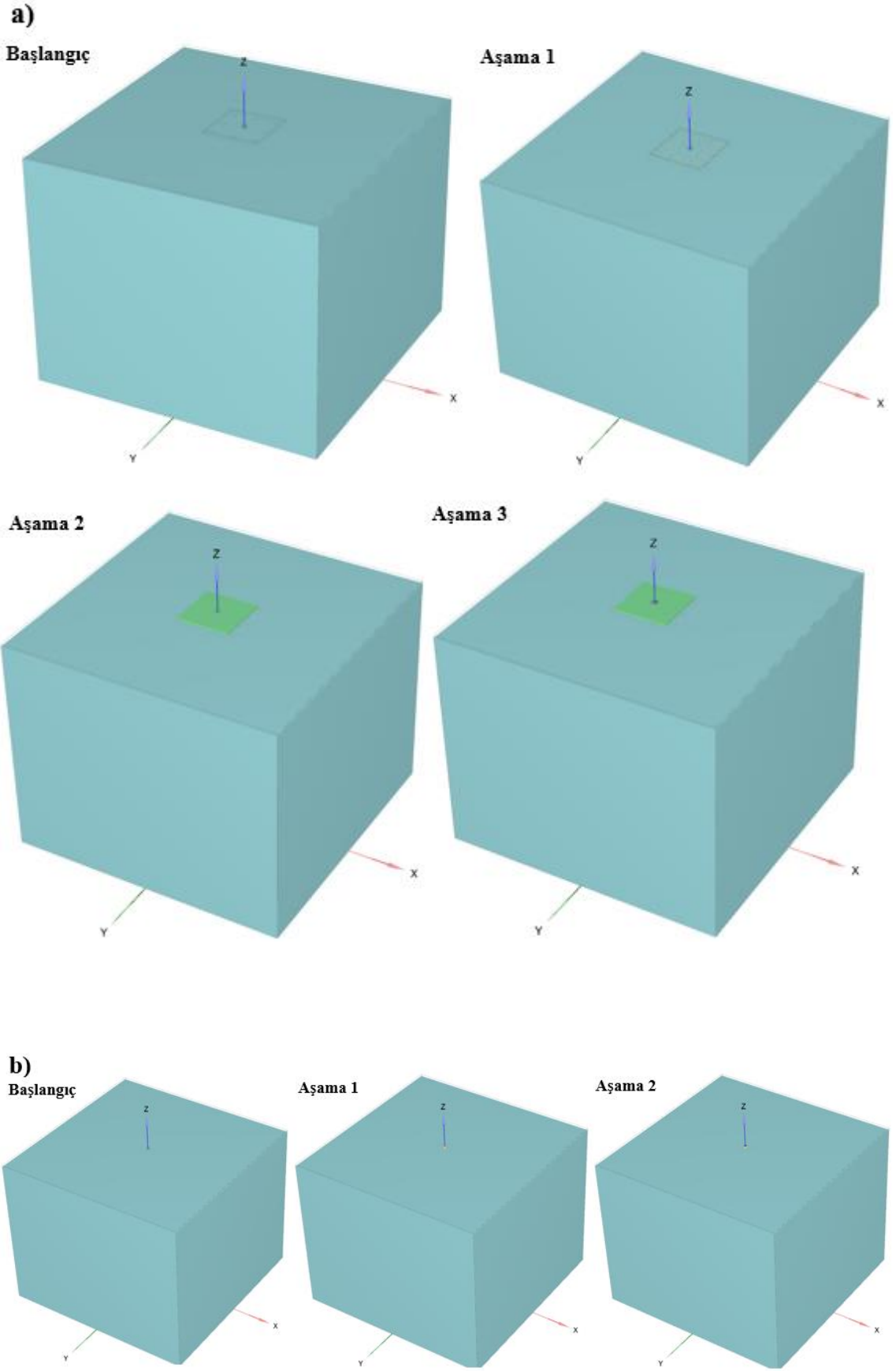
Şekil 3.45. Tekil kazık sayısal analiz modelinde sıkılaştırma bölgeleri: a) Plan, b) Profil



Şekil 3.46. Sayısal analizlerde ağ eleman sıklığının etkisi: a) Kazıklı radye, b) Tekil kazık

Çizelge 3.9. Sayısal analizlerde sonlu eleman ağı eleman sayıları

Kazıklı Radye		Tekil kazık	
Tasarım	Ağ Eleman Sayısı	Tasarım	Ağ Eleman Sayısı
T1	69144	L25Dr65	41423
T2	108999	L20Dr65	38092
T3	206722	L15Dr65	34827
T4	129705	L25Dr50	41423
T5	91868	L20Dr50	38092
T6	166160	L15Dr50	34827
T7	108338	L25Dr35	41423
T8	180938	L20Dr35	38092
T9	132629	L15Dr35	34827



Şekil 3.47. Örnek bir modelin analiz aşamaları: a) Kazıklı radye, b) Tekil kazık

4. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA

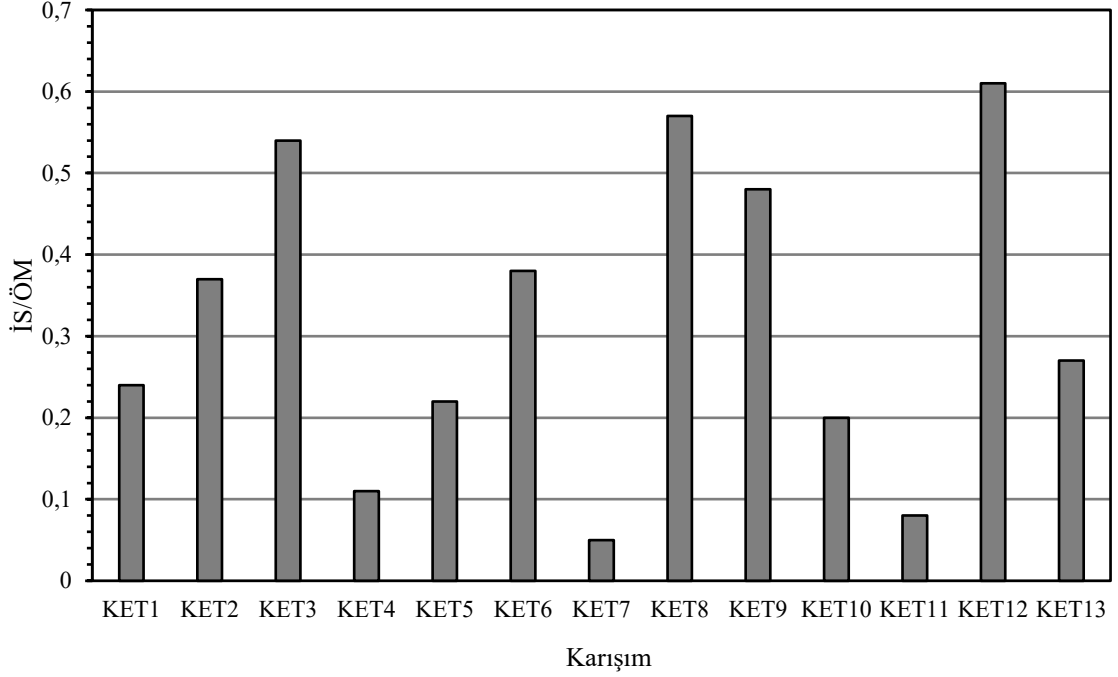
4.1. KET ile Performans Değerlendirmesi

4.1.1. KET karışımlarının yayılma değerleri

KET tablosundaki karışımlar için yapılan yayılma tablası deney sonuçlarına göre 17 cm yayılma değerlerine karşılık gelen İS/ÖM oranları Şekil 4.1’de verilmiştir. Bu veriler dikkate alınarak yapılan ANOVA sonuçları Çizelge 4.1’de sunulmuştur. Oluşturulan modelin R^2 değeri 0,986 olup doğrusal bir modeldir. İstenen 17 cm yayılma değerinin elde edildiği kıvam için gerekli İS/ÖM oranları, en düşük olarak KET7 karışımında 0,05 değeriyle ve en yüksek olarak KET12 karışımında 0,61 değeriyle elde edilmiştir. F-değeri ve p-değeri incelendiğinde İS/ÖM oranlarının değişimini en çok etkileyen değişkenlerin AÇ/ÖM ile GDBA/ÖM oranı olduğu bu değişkenleri YFC/ÖM ile SD/ÖM oranlarının izlediği belirlenmiştir. SS/SH oranı ve SH molaritesinin etkisi ise yok denecek kadar az olmuştur. AÇ/ÖM, SD/ÖM ve YFC/ÖM oranlarının artması gerekli İS/ÖM oranının azalmasına neden olurken GDBA/ÖM oranının artması İS/ÖM oranını artırmıştır. Bu durumun meydana gelmesi oldukça doğaldır; çünkü AÇ içerisinde mevcut olan su nedeniyle AÇ miktarının artması doğrudan istenen kıvam için gerekli İS miktarını azaltmaktadır. YFC ve SD ise tane yapıları ve şekilleri dikkate alındığında işlenebilirlik için faydalı olmuş; fakat GDBA miktarının artışı GDBA’nın hidrofil bir yapıda olan yapışık çimento harcı nedeniyle gerekli İS miktarını artırmıştır. Çünkü hidrofil yapıdaki GDBA’nın yapışık harcı fazla su absorbe eder ve gerekli akıcılık için istenen İS miktarını artırır veya belli İS miktarı için yayılma değerini azaltır (İpek, 2022).

Çizelge 4.1. KET yayılma değerleri ANOVA sonuçları ve model formülü katsayıları

Kaynak	Kareler Toplamı	Serbestlik Derecesi	Ortalama Kare	F-değeri	p-değeri	Model Formülü Katsayısı
Model	0,42855	6	0,07143	72,31	< 0,0001	0,379 (sabit)
SD/ÖM	0,02500	1	0,02500	25,31	0,002	-0,5000
YFC/ÖM	0,03364	1	0,03364	34,05	< 0,001	-0,5800
SS/SH	0,00009	1	0,00009	0,09	0,0773	0,0040
SH Molaritesi	0,00081	1	0,00081	0,82	0,400	0,0045
AÇ/ÖM	0,21025	1	0,21025	212,84	< 0,0001	-0,7250
GDBA/ÖM	0,15876	1	0,15876	160,72	< 0,0001	0,2520
Hata	0,00593	6	0,00099			
Toplam	0,43448	12				

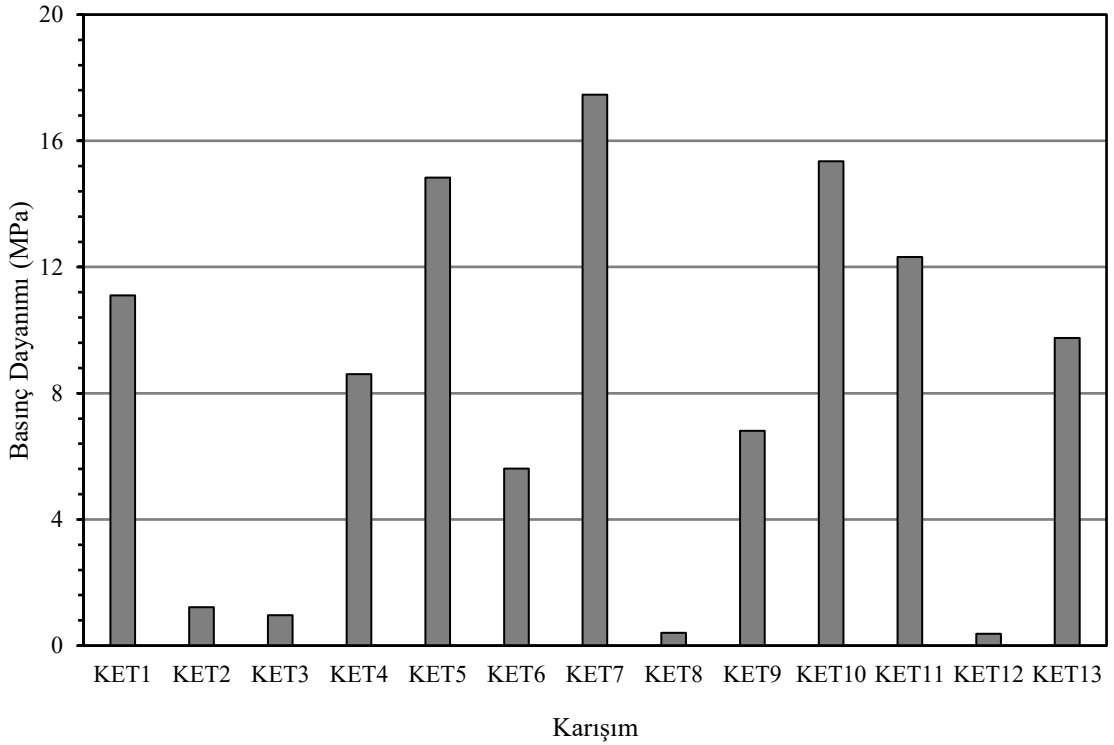


Şekil 4.1. KET için 17 cm yayılma değerine karşılık gelen İS/ÖM oranları

4.1.2. KET karışımlarının basınç dayanımları

KET için basınç dayanımı deney sonuçları Şekil 4.2’de verilmiş ve ANOVA sonuçları Çizelge 4.2’de gösterilmiştir. Oluşturulan modelin R^2 değeri 0,849 olup doğrusal bir modeldir. En yüksek basınç dayanımı 17,46 MPa ile KET7’de ve en düşük basınç dayanımı 0,38 MPa ile KET12’de elde edilmiştir. F-değeri ve p-değeri incelendiğinde basınç dayanımlarının en çok AÇ/ÖM ile GDBA/ÖM değişkenlerinden etkilenmiş olduğu YFC/ÖM ile SD/ÖM oranlarının bunlara göre basınç dayanımının değişimini daha az etkilediği görülmüştür. SS/SH ise SD/ÖM ve YFC/ÖM etkisinin yaklaşık yarısı kadar bir etkiyle basınç dayanımlarını etkilemiştir. SH molaritesinin etkisi ise oldukça az olmuştur. GDBA/ÖM dışındaki tüm değişkenlerin değerlerinde artış ile basınç dayanımında bir artış gözlenirken GDBA/ÖM oranının artması basınç dayanımında kayda değer bir azalma meydana getirmiştir. YFC’nin CaO içeriği nedeniyle dayanım kazanmaya katkı sağlaması, SD’nin SiO₂ içeriğinin fazla olması ve geopolimerde SiO₂ artışıyla beraber yüksek dayanımlar elde edilmesi YFC ve SD’nin basınç dayanımına olumlu katkısı olarak gösterilebilir. SS’nin geopolimerleşme reaksiyonlarının daha sağlıklı bir şekilde gerçekleşmesine katkı sağlayacak bir etkisinin olduğu bilinmektedir. Bu nedenle SS/SH oranının artmasıyla daha yüksek basınç dayanımına sahip numuneler üretilmesi mümkün olmuştur. GDBA artışıyla beraber

geopolimer harç bünyesindeki ÖM, dolayısıyla bağlayıcı nitelikteki malzemeler, azaldığından doğal olarak dayanımda azalma meydana gelmiştir. SD oranının artmasıyla karışımlardaki ince taneli ÖM miktarında artış olması geopolimerizasyonun daha sağlıklı bir şekilde gerçekleşmesine katkı sağlamıştır (Somna ve diğ., 2011). İnce taneli SD'nin geopolimer harcın mikro yapısına daha iyi dağılması ve boşlukları daha iyi doldurması (Okoye ve diğ., 2015) SD kullanımını bu bakımdan avantajlı hale getirmektedir. SD'nin SiO_2 içeriğini artırması ile geopolimer harçtaki $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ oranında ve dolayısıyla da dayanımda artış meydana gelmektedir (Chindaprasirt ve diğ., 2012; Jena ve diğ., 2019). Geopolimer karışımındaki YFC karışıma CaO takviyesi yaptığından, SD'li karışımların oda koşullarında daha iyi bir şekilde kür edilmesini sağlamıştır. Yüksek CaO miktarı, geopolimerizasyon için gerekli ısının hidrasyon reaksiyonları ile ortaya çıkmasına neden olabilir. Böylece, geopolimerizasyon stabilitesinin sağlanabilmesi için gerekli ısı ihtiyacı azaltılabilir (Rafeet ve diğ., 2019). Ayrıca YFC, UK'ye göre geopolimerleşme için daha reaktif bir amorf yapıdadır (Wang ve diğ., 2022). AÇ/ÖM artışı ile aslında İS/ÖM oranı azaldığından dayanımda artış olması olağan bir sonuçtur. Çünkü İS'nin tek görevi gerekli kıvamı sağlamaktır, dayanıma azaltıcı yönde bir etkisi vardır.



Şekil 4.2. KET için basınç dayanımları

Çizelge 4.2. KET basınç dayanımı ANOVA sonuçları ve model formülü katsayıları

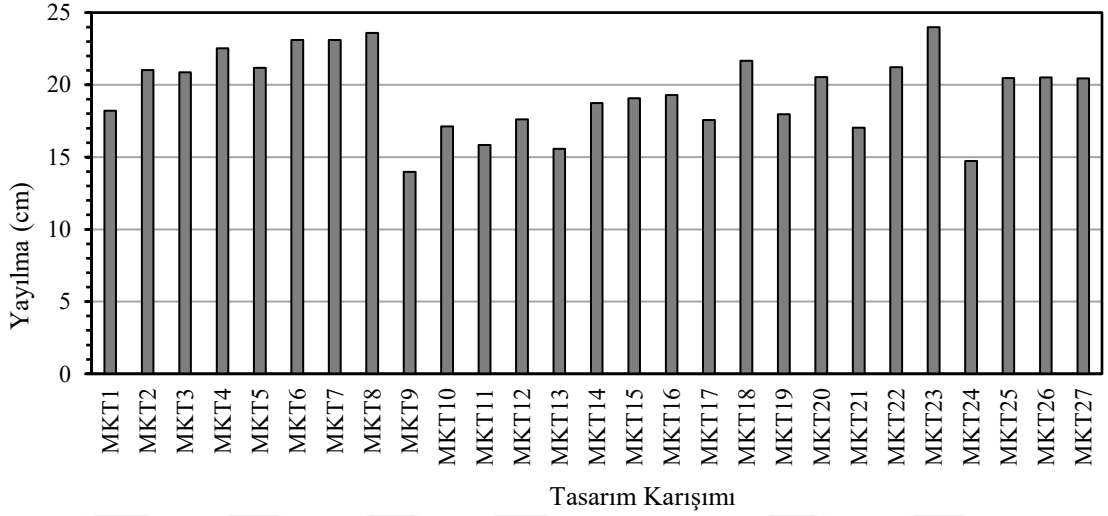
Kaynak	Kareler Toplamı	Serbestlik Derecesi	Ortalama Kare	F-değeri	p-değeri	Model Formülü Katsayısı
Model	373,722	6	62,287	5,62	0,027	-7,100 (sabit)
SD/ÖM	48,514	1	48,514	4,38	0,081	22,000
YFC/ÖM	50,702	1	50,702	4,57	0,076	22,500
SS/SH	25,313	1	25,313	2,28	0,182	2,120
SH Molaritesi	3,938	1	3,938	0,36	0,573	0,314
AÇ/ÖM	139,181	1	139,181	12,55	0,012	18,650
GDBA/ÖM	106,074	1	106,074	9,57	0,021	-6,510
Hata	66,517	6	11,086			
Toplam	440,239	12				

4.2. MKT ile Performans Değerlendirmesi ve Optimizasyon Çalışması

4.2.1. MKT karışımlarının yayılma değerleri

Yayılma tablası deneyi sonuçları Şekil 4.3'te verilmiştir. En yüksek yayılma değeri 24,0 cm ile MKT23 ve en düşük yayılma değeri 14,0 cm değeri ile MKT9 karışımı için elde edilmiştir. Yayılma değerleri için ikinci dereceden bir model kurulmuş (Eşitlik 4.1) ve ANOVA yapılmıştır (Çizelge 4.3). Bu modelin R^2 , düzeltilmiş R^2 (R^2_d) ve tahmin edilen R^2 (R^2_t) değerleri sırasıyla 0,99, 0,98 ve 0,96 olarak elde edilmiştir. Bu göstergelerle beraber p-değerinin 0,05'ten küçük olması modelin istatistiksel olarak anlamlı olduğuna işaret etmiştir. Yüksek F-değerleri ve düşük p-değerlerine sahip olan bütün değişkenlerin ana etki terimlerinin yayılma üzerinde etkili olduğu belirlenmiştir. Buna karşın değişkenlerin etkileşim terimleri ile ikinci dereceden terimleri yayılma davranışı üzerinde oldukça düşük bir etkiye sahip olmuştur. Değişkenlerin yayılma üzerindeki etkisinin değişen seviyelerine bağlı olarak etkisi model için oluşturulan yüzey grafikleri ile değerlendirilmiştir (Şekil 4.4). SD/ÖM oranının artmasıyla yayılma değerinin önce sürekli bir şekilde arttığı, SD/ÖM oranının yüksek seviyelerinde bu artışın azaldığı görülmüştür. SD'nin küresel tane yapısı bir yağlama etkisi meydana getirerek işlenebilirliği iyileştirir (Liv ve diğ., 2022) ve ince taneli yapıda olması nedeniyle yapısına aldığı AÇ ve İS'nin tüm karışım içinde daha iyi ve homojen bir şekilde dağılmasına katkıda bulunarak yayılma değerlerinin yüksek olmasını sağlar. YFC/ÖM oranı için ise bir optimum noktanın varlığı tespit edilmiştir. Buna göre, YFC'nin belirli bir miktarı aşmasıyla beraber reaksiyonların hızlandırılmış şekilde gerçekleşmeye başlaması ile işlenebilirlik özelliği kötüleşebilmektedir (Nath ve Sarker, 2014). AÇ/ÖM oranının

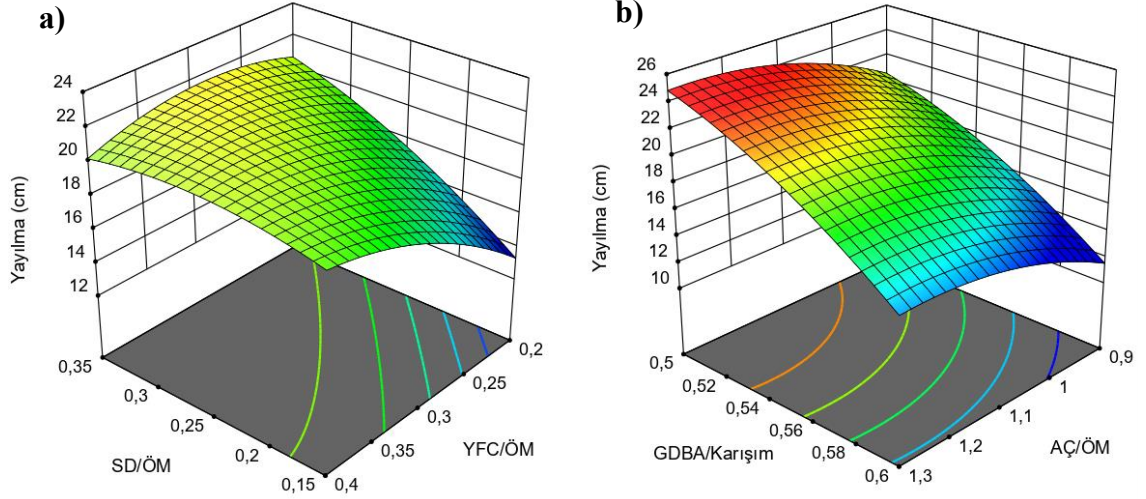
artması aynı zamanda karışımdaki su miktarını da artırdığından doğal olarak daha işlenebilir (akıcı) kıvamda GGH üretilmesine imkan vermiştir. GDBA/Karışım oranının artmasıyla yayılma değerlerinde azalma meydana gelmiştir. GDBA'nın köşeli yüzeyi sürtünmeyi artırmış ve karışımdaki tanelerin yerleşimini bozmuştur. Ayrıca GDBA'nın yapışık çimento harcı bileşeni işlenebilirlik için gerekli suyun bir kısmını yapısına almış ve yayılma değerlerinin azalmasına neden olmuştur. Ek olarak, KET yayılma değerleri için yapılan yorumların bir kısmı MKT yayılma değerleri için de geçerli olmaktadır.



Şekil 4.3. MKT için yayılma değerleri

Çizelge 4.3. MKT yayılma değerleri için ANOVA sonuçları ve model formülü katsayıları

Kaynak	Kareler Toplamı	Serbestlik Derecesi	Ortalama Kare	F-değeri	p-değeri	Model Formülü Katsayısı
Model	195,43	14	13,96	111,47	<0,0001	-152,72 (sabit)
SD/ÖM	22,89	1	22,89	182,81	<0,0001	122,48
YFC/ÖM	13,68	1	13,68	109,24	<0,0001	134,10
AÇ/ÖM	25,79	1	25,79	205,96	<0,0001	95,36
GDBA/Karışım	125,77	1	125,77	1004,28	<0,0001	364,00
SD/ÖM×YFC/ÖM	2,99	1	2,99	23,90	0,0004	-173,00
SD/ÖM×AÇ/ÖM	0,8100	1	0,8100	6,47	0,0258	-45,00
SD/ÖM×GDBA/Karışım	0,1225	1	0,1225	0,9782	0,3422	70,00
YFC/ÖM×AÇ/ÖM	0,0000	1	0,0000	0,0000	1,0000	0,00
YFC/ÖM×GDBA/Karışım	0,0025	1	0,0025	0,0200	0,8900	-10,00
AÇ/ÖM×GDBA/Karışım	0,0025	1	0,0025	0,0200	0,8900	-5,00
(SD/ÖM) ²	0,8551	1	0,8551	6,83	0,0227	-80,08
(YFC/ÖM) ²	1,83	1	1,83	14,60	0,0024	-117,08
(AÇ/ÖM) ²	2,22	1	2,22	17,74	0,0012	-32,27
(GDBA/Karışım) ²	1,49	1	1,49	11,87	0,0048	-422,33
Hata	1,50	12	0,1252			
Toplam	196,94	26				



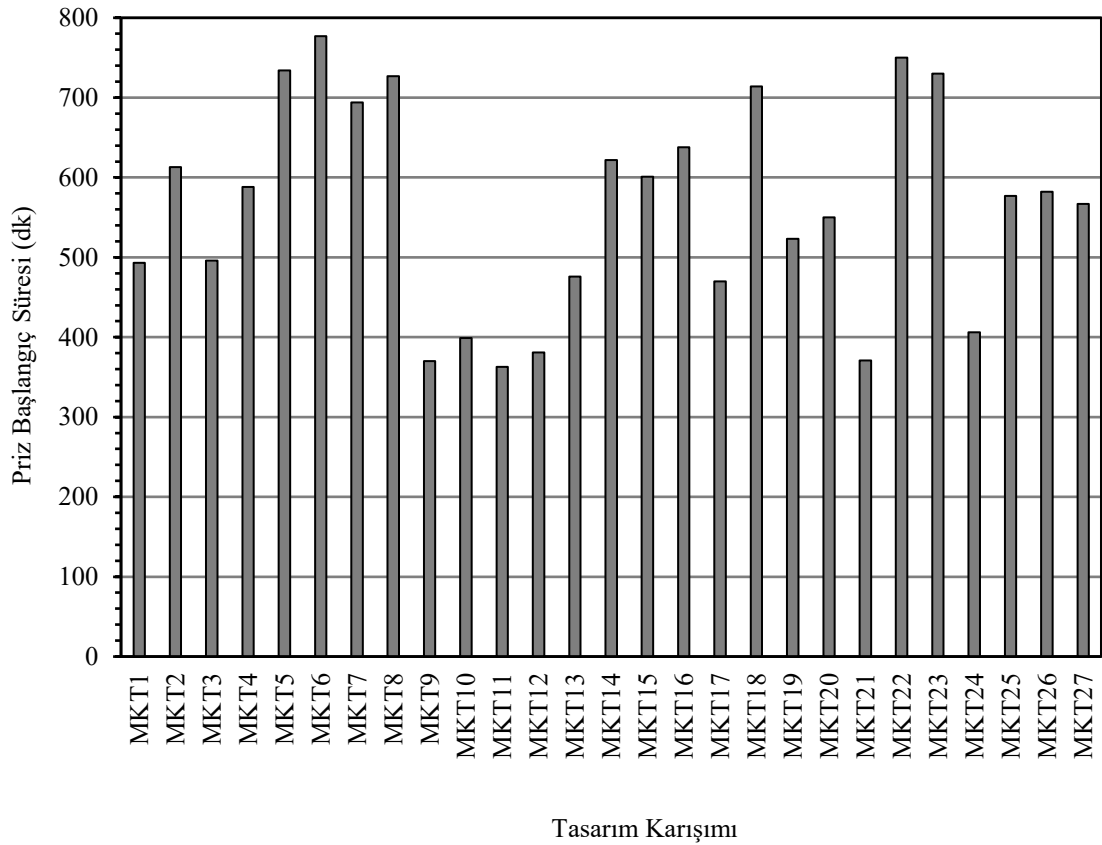
Şekil 4.4. MKT yayılma değerleri için yüzey grafikleri: a) SD/ÖM ve YFC/ÖM, b) AÇ/ÖM ve GDBA/Karışım

$$\begin{aligned}
 Yayılma \text{ (cm)} = & 122,48 \times \left(\frac{SD}{\ddot{O}M} \right) + 134,10 \times \left(\frac{YFC}{\ddot{O}M} \right) + 95,36 \times \left(\frac{AÇ}{\ddot{O}M} \right) \\
 & + 364 \times \left(\frac{GDBA}{Karışım} \right) - 173 \times \left(\frac{SD}{\ddot{O}M} \times \frac{YFC}{\ddot{O}M} \right) - 45 \times \left(\frac{SD}{\ddot{O}M} \times \frac{AÇ}{\ddot{O}M} \right) \\
 & + 70 \times \left(\frac{SD}{\ddot{O}M} \times \frac{GDBA}{Karışım} \right) + 0 \times \left(\frac{YFC}{\ddot{O}M} \times \frac{AÇ}{\ddot{O}M} \right) - 10 \left(\frac{YFC}{\ddot{O}M} \times \frac{GDBA}{Karışım} \right) \\
 & - 5 \times \left(\frac{AÇ}{\ddot{O}M} \times \frac{GDBA}{Karışım} \right) - 80,08 \times \left(\frac{SD}{\ddot{O}M} \right)^2 - 117,08 \times \left(\frac{YFC}{\ddot{O}M} \right)^2 \\
 & - 32,27 \times \left(\frac{AÇ}{\ddot{O}M} \right)^2 - 422,33 \times \left(\frac{GDBA}{Karışım} \right)^2 - 152,72
 \end{aligned} \tag{4.1}$$

4.2.2. MKT karışımlarının priz başlangıç süreleri

Şekil 4.5'te verilen priz süresi deney sonuçlarına göre en uzun priz başlangıç süresi 778 dk ile MKT6 ve en kısa priz süresi 363 dk ile MKT11 karışımında elde edilmiştir. Priz başlangıç süresi için de diğer performans göstergeleri için olduğu gibi ikinci dereceden bir model oluşturulmuştur (Eşitlik 4.2). Bu modelin R^2 , R^2_d ve R^2_t değerlerinin sırasıyla 0,97, 0,93 ve 0,81 olması ve p-değerinin 0,05'ten küçük olması neticesinde modelin istatistiksel olarak anlamlı bir model olduğu belirlenmiştir (Çizelge 4.4). ANOVA sonuçları yüksek F-değerine ve düşük p-değerine sahip olan AÇ/ÖM, GDBA/Karışım ve SD/ÖM terimlerinin diğer terimlere göre priz süresi üzerinde daha etkili olduğunu göstermiştir. Model için oluşturulmuş yüzey grafikleri ile değişkenlerin priz başlangıç süresi üzerindeki etkileri değerlendirilmiştir (Şekil 4.6). SD/ÖM ve AÇ/ÖM oranlarının artmasıyla priz başlangıç süresinin sürekli uzadığı belirlenmiştir.

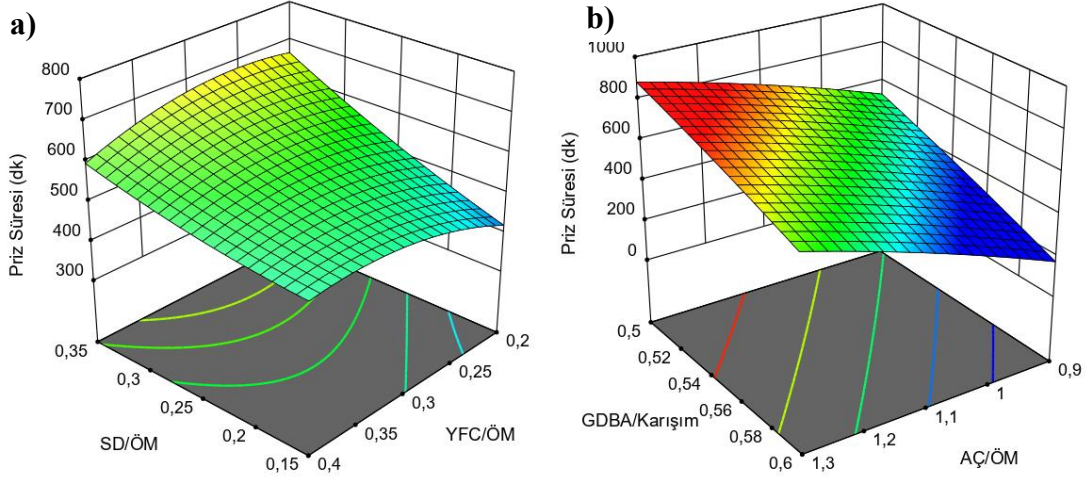
SD/ÖM oranının yüksek olması Si/Al oranını artırarak ve geopolimerizasyon için gerekli AÇ'yi seyrelterek priz başlangıcı boyunca gerçekleşebilecek geopolimerizasyon reaksiyonlarını yavaşlatabilir. Bu durum da priz başlangıç süresinin uzamasına neden olabilir. YFC'nin priz süresi üzerindeki etkisi belirlenememiştir (neredeyse yok denecek kadar azdır.). Bunun nedeni de UK, YFC ve SD'nin beraber kullanılmasıyla diğer iki ÖM bileşeni tarafından YFC'nin etkisinin gölgelenmiş olması ihtimali veya diğer değişkenlerin etkisinin YFC'ye göre çok yüksek olmasıdır. AÇ/ÖM oranının artmasıyla su içeriğinin de artması priz başlangıç süresinin uzamasına neden olmuştur. GDBA/Karışım oranının artması ise priz başlangıç süresi üzerinde doğrudan kısaltıcı bir etkiye sahip olmuştur. GDBA'nın yapışık çimento harcındaki Ca(OH)_2 ve yüksek su emme kapasitesi karışımdaki serbest suyun azalmasına ve priz başlangıç süresinde kısaltmaya neden olmuştur (Pasupathy ve diğ., 2021).



Şekil 4.5. MKT priz başlangıç süreleri

Çizelge 4.4. MKT priz başlangıç süreleri için ANOVA sonuçları ve model formülü katsayıları

Kaynak	Kareler Toplamı	Serbestlik Derecesi	Ortalama Kare	F-değeri	p-değeri	Model Formülü Katsayısı
Model	4,306E+05	14	3,076E+04	25,3700	<0,0001	1,91E+03 (sabit)
SD/ÖM	4,217E+04	1	4,217E+04	34,7800	<0,0001	2,90E+03
YFC/ÖM	1,402E+02	1	1,402E+02	0,1156	0,7397	-4,11E+03
AÇ/ÖM	2,250E+05	1	2,250E+05	185,6100	<0,0001	4,18E+02
GDBA/Karışım	1,536E+05	1	1,536E+05	126,6900	<0,0001	-3,90E+03
SD/ÖM×YFC/ÖM	1,560E+03	1	1,560E+03	1,2900	0,2788	-3,95E+03
SD/ÖM×AÇ/ÖM	0,000E+00	1	0,000E+00	0,0000	1,000	-5,31E-11
SD/ÖM×GDBA/Karışım	2,103E+02	1	2,103E+02	0,1734	0,6844	-2,90E+03
YFC/ÖM×AÇ/ÖM	6,003E+02	1	6,003E+02	0,4951	0,4951	1,23E+03
YFC/ÖM×GDBA/Karışım	3,249E+03	1	3,249E+03	2,6800	0,1276	1,14E+04
AÇ/ÖM×GDBA/Karışım	4,203E+02	1	4,203E+02	0,3466	0,5669	2,05E+03
(SD/ÖM) ²	2,739E+02	1	2,739E+02	0,2259	0,6431	1,43E+03
(YFC/ÖM) ²	2,260E+03	1	2,260E+03	1,8600	0,1972	-4,12E+03
(AÇ/ÖM) ²	3,929E+02	1	3,929E+02	0,3241	0,5797	-4,29E+02
(GDBA/Karışım) ²	1,246E+02	1	1,246E+02	0,1028	0,7541	-3,87E+03
Hata	14,549E+03	12	1,212E+03			
Toplam	4,45E+05	26				



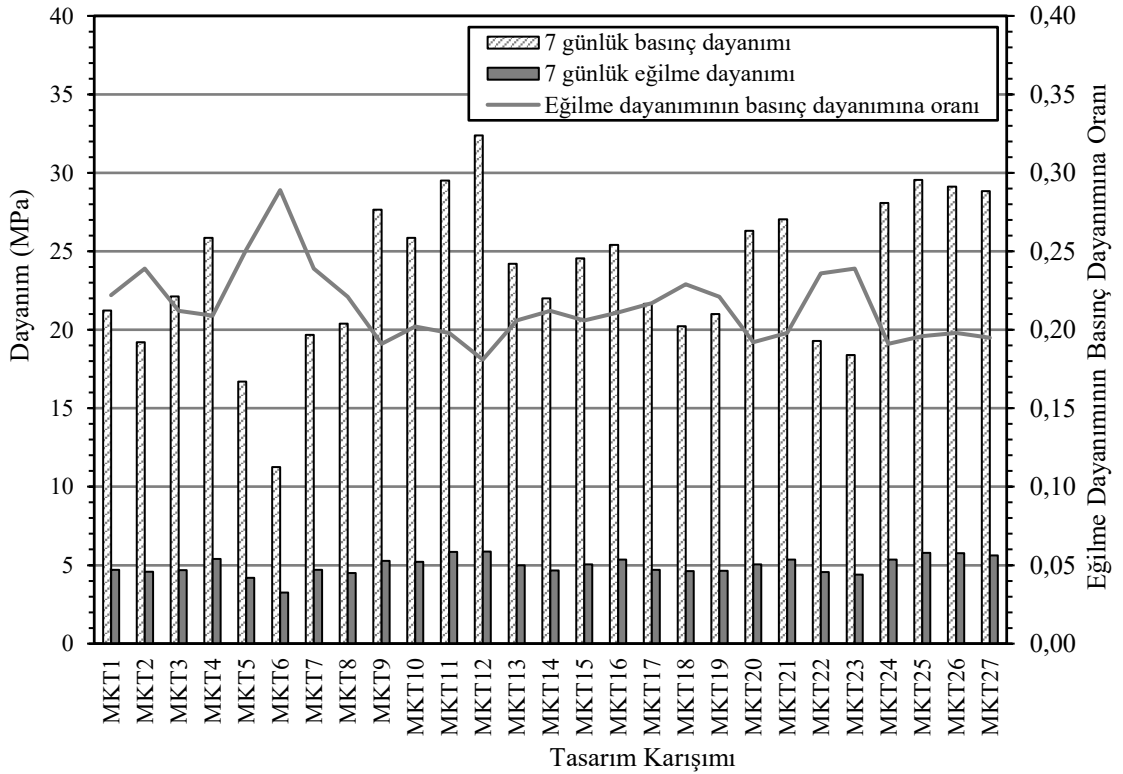
Şekil 4.6. MKT Priz başlangıç süreleri için yüzey grafikleri: a) SD/ÖM ve YFC/ÖM, b) AÇ/ÖM ve GDBA/Karışım

$$\begin{aligned}
\text{Priz başlangıcı (dk)} = & 2,90E+03 \times \left(\frac{SD}{\ddot{O}M}\right) - 4,11E+03 \times \left(\frac{YFC}{\ddot{O}M}\right) + 4,18E+02 \times \left(\frac{A\check{C}}{\ddot{O}M}\right) \\
& - 3,90E+03 \times \left(\frac{GDBA}{Karışım}\right) - 3,95E+03 \times \left(\frac{SD}{\ddot{O}M} \times \frac{YFC}{\ddot{O}M}\right) - 5,31E-11 \times \left(\frac{SD}{\ddot{O}M} \times \frac{A\check{C}}{\ddot{O}M}\right) \\
& - 2,90E+03 \times \left(\frac{SD}{\ddot{O}M} \times \frac{GDBA}{Karışım}\right) + 1,23E+03 \times \left(\frac{YFC}{\ddot{O}M} \times \frac{A\check{C}}{\ddot{O}M}\right) + 1,14E+04 \times \left(\frac{YFC}{\ddot{O}M} \times \frac{GDBA}{Karışım}\right) \\
& + 2,05E+03 \times \left(\frac{A\check{C}}{\ddot{O}M} \times \frac{GDBA}{Karışım}\right) + 1,43E+03 \times \left(\frac{SD}{\ddot{O}M}\right)^2 - 4,12E+03 \times \left(\frac{YFC}{\ddot{O}M}\right)^2 \\
& - 4,29E+02 \times \left(\frac{A\check{C}}{\ddot{O}M}\right)^2 - 3,87E+03 \times \left(\frac{GDBA}{Karışım}\right)^2 + 1,91E+03
\end{aligned} \tag{4.2}$$

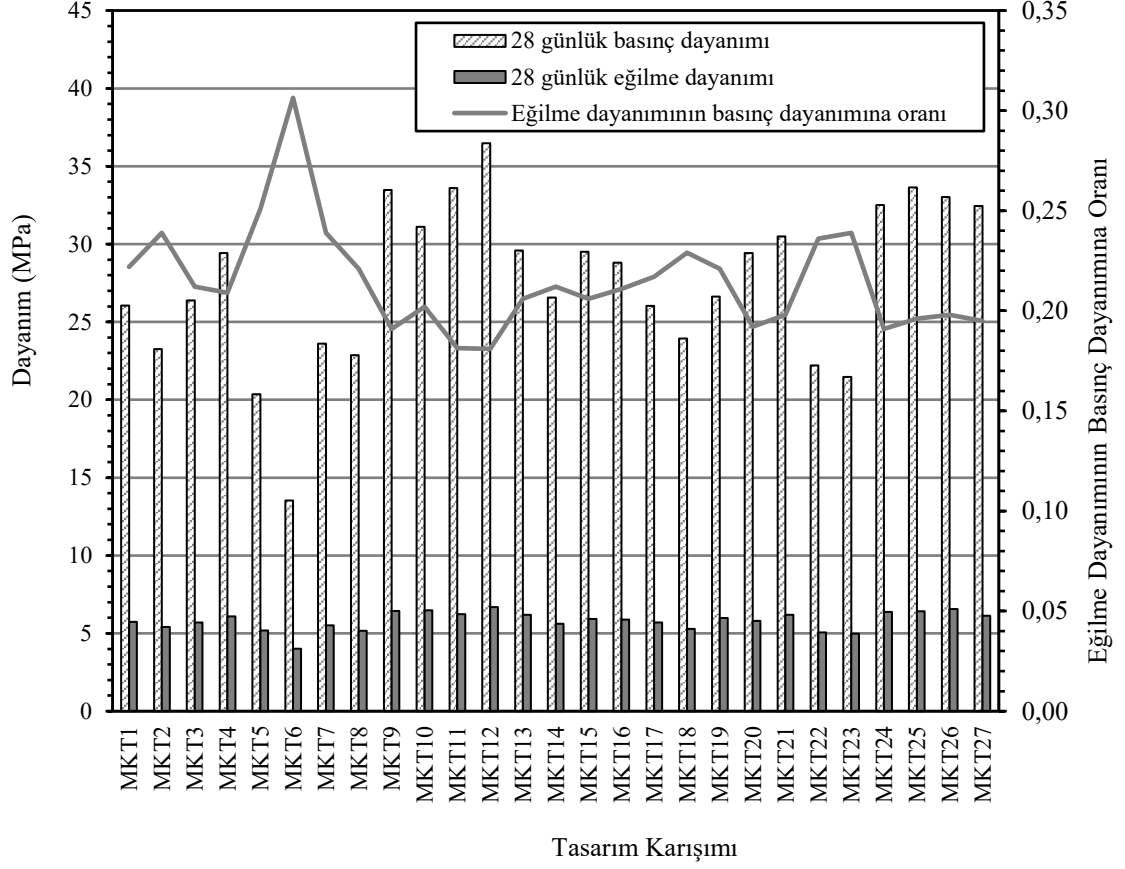
4.2.3. MKT karışımlarının basınç ve eğilme dayanımları

Oda koşullarında 7 ve 28 günlük kür sonunda yapılan basınç ve eğilme dayanımı deneyi sonuçları Şekil 4.7 ve Şekil 4.8’de verilmiştir. En büyük basınç dayanımı 7 günlük kür sonunda 32,39 MPa ile MKT12 ve en küçük basınç dayanımı 11,26 MPa ile MKT6 karışımında (Şekil 4.7); 28 günlük kür sonunda en büyük basınç dayanımı 36,48 MPa ile MKT12 ve en küçük basınç dayanımı 13,53 MPa ile MKT6 karışımında (Şekil 4.8) elde edilmiştir. En büyük eğilme dayanımı 7 günlük kür sonunda 5,86 MPa ile MKT12 ve en küçük eğilme dayanımı 3,25 MPa ile MKT6 karışımında (Şekil 4.7); 28 günlük kür sonunda en büyük eğilme dayanımı 6,68 MPa ile MKT12 ve en küçük eğilme dayanımı 4,02 MPa ile MKT6 karışımında (Şekil 4.8) elde edilmiştir. Eğilme dayanımının basınç dayanımına oranı 7 günlük dayanımlar için 0,181–0,289 arasında ve 28 günlük dayanımlar için 0,181–0,306 arasında değişmiştir. Deney sonuçları kullanılarak ANOVA yapılmış ve ikinci dereceden modellerin (Eşitlik 4.3–4.6) uygun olduğu belirlenmiştir (Çizelge 4.5–4.8). Bu modellerin R^2 , R^2_d ve R^2_t değerleri Çizelge 4.9’da verilmiştir. R^2 değerlerinin yüksek olması ve p-değerlerinin 0,05’ten küçük olması bu modellerin istatistiksel olarak anlamlı ve güvenilir olduğunu göstermiştir. ANOVA ve basınç dayanımı deney sonuçlarına göre basınç dayanımı üzerinde, yüksek F-değerlerine ve düşük p-değerlerine sahip olan GDBA/Karışım, AÇ/ÖM, YFC/ÖM, $(SD/ÖM)^2$ ve $(AÇ/ÖM)^2$ terimleri çok etkili olmuştur. Etkileşim terimleri ile SD/ÖM oranının ana etki terimi basınç dayanımlarının değişiminde önemli bir şekilde etkili olamamıştır. Benzer bir durum eğilme dayanımları için de geçerli olmuştur (Fakat, 28 günlük eğilme dayanımında YFC/ÖM ana etki terimi diğer modellerdeki kadar etkili olmamıştır). Oluşturulan modellere göre çizilen yüzey grafikleri (Şekil 4.9–4.12), değişkenlerin basınç ve eğilme dayanımlarına etkisinin belirli bir optimum seviyesinin olduğunu göstermiştir. Genel olarak değişkenlerin belirli bir optimum seviyesine kadar dayanımlar önce artmış, optimum noktadan sonra azalmıştır. SD’nin yüksek puzolanik reaktivitesi ve Si-O-Al yapısının yanında C-S-H oluşumuna katkı sağlaması dayanımı artırmasını sağlamıştır. SD’nin belirli bir seviyenin üzerindeki bir miktarda kullanılması ise GGH içerisindeki Si/Al dengesinin bozulmasına ve dayanım azalmasına neden olur (De Silva ve diğ., 2007; Khater, 2013). KET ile yapılan değerlendirmelerde de belirtildiği gibi YFC’nin UK’ye kıyasla dayanıma ek katkısı, C-S-H oluşumuna neden olan içerdiği CaO’dan kaynaklanabilir (Rafeet ve diğ., 2019). Dahası, YFC’nin amorf yapısı UK’ye göre geopolimerizasyon reaksiyonları için daha aktif olmasına neden olur ve

geopolimerizasyonun gerçekleşebilmesi için gerekli ısıyı azaltarak bu reaksiyonların kararlı bir şekilde gerçekleşmesini sağlar (Wang ve diğ., 2022). SD'nin yüksek oranlarında kullanılması durumunda olduğu gibi YFC'nin de belirli bir seviyeden daha fazla miktarda kullanılması geopolimerizasyon için gerekli ve uygun kimyasal içerik dengesini bozabilir. AÇ/ÖM oranının artması aynı zamanda karışımdaki su miktarını da artıracığından AÇ/ÖM oranının artmasıyla basınç dayanımında azalma meydana gelmesi doğal bir sonuç olmuştur. GDBA'nın içerdiği yapışık çimento harcı geopolimerizasyonda ek bir bağlayıcı malzeme gibi davranarak GGH'nin dayanımını artırmıştır. Fakat, optimum bir seviyeden sonra GDBA miktarının artması; GDBA'nın yüksek geçirimsizliği, su emme kapasitesi ve kırmataşa göre daha zayıf yapışık çimento harcı miktarının gereğinden fazla artması nedeniyle basınç dayanımını azaltır (Thomas ve diğ., 2022). GGH'nin eğilme dayanımlarının benzer basınç dayanımlarına sahip çimentolu harçlara göre yüksek olduğu belirlenmiştir. Geopolimerli malzemelerde yüksek eğilme dayanımı değerleri Huseien ve diğ. (2018) tarafından da gözlenmiş, Nuaklong ve diğ. (2018) AÇ ve ÖM özelliklerine göre eğilme dayanımı yüksek olan geopolimer malzemelerin üretilmesinin mümkün olduğunu belirtmişlerdir.



Şekil 4.7. MKT için 7 günlük kür sonunda basınç ve eğilme dayanımları



Şekil 4.8. MKT için 28 günlük kür sonunda basınç ve eğilme dayanımları

Çizelge 4.5. MKT 7 günlük basınç dayanımları için ANOVA sonuçları ve model formülü katsayıları

Kaynak	Kareler Toplamı	Serbestlik Derecesi	Ortalama Kare	F-değeri	p-değeri	Model Formülü Katsayısı
Model	580,6100	14	41,4700	27,8800	<0,0001	-1014,36 (sabit)
SD/ÖM	1,5700	1	1,5700	1,0500	0,3252	295,73
YFC/ÖM	74,8700	1	74,8700	50,3300	<0,0001	441,55
AÇ/ÖM	126,6400	1	126,6400	85,1300	<0,0001	310,22
GDBA/Karışım	231,0700	1	231,0700	155,3300	<0,0001	2703,8
SD/ÖM×YFC/ÖM	24,2300	1	24,2300	16,2900	0,0017	492,25
SD/ÖM×AÇ/ÖM	4,9200	1	4,9200	3,3100	0,0941	-110,88
SD/ÖM×GDBA/Karışım	0,4865	1	0,4865	0,3270	0,5780	139,5
YFC/ÖM×AÇ/ÖM	0,0005	1	0,0005	0,0003	0,9856	-1,13
YFC/ÖM×GDBA/Karışım	3,5600	1	3,5600	2,3900	0,1477	-377,5
AÇ/ÖM×GDBA/Karışım	0,0798	1	0,0798	0,0536	0,8207	28,25
(SD/ÖM) ²	86,7300	1	86,7300	58,3000	<0,0001	-806,54
(YFC/ÖM) ²	38,0300	1	38,0300	25,5600	0,0003	-534,04
(AÇ/ÖM) ²	45,3300	1	45,3300	30,4700	0,0001	-145,76
(GDBA/Karışım) ²	44,1700	1	44,1700	29,6900	0,0001	-2302,17
Hata	17,85	12	1,49			
Toplam	598,4600	26				

Çizelge 4.6. MKT 7 günlük eğilme dayanımları için ANOVA sonuçları ve model formülü katsayıları

Kaynak	Kareler Toplamı	Serbestlik Derecesi	Ortalama Kare	F-değeri	p-değeri	Model Formülü Katsayısı
Model	7,56	14	0,5399	20,16	<0,0001	-122,07 (sabit)
SD/ÖM	0,0001	1	0,0001	0,0039	0,9513	39,28
YFC/ÖM	0,9087	1	0,9087	33,92	<0,0001	52,04
AÇ/ÖM	1,40	1	1,40	52,15	<0,0001	29,47
GDBA/Karışım	2,33	1	2,33	86,80	<0,0001	349,82
SD/ÖM×YFC/ÖM	0,4193	1	0,4193	15,65	0,0019	64,75
SD/ÖM×AÇ/ÖM	0,2525	1	0,2525	9,43	0,0097	-25,13
SD/ÖM×GDBA/Karışım	0,0352	1	0,0352	1,31	0,2743	37,50
YFC/ÖM×AÇ/ÖM	0,0431	1	0,0431	1,61	0,2289	10,38
YFC/ÖM×GDBA/Karışım	0,0495	1	0,0495	1,85	0,1990	-44,50
AÇ/ÖM×GDBA/Karışım	0,0518	1	0,0518	1,93	0,1898	22,75
(SD/ÖM) ²	1,43	1	1,43	53,28	<0,0001	-103,46
(YFC/ÖM) ²	0,9738	1	0,9738	36,35	<0,0001	-85,46
(AÇ/ÖM) ²	0,7492	1	0,7492	27,97	0,0002	-18,74
(GDBA/Karışım) ²	0,8847	1	0,8847	33,03	<0,0001	-325,83
Hata	0,3214	12	0,0268			
Toplam	7,88	26				

Çizelge 4.7. MKT 28 günlük basınç dayanımları için ANOVA sonuçları ve model formülü katsayıları

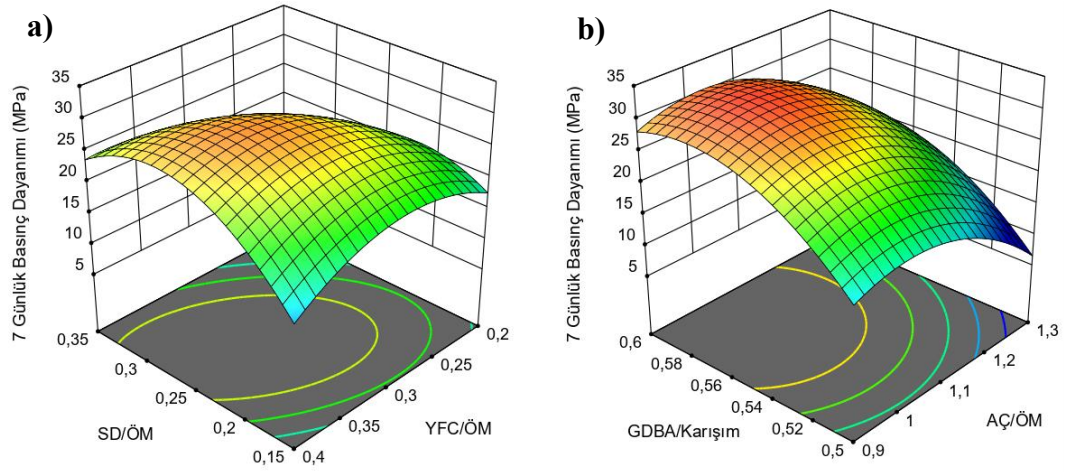
Kaynak	Kareler Toplamı	Serbestlik Derecesi	Ortalama Kare	F-değeri	p-değeri	Model Formülü Katsayısı
Model	668,63	14	47,76	21,19	<0,0001	-978,20 (sabit)
SD/ÖM	8,99	1	8,99	3,99	0,0690	277,70
YFC/ÖM	43,50	1	43,50	19,30	0,0009	459,04
AÇ/ÖM	157,66	1	157,66	69,95	<0,0001	285,54
GDBA/Karışım	306,77	1	306,77	136,11	<0,0001	2628,65
SD/ÖM×YFC/ÖM	23,79	1	23,79	10,55	0,0070	487,74
SD/ÖM×AÇ/ÖM	9,04	1	9,04	4,01	0,0684	-150,31
SD/ÖM×GDBA/Karışım	1,05	1	1,05	0,4665	0,5076	205,08
YFC/ÖM×AÇ/ÖM	0,4716	1	0,4716	0,2092	0,6555	34,34
YFC/ÖM×GDBA/Karışım	8,18	1	8,18	3,63	0,0810	-572,00
AÇ/ÖM×GDBA/Karışım	1,30	1	1,30	0,5781	0,4617	114,15
(SD/ÖM) ²	78,53	1	78,53	34,84	<0,0001	-767,43
(YFC/ÖM) ²	28,46	1	28,46	12,63	0,0040	-462,02
(AÇ/ÖM) ²	52,97	1	52,97	23,50	0,0004	-157,58
(GDBA/Karışım) ²	42,73	1	42,73	18,96	0,0009	-2264,43
Hata	27,05	12	2,25			
Toplam	695,67	26				

Çizelge 4.8. MKT 28 günlük eğilme dayanımları için ANOVA sonuçları ve model formülü katsayıları

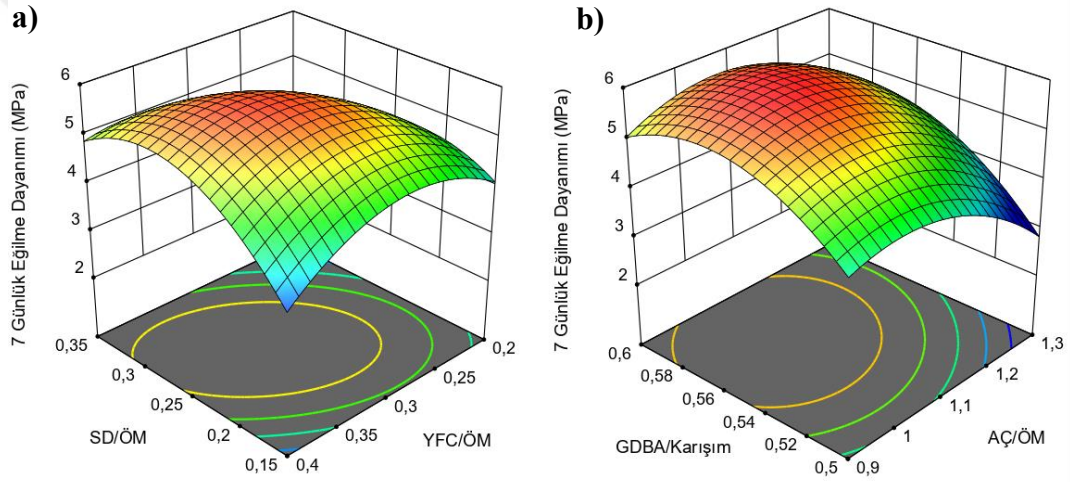
Kaynak	Kareler Toplamı	Serbestlik Derecesi	Ortalama Kare	F-değeri	p-değeri	Model Formülü Katsayısı
Model	8,91	14	0,6367	17,47	<0,0001	-102,75 (sabit)
SD/ÖM	0,2400	1	0,2400	6,58	0,0247	22,08
YFC/ÖM	0,1291	1	0,1291	3,54	0,0843	57,34
AÇ/ÖM	2,34	1	2,34	64,31	<0,0001	28,49
GDBA/Karışım	3,63	1	3,63	99,73	<0,0001	289,32
SD/ÖM×YFC/ÖM	0,3721	1	0,3721	10,21	0,0077	61,00
SD/ÖM×AÇ/ÖM	0,4556	1	0,4556	12,50	0,0041	-33,75
SD/ÖM×GDBA/Karışım	0,1056	1	0,1056	2,90	0,1144	65,00
YFC/ÖM×AÇ/ÖM	0,0462	1	0,0462	1,27	0,2821	10,75
YFC/ÖM×GDBA/Karışım	0,2756	1	0,2756	7,56	0,0176	-105,00
AÇ/ÖM×GDBA/Karışım	0,0441	1	0,0441	1,21	0,2929	21,00
(SD/ÖM) ²	0,8965	1	0,8965	24,60	0,0003	-82,00
(YFC/ÖM) ²	0,2352	1	0,2352	6,45	0,0259	-42,00
(AÇ/ÖM) ²	0,6348	1	0,6348	17,42	0,0013	-17,25
(GDBA/Karışım) ²	0,5461	1	0,5461	14,98	0,0022	-256,00
Hata	0,4374	12	0,0364			
Toplam	9,35	26				

Çizelge 4.9. MKT basınç ve eğilme dayanımları modellerinin R² ve p-değerleri

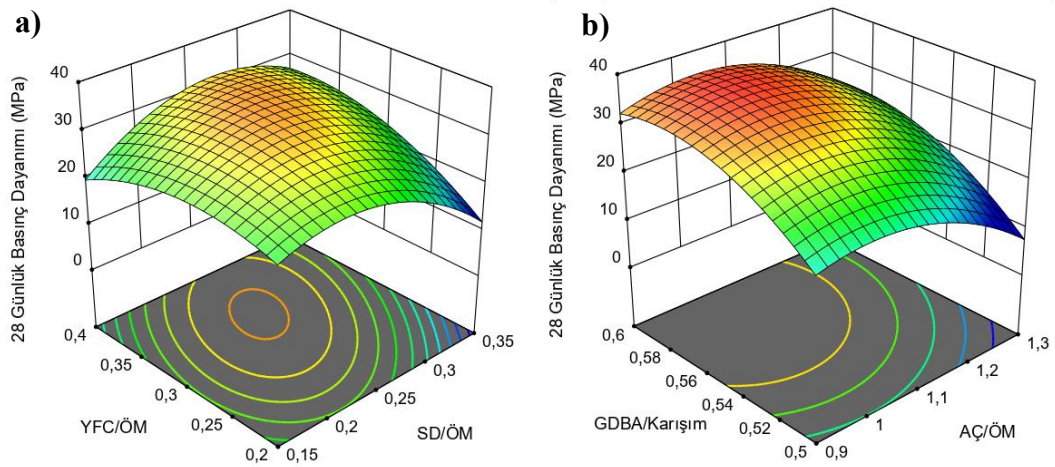
Model	R ²	R ² _d	R ² _t	p-değeri
7 günlük basınç dayanımı (ikinci dereceden model)	0,97	0,94	0,83	<0,0001
7 günlük eğilme dayanımı (ikinci dereceden model)	0,96	0,91	0,77	<0,0001
28 günlük basınç dayanımı (ikinci dereceden model)	0,96	0,91	0,78	<0,0001
28 günlük eğilme dayanımı (ikinci dereceden model)	0,95	0,90	0,77	<0,0001



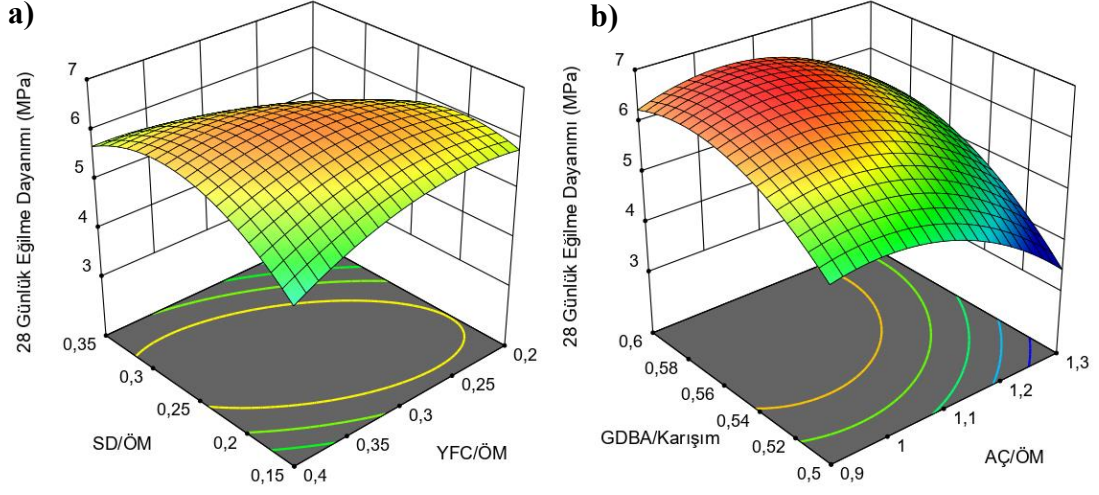
Şekil 4.9. MKT 7 günlük basınç dayanımları için yüzey grafikleri: a) SD/ÖM ve YFC/ÖM, b) AÇ/ÖM ve GDBA/Karışım



Şekil 4.10. MKT 7 günlük eğilme dayanımları için yüzey grafikleri: a) SD/ÖM ve YFC/ÖM, b) AÇ/ÖM ve GDBA/Karışım



Şekil 4.11. MKT 28 günlük basınç dayanımları için yüzey grafikleri: a) SD/ÖM ve YFC/ÖM, b) AÇ/ÖM ve GDBA/Karışım



Şekil 4.12. MKT 28 günlük eğilme dayanımları için yüzey grafikleri: a) SD/ÖM ve YFC/ÖM, b) AÇ/ÖM ve GDBA/Karışım

$$\begin{aligned}
 7 \text{ günlük basınç dayanımı (MPa)} &= 295,73 \times \left(\frac{SD}{\ddot{O}M}\right) + 441,55 \times \left(\frac{YFC}{\ddot{O}M}\right) + 310,22 \times \left(\frac{AÇ}{\ddot{O}M}\right) \\
 &+ 2703,80 \times \left(\frac{GDBA}{Karışım}\right) + 492,25 \times \left(\frac{SD}{\ddot{O}M} \times \frac{YFC}{\ddot{O}M}\right) - 110,88 \times \left(\frac{SD}{\ddot{O}M} \times \frac{AÇ}{\ddot{O}M}\right) \\
 &+ 139,5 \times \left(\frac{SD}{\ddot{O}M} \times \frac{GDBA}{Karışım}\right) - 1,13 \times \left(\frac{YFC}{\ddot{O}M} \times \frac{AÇ}{\ddot{O}M}\right) - 377,5 \times \left(\frac{YFC}{\ddot{O}M} \times \frac{GDBA}{Karışım}\right) \\
 &+ 28,25 \times \left(\frac{AÇ}{\ddot{O}M} \times \frac{GDBA}{Karışım}\right) - 806,54 \times \left(\frac{SD}{\ddot{O}M}\right)^2 - 534,04 \times \left(\frac{YFC}{\ddot{O}M}\right)^2 \\
 &- 145,76 \times \left(\frac{AÇ}{\ddot{O}M}\right)^2 - 2302,17 \times \left(\frac{GDBA}{Karışım}\right)^2 - 1014,36
 \end{aligned} \quad (4.3)$$

$$\begin{aligned}
 7 \text{ günlük eğilme dayanımı (MPa)} &= 39,28 \times \left(\frac{SD}{\ddot{O}M}\right) + 52,04 \times \left(\frac{YFC}{\ddot{O}M}\right) + 29,47 \times \left(\frac{AÇ}{\ddot{O}M}\right) \\
 &+ 349,82 \times \left(\frac{GDBA}{Karışım}\right) + 64,75 \times \left(\frac{SD}{\ddot{O}M} \times \frac{YFC}{\ddot{O}M}\right) - 25,13 \times \left(\frac{SD}{\ddot{O}M} \times \frac{AÇ}{\ddot{O}M}\right) \\
 &+ 37,50 \times \left(\frac{SD}{\ddot{O}M} \times \frac{GDBA}{Karışım}\right) + 10,38 \times \left(\frac{YFC}{\ddot{O}M} \times \frac{AÇ}{\ddot{O}M}\right) - 44,50 \times \left(\frac{YFC}{\ddot{O}M} \times \frac{GDBA}{Karışım}\right) \\
 &+ 22,75 \times \left(\frac{AÇ}{\ddot{O}M} \times \frac{GDBA}{Karışım}\right) - 103,46 \times \left(\frac{SD}{\ddot{O}M}\right)^2 - 85,46 \times \left(\frac{YFC}{\ddot{O}M}\right)^2 \\
 &- 18,74 \times \left(\frac{AÇ}{\ddot{O}M}\right)^2 - 325,83 \times \left(\frac{GDBA}{Karışım}\right)^2 - 122,07
 \end{aligned} \quad (4.4)$$

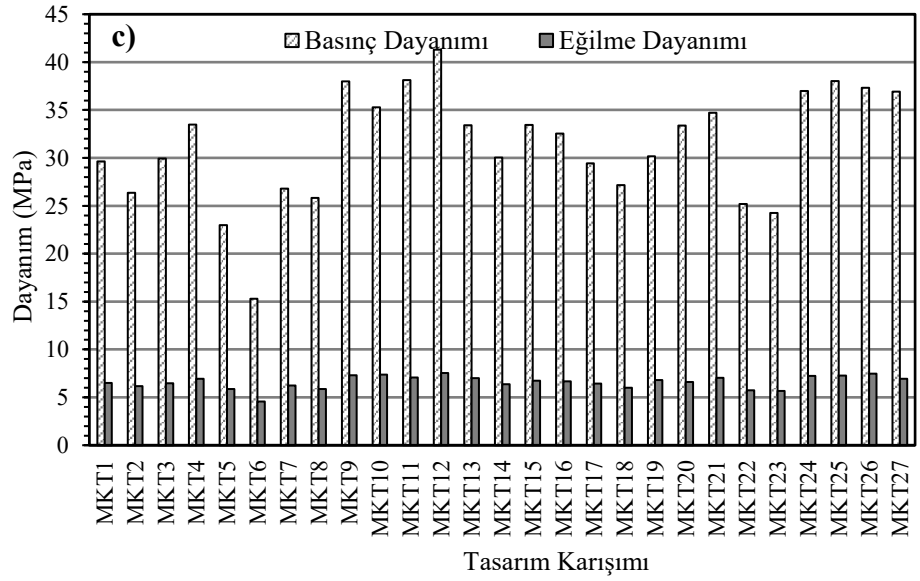
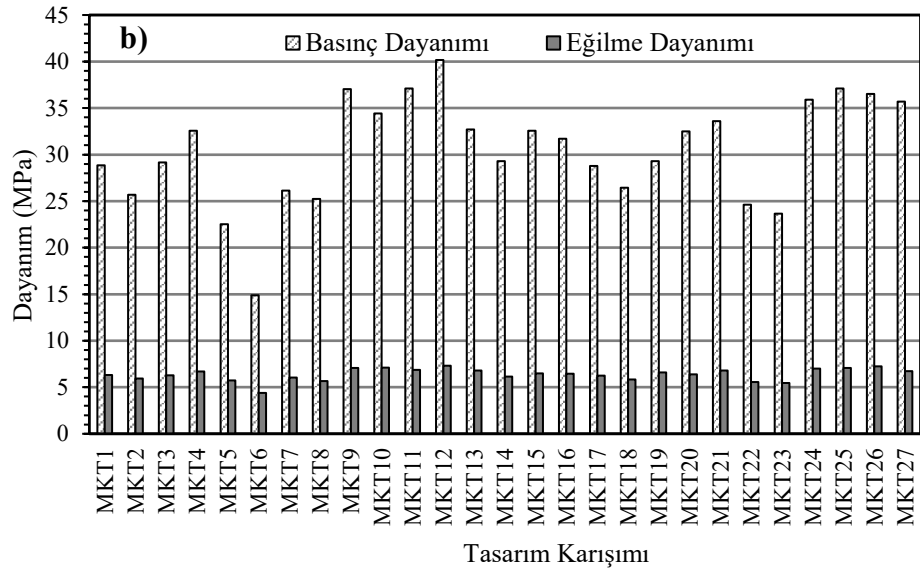
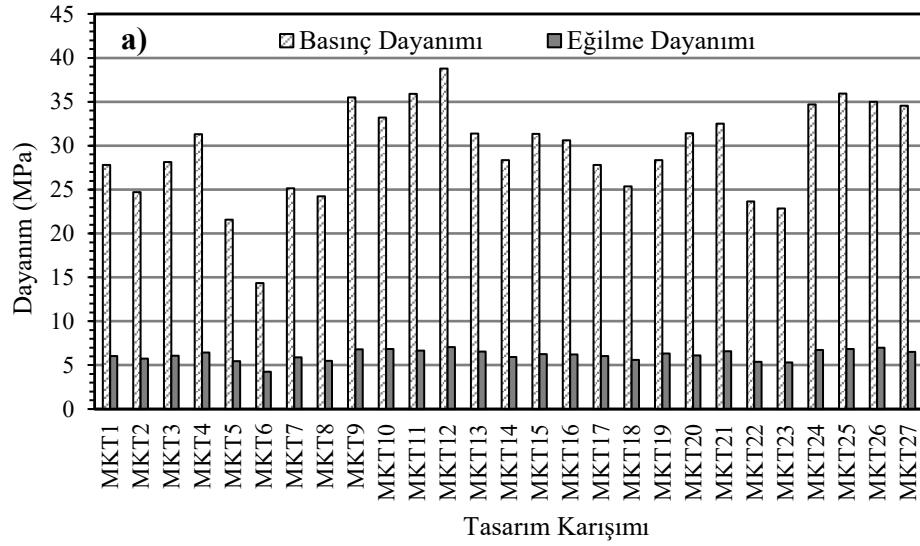
$$\begin{aligned}
 28 \text{ günlük basınç dayanımı (MPa)} &= 277,70 \times \left(\frac{SD}{\ddot{O}M}\right) + 459,04 \times \left(\frac{YFC}{\ddot{O}M}\right) + 285,54 \times \left(\frac{AÇ}{\ddot{O}M}\right) \\
 &+ 2628,65 \times \left(\frac{GDBA}{Karışım}\right) + 487,74 \times \left(\frac{SD}{\ddot{O}M} \times \frac{YFC}{\ddot{O}M}\right) - 150,31 \times \left(\frac{SD}{\ddot{O}M} \times \frac{AÇ}{\ddot{O}M}\right) \\
 &+ 205,08 \times \left(\frac{SD}{\ddot{O}M} \times \frac{GDBA}{Karışım}\right) + 34,34 \times \left(\frac{YFC}{\ddot{O}M} \times \frac{AÇ}{\ddot{O}M}\right) - 572,00 \times \left(\frac{YFC}{\ddot{O}M} \times \frac{GDBA}{Karışım}\right) \\
 &+ 114,15 \times \left(\frac{AÇ}{\ddot{O}M} \times \frac{GDBA}{Karışım}\right) - 767,43 \times \left(\frac{SD}{\ddot{O}M}\right)^2 - 462,02 \times \left(\frac{YFC}{\ddot{O}M}\right)^2 \\
 &- 157,58 \times \left(\frac{AÇ}{\ddot{O}M}\right)^2 - 2264,43 \times \left(\frac{GDBA}{Karışım}\right)^2 - 978,20
 \end{aligned} \quad (4.5)$$

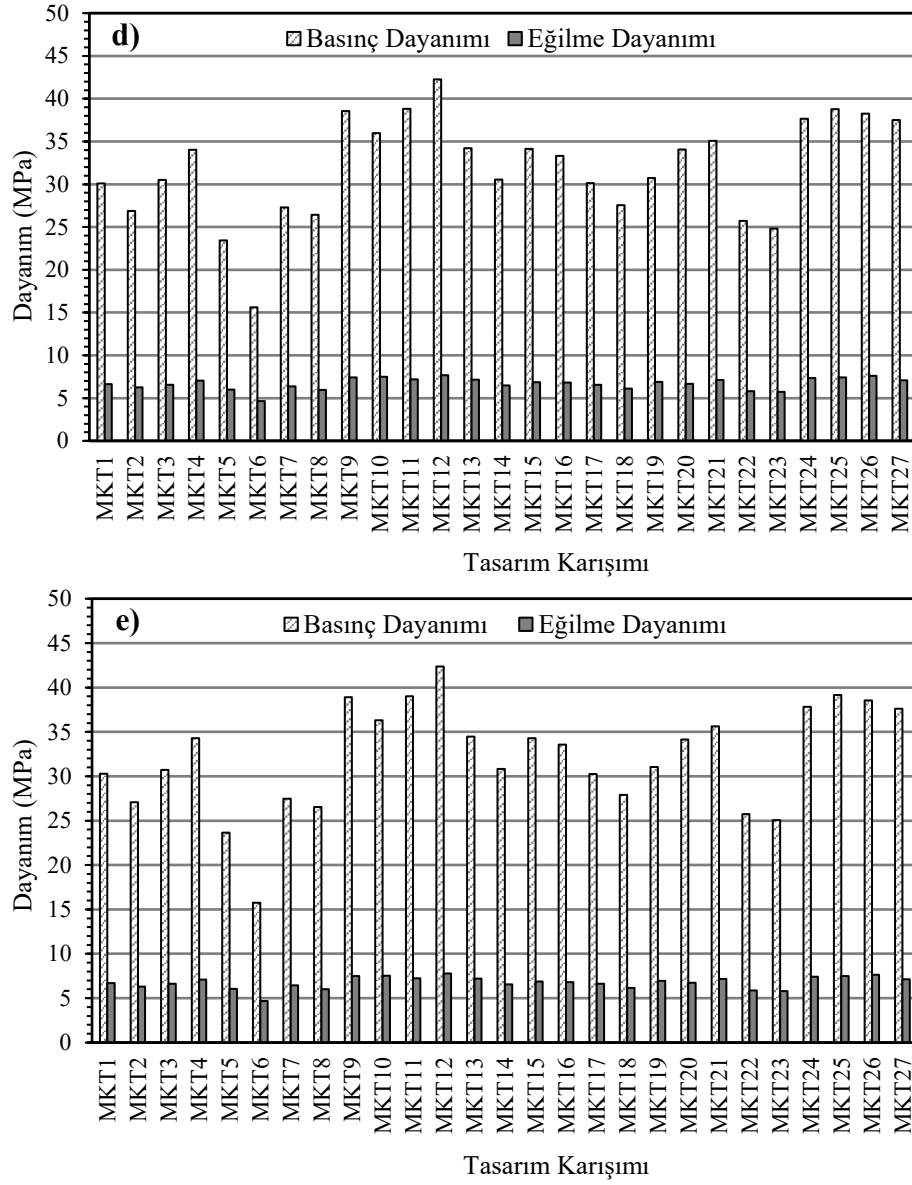
$$\begin{aligned}
28 \text{ günlük eğilme dayanımı (MPa)} = & 22,08 \times \left(\frac{SD}{\ddot{O}M} \right) + 57,34 \times \left(\frac{YFC}{\ddot{O}M} \right) + 28,49 \times \left(\frac{AÇ}{\ddot{O}M} \right) \\
& + 289,32 \times \left(\frac{GDBA}{Karışım} \right) + 61,00 \times \left(\frac{SD}{\ddot{O}M} \times \frac{YFC}{\ddot{O}M} \right) - 33,75 \times \left(\frac{SD}{\ddot{O}M} \times \frac{AÇ}{\ddot{O}M} \right) \\
& + 65,00 \times \left(\frac{SD}{\ddot{O}M} \times \frac{GDBA}{Karışım} \right) + 10,75 \times \left(\frac{YFC}{\ddot{O}M} \times \frac{AÇ}{\ddot{O}M} \right) - 105,00 \times \left(\frac{YFC}{\ddot{O}M} \times \frac{GDBA}{Karışım} \right) \\
& + 21,00 \times \left(\frac{AÇ}{\ddot{O}M} \times \frac{GDBA}{Karışım} \right) - 82,00 \times \left(\frac{SD}{\ddot{O}M} \right)^2 - 42,00 \times \left(\frac{YFC}{\ddot{O}M} \right)^2 \\
& - 17,25 \times \left(\frac{AÇ}{\ddot{O}M} \right)^2 - 256,00 \times \left(\frac{GDBA}{Karışım} \right)^2 - 102,75
\end{aligned} \tag{4.6}$$

4.3. Sülfat Hücumu Etkisi

Oda koşullarında 28 gün kür sonunda %5 MgSO₄ çözeltilerine yerleştirilen 1, 2, 3, 4 ve 6 ay bekletilen numunelerin basınç ve eğilme dayanımları Şekil 4.13'te verilmiştir. Bir ay sonunda en büyük basınç dayanımı 38,76 MPa ile MKT12 ve en küçük basınç dayanımı 14,36 MPa ile MKT6 karışımında, iki ay sonunda en büyük basınç dayanımı 40,18 MPa ile MKT12 ve en küçük basınç dayanımı 14,88 MPa ile MKT6 karışımında, üç ay sonunda en büyük basınç dayanımı 41,30 MPa ile MKT12 ve en küçük basınç dayanımı 15,28 MPa ile MKT6 karışımında, dört ay sonunda en büyük basınç dayanımı 42,24 MPa ile MKT12 ve en küçük basınç dayanımı 15,63 MPa ile MKT6 karışımında, altı ay sonunda en büyük basınç dayanımı 42,37 MPa ile MKT12 ve en küçük basınç dayanımı 15,74 MPa ile MKT6 karışımında elde edilmiştir. Bir ay sonunda en büyük eğilme dayanımı 7,06 MPa ile MKT12 ve en küçük eğilme dayanımı 4,26 MPa ile MKT6 karışımında, iki ay sonunda en büyük eğilme dayanımı 7,33 MPa ile MKT12 ve en küçük eğilme dayanımı 4,41 MPa ile MKT6 karışımında, üç ay sonunda en büyük eğilme dayanımı 7,55 MPa ile MKT12 ve en küçük eğilme dayanımı 4,57 MPa ile MKT6 karışımında, dört ay sonunda en büyük eğilme dayanımı 7,68 MPa ile MKT12 ve en küçük eğilme dayanımı 4,65 MPa ile MKT6 karışımında, altı ay sonunda en büyük eğilme dayanımı 7,78 MPa ile MKT12 ve en küçük eğilme dayanımı 4,67 MPa ile MKT6 karışımında elde edilmiştir. Deney sonuçları kullanılarak ANOVA yapılmıştır. Burada her bekletme süresi için ayrı ayrı ANOVA yapılmamış, çözeltilerde bekletme süreleri numerik değişken olarak değerlendirilerek ANOVA 4 değişken yerine 5 değişken için gerçekleştirilmiştir. Bu durumda 5 farklı bekletme süresi için MKT'deki 27 karışım toplamda 27×5=135 tasarım oluşturacak şekilde ANOVA yapılmıştır. İkinci dereceden modellerin (Eşitlik 4.7 ve Eşitlik 4.8) uygun olduğu belirlenmiştir (Çizelge 4.10 ve

Çizelge 4.11). Basınç dayanımları için R^2 , R^2_d ve R^2_t değerleri sırasıyla 0,96, 0,96 ve 0,95 olarak elde edilmiştir. Eğilme dayanımları için R^2 , R^2_d ve R^2_t değerleri sırasıyla 0,96, 0,95 ve 0,94 olarak elde edilmiştir. Yüksek R^2 değerleri ve 0,05'ten düşük p-değerleri bu modellerin istatistiksel olarak anlamlı olduğunu göstermiştir. ANOVA ve basınç dayanımı deney sonuçlarına göre basınç dayanımı üzerinde, yüksek F-değerlerine ve düşük p-değerlerine sahip olan GDBA/Karışım, AÇ/ÖM, YFC/ÖM, bekletme süresi ve SD/ÖM ana etki terimlerinin oldukça etkili olduğu görülmüştür. Bekletme süresinin ikinci dereceden terimi hariç ikinci dereceden terimlerin etki dereceleri de yüksek olmuştur. Etkileşim terimleri göreceli olarak daha az etkiye sahip olmuştur. Eğilme dayanımları için yapılan ANOVA da benzer bir sonucu ortaya koymuştur. Fakat eğilme dayanımları için SD/ÖM değişkeninin YFC/ÖM ve AÇ/ÖM ile etkileşim terimlerinin etkileri de kayda değer olarak elde edilmiştir. Modellere göre çizilen grafikler (Şekil 4.14 ve Şekil 4.15) ile 28 günlük basınç ve eğilme dayanımlarında olduğu gibi optimum seviyelerin varlığı gözlenmiştir. Genel olarak değişkenlerin belirli bir optimum seviyesine kadar dayanımlar önce artmış, optimum noktadan sonra azalmıştır. Bu noktada 28 günlük basınç ve eğilme dayanımlarında değişkenlerin etkileri ve davranışı, $MgSO_4$ çözeltilerinde belirli sürelerde bekletme durumu için de benzer olmuş, sülfat etkisi olumsuz bir durum oluşturmamıştır. Aslında sülfatlı ortamda bekletme ile numunelerde oluşabilecek jips ve etrenjit gibi yapılarla dayanımda azalma meydana gelmesi beklenecek bir durum olmasına rağmen literatürde sülfatlı çözeltilerde bekletilen geopolimer harç ve betonlarda dayanımın artabileceği de belirtilmiştir (Jiao ve diğ, 2023). Buna göre $MgSO_4$ çözeltilerinde bekletme GGH'lerin dayanımında kür süresinin uzaması benzeri bir etkiye neden olmuş ve GGH'lerin hem basınç hem de eğilme dayanımları artmıştır. Dayanımdaki artış 6 aya doğru yavaşça azalmıştır. Bunun nedeni geopolimerli harç ve betonların 28 günlük kür sonunda nihai dayanımına oldukça yakın bir dayanıma ulaşabilmesi ve daha uzun kür sürelerinde dayanımdaki artışın azalmasıdır. Basınç ve eğilme dayanımı düşük olan karışımlarda bile dayanımda sürekli artış olması, kullanılan değişkenlerin ve bunların seviyelerinin GGH oluşturmak için uygun olduğunu göstermiştir. Genel olarak tasarım bölgesinde sülfat hücumuna karşı dirençli GGH oluşturabilmek için kullanılan değişkenlerin seviyeleri ile geopolimerizasyonun sağlıklı bir şekilde gerçekleştiği belirlenmiştir.





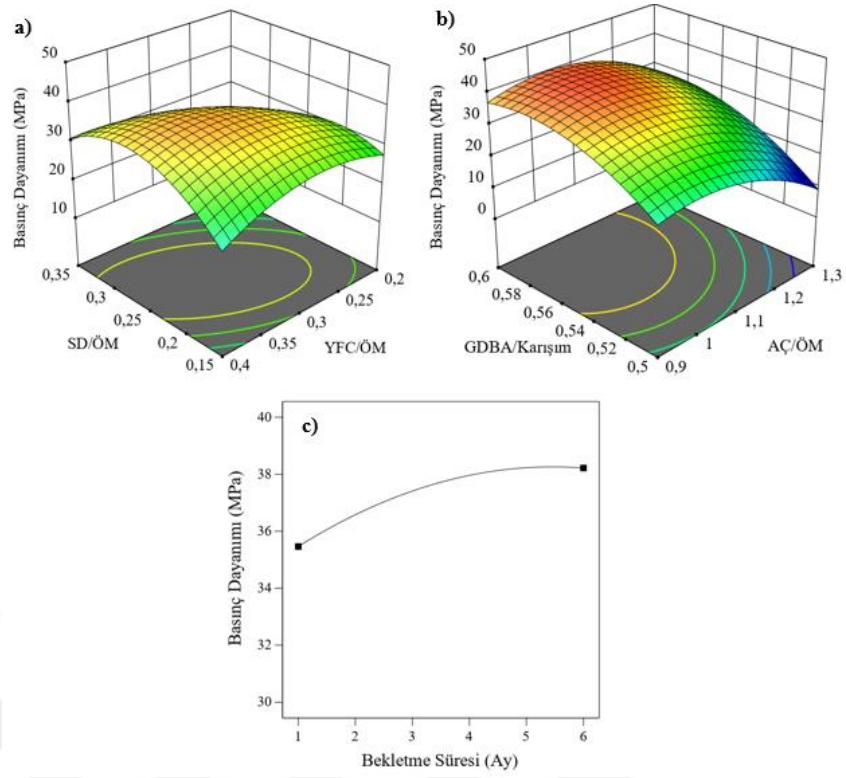
Şekil 4.13. $MgSO_4$ çözeltisinde bekletme sonunda dayanımlar: a) Bir ay, b) İki ay, c) Üç ay, d) Dört ay, e) Altı ay

Çizelge 4.10. $MgSO_4$ çözeltisinde bekletme sonunda basınç dayanımları için ANOVA sonuçları ve model formülü katsayıları

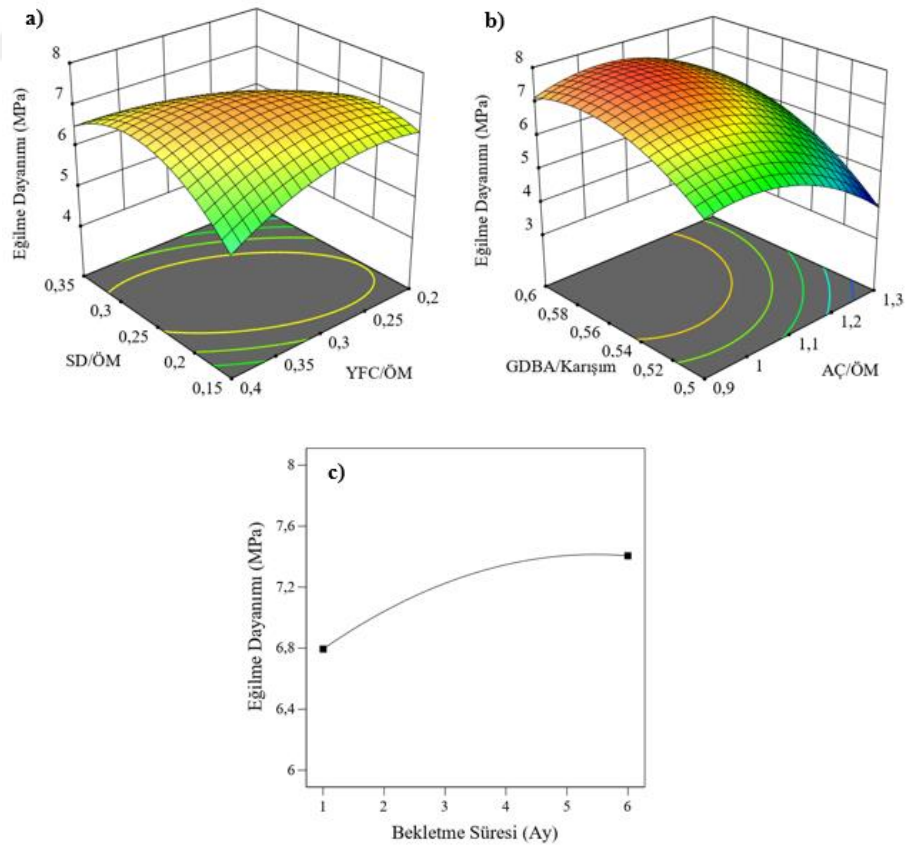
Kaynak	Kareler Toplamı	Serbestlik Derecesi	Ortalama Kare	F-değeri	p-değeri	Model Formülü Katsayısı
Model	4373,38	20	218,67	145,810	<0,0001	-1093,97 (sabit)
SD/ÖM	56,52	1	56,52	37,690	<0,0001	312,67
YFC/ÖM	271,83	1	271,83	181,260	<0,0001	517,35
AÇ/ÖM	988,24	1	988,24	658,970	<0,0001	319,67
GDBA/Karışım	1897,59	1	1897,59	1265,350	<0,0001	2931,42
Bekletme Süresi	120,82	1	120,82	80,560	<0,0001	0,49
SD/ÖM×YFC/ÖM	147,15	1	147,15	98,120	<0,0001	542,50
SD/ÖM×AÇ/ÖM	58,31	1	58,31	38,880	<0,0001	-170,75
SD/ÖM×GDBA/Karışım	6,99	1	6,99	4,660	0,033	236,40
SD/ÖM×(Bekletme Süresi)	0,01	1	0,01	0,007	0,9325	-0,11
YFC/ÖM×AÇ/ÖM	3,18	1	3,18	2,120	0,1483	39,85
YFC/ÖM×GDBA/Karışım	52,29	1	52,29	34,870	<0,0001	-646,80
YFC/ÖM×(Bekletme Süresi)	0,19	1	0,19	0,127	0,7224	0,46
AÇ/ÖM×GDBA/Karışım	8,61	1	8,61	5,740	0,0182	131,20
AÇ/ÖM×(Bekletme Süresi)	0,89	1	0,89	0,594	0,4425	-0,50
GDBA/Karışım×(Bekletme Süresi)	1,62	1	1,62	1,080	0,3008	2,70
(SD/ÖM) ²	495,73	1	495,73	330,560	<0,0001	-862,32
(YFC/ÖM) ²	180,42	1	180,42	120,310	<0,0001	-520,22
(AÇ/ÖM) ²	332,59	1	332,59	221,780	<0,0001	-176,58
(GDBA/Karışım) ²	267,82	1	267,82	178,580	<0,0001	-2535,27
(Bekletme Süresi) ²	19,60	1	19,60	13,070	0,0004	-0,14
Hata	170,96	114	1,50			
Toplam	4544,35	134				

Çizelge 4.11. $MgSO_4$ çözeltisinde bekletme sonunda eğilme dayanımları için ANOVA sonuçları ve model formülü katsayıları

Kaynak	Kareler Toplamı	Serbestlik Derecesi	Ortalama Kare	F-değeri	p-değeri	Model Formülü Katsayısı
Model	62,950	20	3,150	121,18	<0,0001	-116,55 (sabit)
SD/ÖM	1,490	1	1,490	57,18	<0,0001	25,83
YFC/ÖM	0,805	1	0,805	30,98	<0,0001	66,31
AÇ/ÖM	14,530	1	14,530	559,31	<0,0001	32,81
GDBA/Karışım	22,410	1	22,410	862,95	<0,0001	324,32
Bekletme Süresi	5,960	1	5,960	229,41	<0,0001	0,22
SD/ÖM×YFC/ÖM	2,310	1	2,310	88,75	<0,0001	67,90
SD/ÖM×AÇ/ÖM	2,830	1	2,830	108,86	<0,0001	-37,60
SD/ÖM×GDBA/Karışım	0,644	1	0,644	24,81	<0,0001	71,80
SD/ÖM×(Bekletme Süresi)	0,001	1	0,001	0,03	0,867	-0,03
YFC/ÖM×AÇ/ÖM	0,262	1	0,262	10,10	0,0019	11,45
YFC/ÖM×GDBA/Karışım	1,780	1	1,780	68,38	<0,0001	-119,20
YFC/ÖM×(Bekletme Süresi)	0,000	1	0,000	0,01	0,9105	0,02
AÇ/ÖM×GDBA/Karışım	0,281	1	0,281	10,81	0,0013	23,70
AÇ/ÖM×(Bekletme Süresi)	0,011	1	0,011	0,43	0,5128	-0,06
GDBA/Karışım×(Bekletme Süresi)	0,025	1	0,025	0,98	0,3251	0,34
(SD/ÖM) ²	5,760	1	5,760	221,84	<0,0001	-92,97
(YFC/ÖM) ²	1,530	1	1,530	58,81	<0,0001	-47,87
(AÇ/ÖM) ²	4,120	1	4,120	158,44	<0,0001	-19,64
(GDBA/Karışım) ²	3,440	1	3,440	132,57	<0,0001	-287,47
(Bekletme Süresi) ²	0,955	1	0,955	36,77	<0,0001	-0,03
Hata	2,96	114	0,026			
Toplam	65,91	134				



Şekil 4.14. $MgSO_4$ çözeltisinde bekletme sonunda basınç dayanımları için yüzey grafikleri: a) SD/ÖM ve YFC/ÖM, b) AÇ/ÖM ve GDBA/Karışım, c) Bekletme süresi

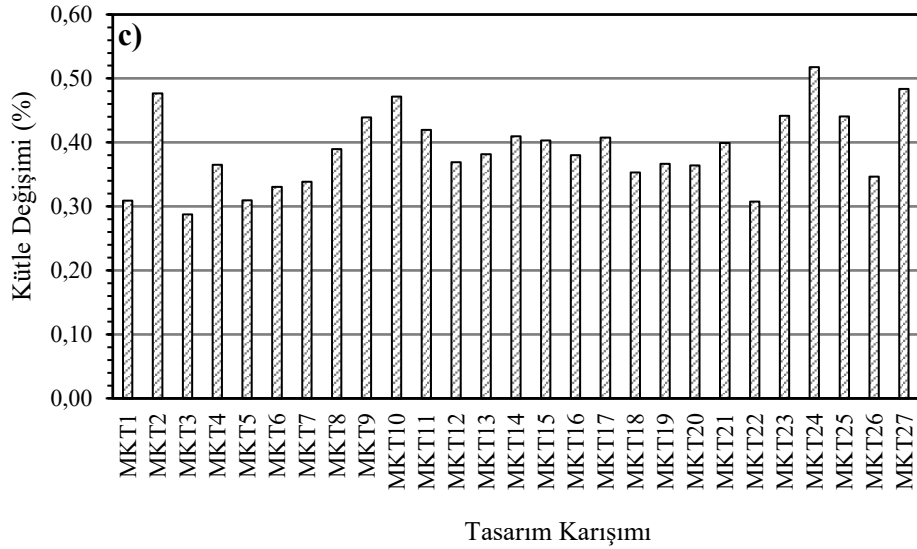
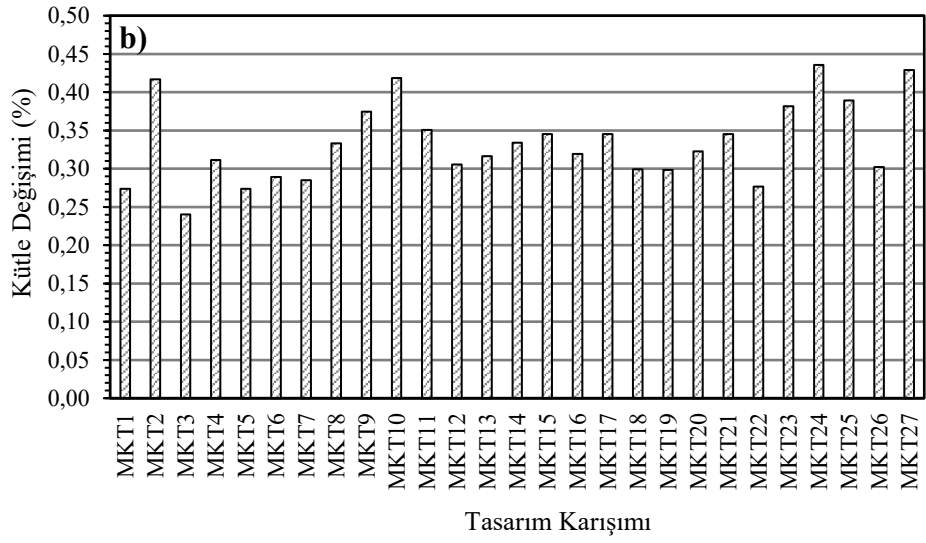
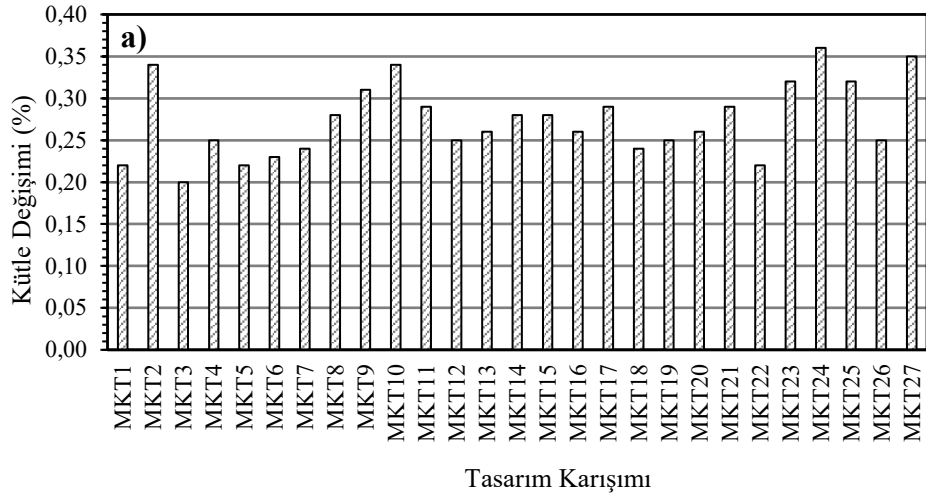


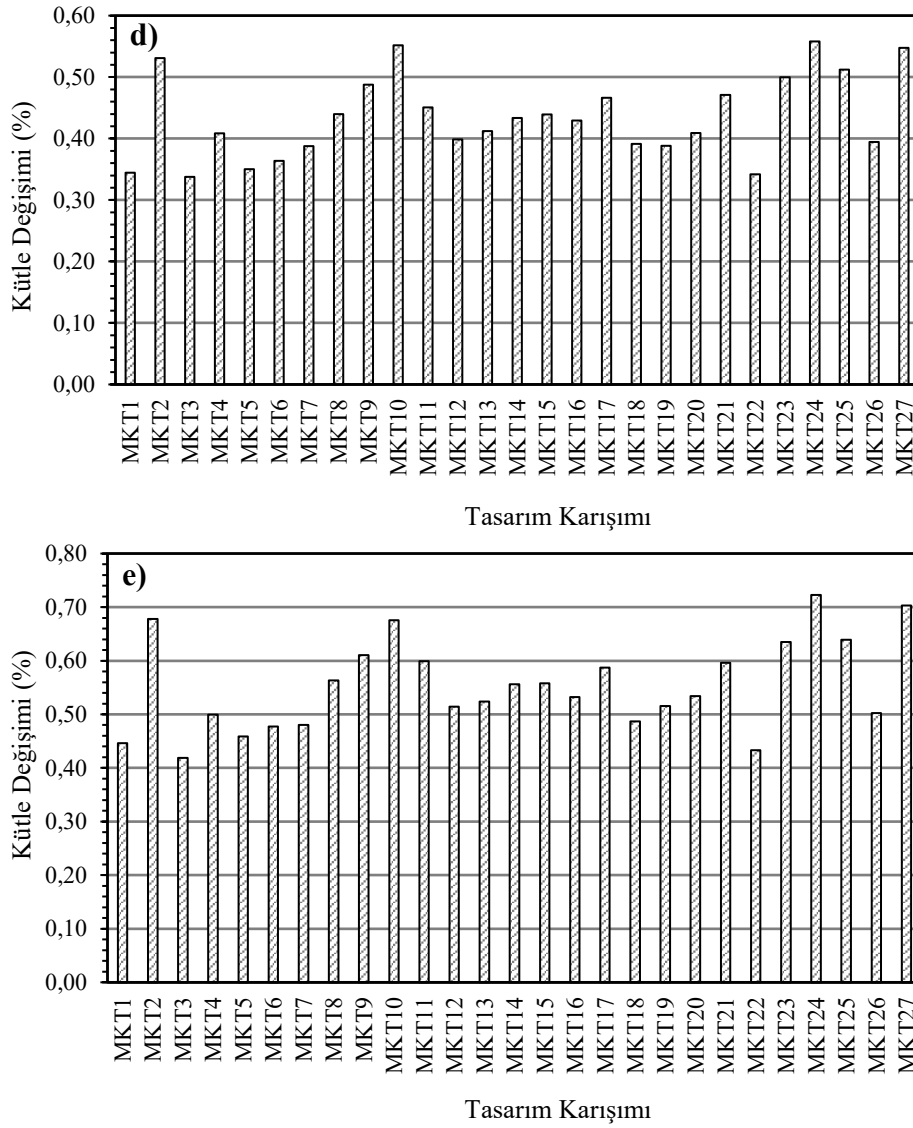
Şekil 4.15. $MgSO_4$ çözeltisinde bekletme sonunda eğilme dayanımları için yüzey grafikleri: a) SD/ÖM ve YFC/ÖM, b) AÇ/ÖM ve GDBA/Karışım, c) Bekletme süresi

$$\begin{aligned}
\text{Basınç dayanımı (MPa)} = & 312,67 \times \left(\frac{SD}{\ddot{O}M} \right) + 517,35 \times \left(\frac{YFC}{\ddot{O}M} \right) + 319,67 \times \left(\frac{A\dot{C}}{\ddot{O}M} \right) \\
& + 2931,42 \times \left(\frac{GDBA}{Karişım} \right) + 0,49 \times \left(\frac{Bekletme}{Süresi} \right) + 542,50 \times \left(\frac{SD}{\ddot{O}M} \times \frac{YFC}{\ddot{O}M} \right) \\
& - 170,75 \times \left(\frac{SD}{\ddot{O}M} \times \frac{A\dot{C}}{\ddot{O}M} \right) + 236,40 \times \left(\frac{SD}{\ddot{O}M} \times \frac{GDBA}{Karişım} \right) - 0,11 \times \left(\frac{SD}{\ddot{O}M} \times \frac{Bekletme}{Süresi} \right) \\
& + 39,85 \times \left(\frac{YFC}{\ddot{O}M} \times \frac{A\dot{C}}{\ddot{O}M} \right) - 646,80 \times \left(\frac{YFC}{\ddot{O}M} \times \frac{GDBA}{Karişım} \right) + 0,46 \times \left(\frac{YFC}{\ddot{O}M} \times \frac{Bekletme}{Süresi} \right) \\
& + 131,20 \times \left(\frac{A\dot{C}}{\ddot{O}M} \times \frac{GDBA}{Karişım} \right) - 0,50 \times \left(\frac{A\dot{C}}{\ddot{O}M} \times \frac{Bekletme}{Süresi} \right) + 2,70 \times \left(\frac{GDBA}{Karişım} \times \frac{Bekletme}{Süresi} \right) \\
& - 862,32 \times \left(\frac{SD}{\ddot{O}M} \right)^2 - 520,22 \times \left(\frac{YFC}{\ddot{O}M} \right)^2 - 176,58 \times \left(\frac{A\dot{C}}{\ddot{O}M} \right)^2 - 2535,27 \times \left(\frac{GDBA}{Karişım} \right)^2 \\
& - 0,14 \times \left(\frac{Bekletme}{Süresi} \right)^2 - 1093,97
\end{aligned} \tag{4.7}$$

$$\begin{aligned}
\text{Eğilme dayanımı (MPa)} = & 25,83 \times \left(\frac{SD}{\ddot{O}M} \right) + 66,31 \times \left(\frac{YFC}{\ddot{O}M} \right) + 32,81 \times \left(\frac{A\dot{C}}{\ddot{O}M} \right) \\
& + 324,32 \times \left(\frac{GDBA}{Karişım} \right) + 0,22 \times \left(\frac{Bekletme}{Süresi} \right) + 67,90 \times \left(\frac{SD}{\ddot{O}M} \times \frac{YFC}{\ddot{O}M} \right) \\
& - 37,60 \times \left(\frac{SD}{\ddot{O}M} \times \frac{A\dot{C}}{\ddot{O}M} \right) + 71,80 \times \left(\frac{SD}{\ddot{O}M} \times \frac{GDBA}{Karişım} \right) - 0,03 \times \left(\frac{SD}{\ddot{O}M} \times \frac{Bekletme}{Süresi} \right) \\
& + 11,45 \times \left(\frac{YFC}{\ddot{O}M} \times \frac{A\dot{C}}{\ddot{O}M} \right) - 119,20 \times \left(\frac{YFC}{\ddot{O}M} \times \frac{GDBA}{Karişım} \right) + 0,02 \times \left(\frac{YFC}{\ddot{O}M} \times \frac{Bekletme}{Süresi} \right) \\
& + 23,70 \times \left(\frac{A\dot{C}}{\ddot{O}M} \times \frac{GDBA}{Karişım} \right) - 0,06 \times \left(\frac{A\dot{C}}{\ddot{O}M} \times \frac{Bekletme}{Süresi} \right) + 0,34 \times \left(\frac{GDBA}{Karişım} \times \frac{Bekletme}{Süresi} \right) \\
& - 92,97 \times \left(\frac{SD}{\ddot{O}M} \right)^2 - 47,87 \times \left(\frac{YFC}{\ddot{O}M} \right)^2 - 19,64 \times \left(\frac{A\dot{C}}{\ddot{O}M} \right)^2 - 287,47 \times \left(\frac{GDBA}{Karişım} \right)^2 \\
& - 0,03 \times \left(\frac{Bekletme}{Süresi} \right)^2 - 116,55
\end{aligned} \tag{4.8}$$

MgSO₄ çözeltilerinde bekletilen numunelerde her bekletme süresi sonunda yapılan kütle ölçümleri ile numunelerde sürekli kütle artışının meydana geldiği belirlenmiştir (Şekil 4.16). SEM ve XRD Analizleri bölümünde de açıklandığı üzere numunelerin mikro yapısı incelendiğinde MgSO₄ çözeltisinde bekletme sonunda zararlı ürünlerin oluşumu gözlenmediğinden kütle artışlarının numune dış yüzeyinde veya boşluklarında biriken MgSO₄ tuzu çökmesiyle meydana geldiği söylenebilir. Ayrıca kütle artışları ile değişkenler arasında bir ilişki belirlenemediğinden sadece grafiklerle kütle artışı miktarı gösterilmiştir. Değişkenler sülfatlı ortamda kimyasal reaksiyona girmemiş olduğundan kütle artışları rastgele bir düzende tuz çökmesiyle meydana gelmiş, bu durum da değişkenler ile kütle değişimi arasında bir ilişki elde edilememesine neden olmuştur.



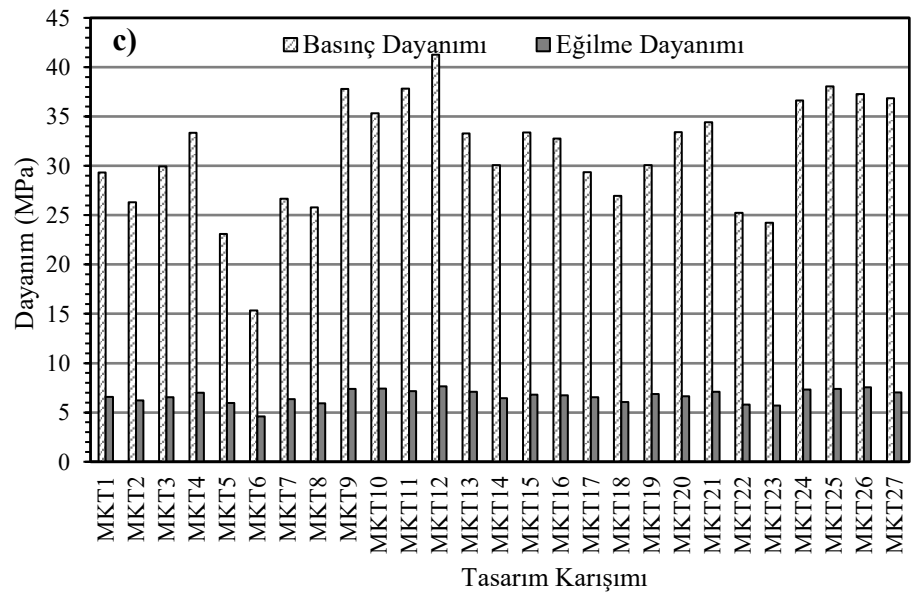
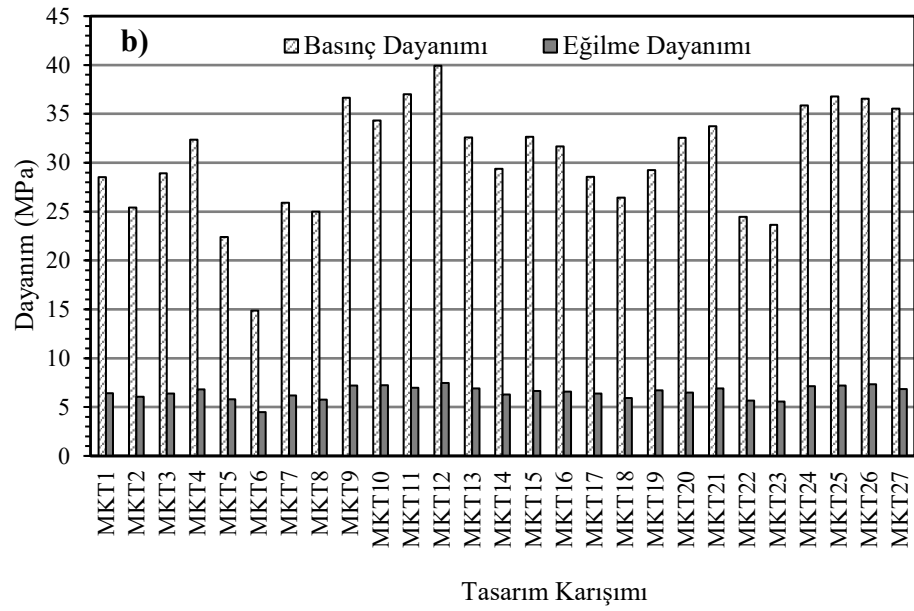
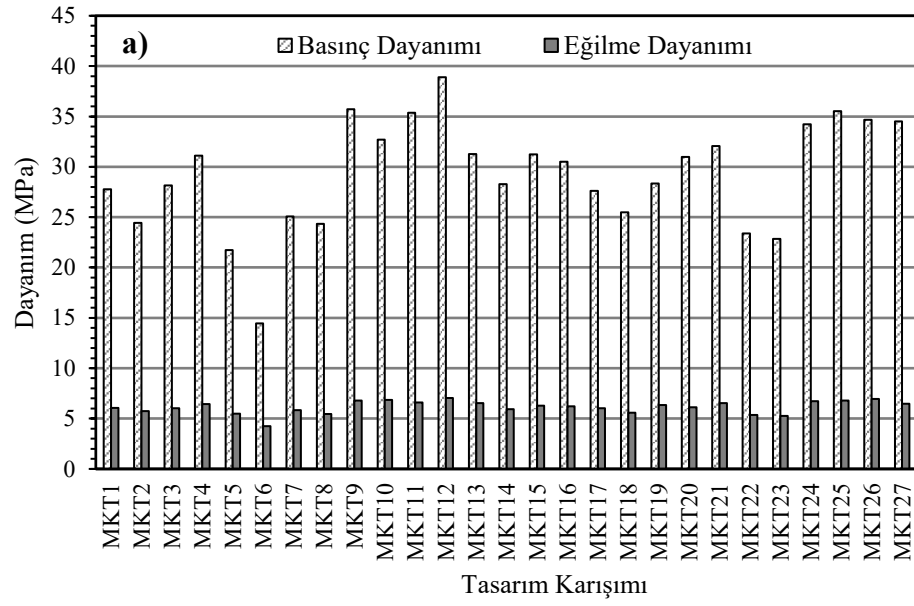


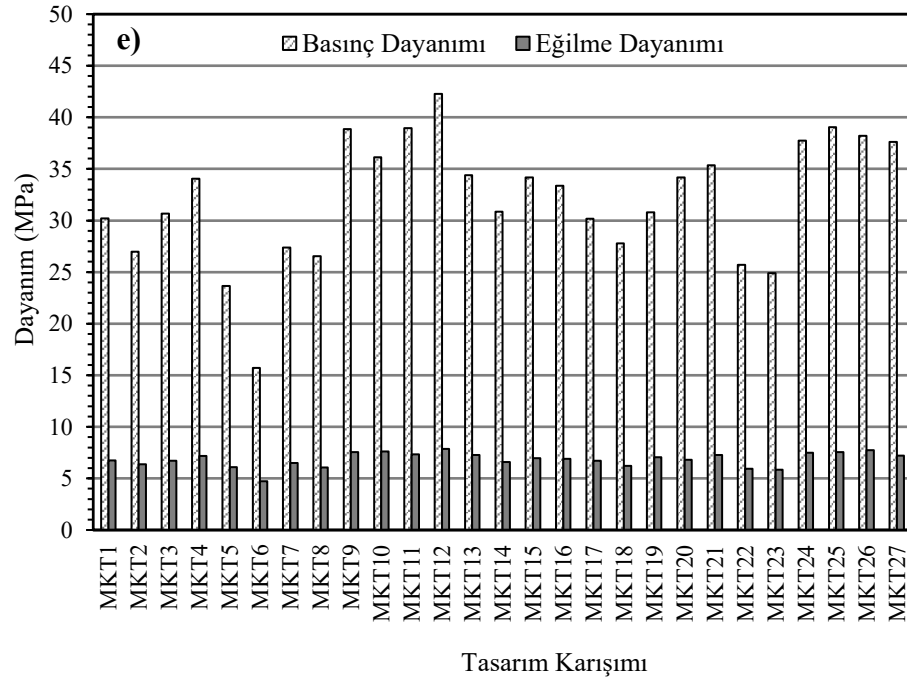
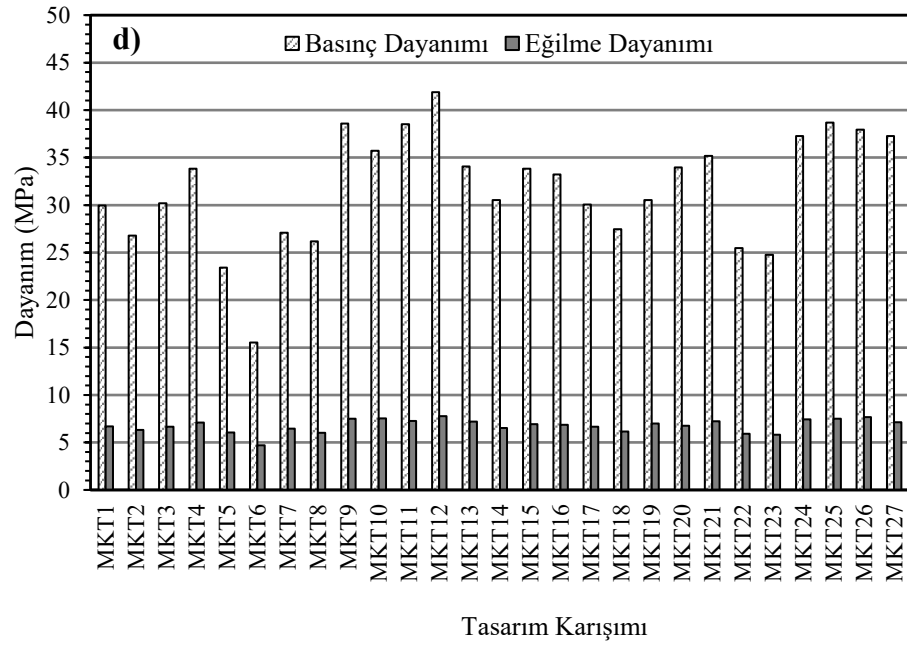
Şekil 4.16. MgSO₄ çözeltisinde bekletme sonunda kütle değişimleri: a) Bir ay, b) İki ay, c) Üç ay, d) Dört ay, e) Altı ay

4.4. Sodyum Klorür Hücumu Etkisi

Oda koşullarında 28 gün kür sonunda %5 NaCl çözeltilerinde 1, 2, 3, 4 ve 6 ay bekletilen numunelerin basınç ve eğilme dayanımları Şekil 4.17’de verilmiştir. Bir ay sonunda en büyük basınç dayanımı 38,90 MPa ile MKT12 ve en küçük basınç dayanımı 14,45 MPa ile MKT6 karışımında, iki ay sonunda en büyük basınç dayanımı 39,94 MPa ile MKT12 ve en küçük basınç dayanımı 14,86 MPa ile MKT6 karışımında, üç ay sonunda en büyük basınç dayanımı 41,28 MPa ile MKT12 ve en küçük basınç dayanımı 15,35 MPa ile MKT6 karışımında, dört ay sonunda en büyük basınç dayanımı 41,89 MPa ile MKT12 ve en küçük basınç dayanımı 15,53 MPa ile MKT6 karışımında, altı ay sonunda en büyük basınç dayanımı 42,27 MPa ile MKT12 ve en küçük basınç dayanımı

15,73 MPa ile MKT6 karışımında elde edilmiştir. Bir ay sonunda en büyük eğilme dayanımı 7,05 MPa ile MKT12 ve en küçük eğilme dayanımı 4,25 MPa ile MKT6 karışımında, iki ay sonunda en büyük eğilme dayanımı 7,47 MPa ile MKT12 ve en küçük eğilme dayanımı 4,50 MPa ile MKT6 karışımında, üç ay sonunda en büyük eğilme dayanımı 7,66 MPa ile MKT12 ve en küçük eğilme dayanımı 4,61 MPa ile MKT6 karışımında, dört ay sonunda en büyük eğilme dayanımı 7,78 MPa ile MKT12 ve en küçük eğilme dayanımı 4,69 MPa ile MKT6 karışımında, altı ay sonunda en büyük eğilme dayanımı 7,85 MPa ile MKT12 ve en küçük eğilme dayanımı 4,73 MPa ile MKT6 karışımında elde edilmiştir. ANOVA $MgSO_4$ çözeltilinde bekletilenlerde olduğu gibi bekletme süresinin 5. numerik değişken olarak kabul edilmesiyle yapılmış ve ikinci dereceden modeller (Eşitlik 4.9 ve Eşitlik 4.10) oluşturulmuştur. (Çizelge 4.12 ve Çizelge 4.13). Basınç dayanımları için R^2 , R^2_d ve R^2_t değerleri sırasıyla 0,96, 0,96 ve 0,94 olarak elde edilmiştir. Eğilme dayanımları için R^2 , R^2_d ve R^2_t değerleri sırasıyla 0,96, 0,95 ve 0,94 olarak elde edilmiştir. R^2 değerlerinin oldukça yüksek ve p-değerlerinin 0,05'ten küçük olması oluşturulan ikinci dereceden modellerin istatistiksel olarak anlamlı olduğunu ortaya koymuştur. Basınç dayanımı üzerinde etkili olan terimler ve bunların etki dereceleri $MgSO_4$ çözeltilinde bekletme durumuna benzer şekilde olmuştur. Buna göre yüksek F-değerlerine ve düşük p-değerlerine sahip olan GDBA/Karışım, AÇ/ÖM, YFC/ÖM, bekletme süresi ve SD/ÖM ana etki terimleri ile bekletme süresinin ikinci dereceden terimi hariç ikinci dereceden terimlerin etki dereceleri de basınç dayanımı üzerinde yüksek olmuştur. Etkileşim terimleri daha az etkili olmuştur. Dikkat çekici bir şekilde $MgSO_4$ çözeltilerinde bekletme ile NaCl çözeltilerinde bekletmede aynı bekletme sürelerinde çok yakın dayanımlar elde edilmiştir. Bu nedenle $MgSO_4$ çözeltilinde bekletme durumu için yapılan çıkarımların hepsi NaCl çözeltilinde bekletme durumu için de geçerli olmuştur (Şekil 4.18 ve Şekil 4.19). Buna göre NaCl çözeltisi de numunelerde zararlı ürün oluşumuna neden olmamış ve uzayan bekletilme süreleri kür süresi gibi bir etki oluşturmuştur. XRD ve SEM Analizleri bölümünde yapılan çıkarımlar da bu sonucu desteklemiştir.





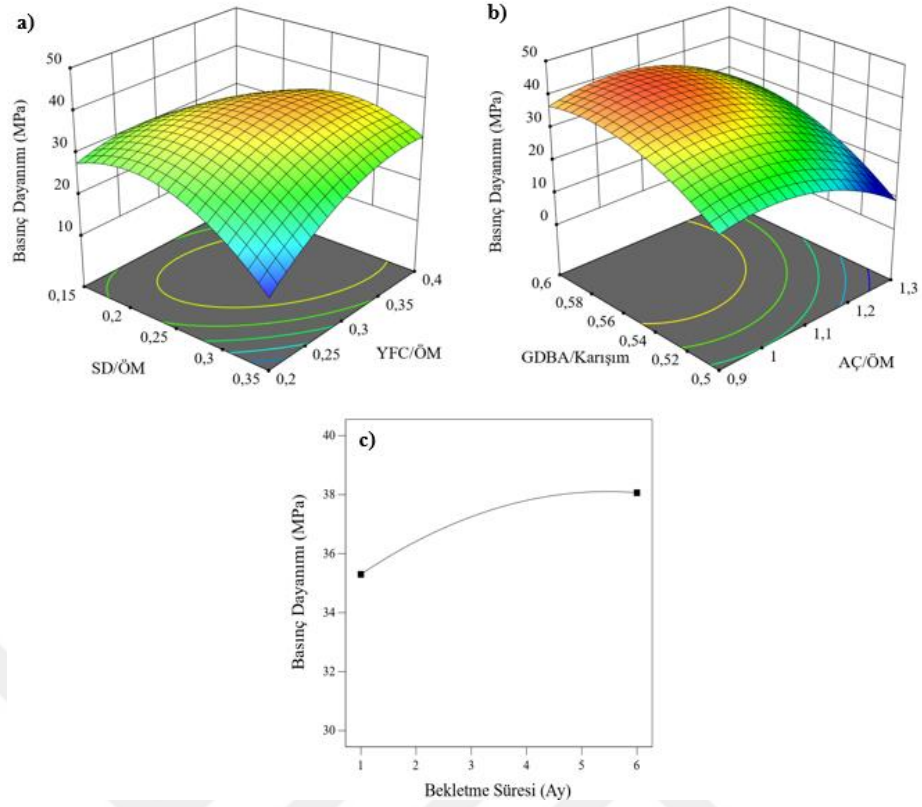
Şekil 4.17. NaCl çözeltisinde bekletme sonunda dayanım değişimleri: a) Bir ay, b) İki ay, c) Üç ay, d) Dört ay, e) Altı ay

Çizelge 4.12. NaCl çözeltisinde bekletme sonunda basınç dayanımları için ANOVA sonuçları ve model formülü katsayıları

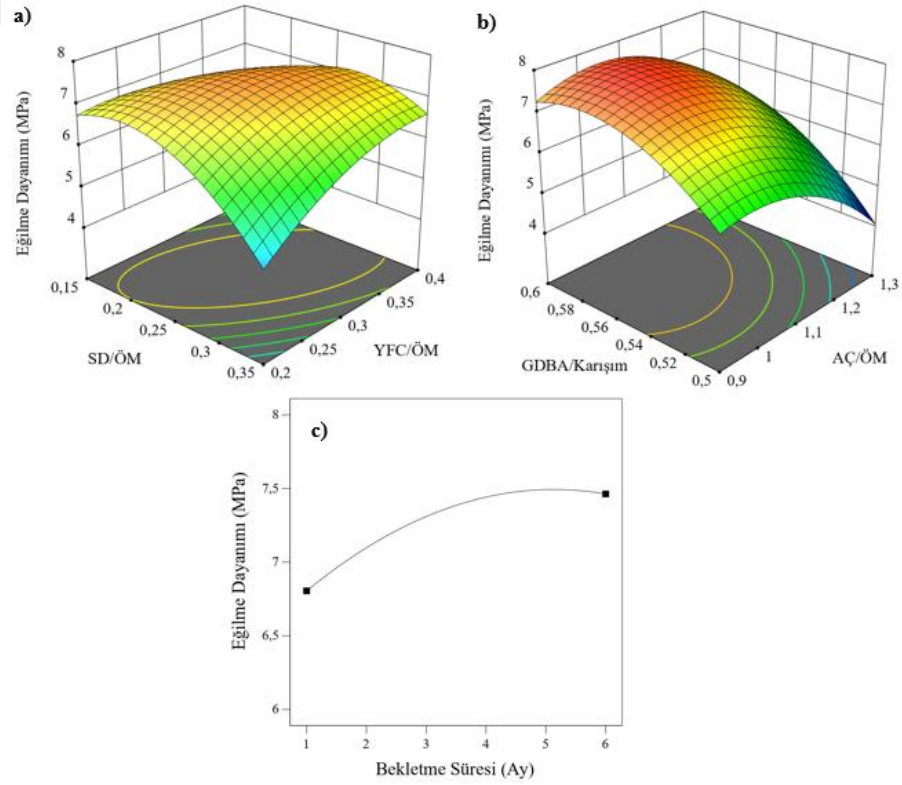
Kaynak	Kareler Toplamı	Serbestlik Derecesi	Ortalama Kare	F-değeri	p-değeri	Model Formülü Katsayısı
Model	4314,78	20	215,74	144,51	<0,0001	-1089,75 (sabit)
SD/ÖM	55,04	1	55,04	36,87	<0,0001	299,05
YFC/ÖM	267,35	1	267,35	179,09	<0,0001	511,78
AÇ/ÖM	965,30	1	965,30	646,61	<0,0001	319,65
GDBA/Karışım	1880,03	1	1880,03	1259,36	<0,0001	2925,37
Bekletme Süresi	121,93	1	121,93	81,68	<0,0001	0,41
SD/ÖM×YFC/ÖM	150,12	1	150,12	100,56	<0,0001	547,95
SD/ÖM×AÇ/ÖM	56,16	1	56,16	37,62	<0,0001	-167,58
SD/ÖM×GDBA/Karışım	7,60	1	7,60	5,09	0,026	246,50
SD/ÖM×(Bekletme Süresi)	0,05	1	0,05	0,04	0,8491	-0,25
YFC/ÖM×AÇ/ÖM	2,72	1	2,72	1,82	0,1798	36,88
YFC/ÖM×GDBA/Karışım	51,60	1	51,60	34,57	<0,0001	-642,50
YFC/ÖM×(Bekletme Süresi)	0,27	1	0,27	0,18	0,6733	0,55
AÇ/ÖM×GDBA/Karışım	8,35	1	8,35	5,60	0,0197	129,25
AÇ/ÖM×(Bekletme Süresi)	1,13	1	1,13	0,76	0,3857	-0,56
GDBA/Karışım×(Bekletme Süresi)	1,99	1	1,99	1,33	0,2506	2,99
(SD/ÖM) ²	487,49	1	487,49	326,55	<0,0001	-855,13
(YFC/ÖM) ²	175,19	1	175,19	117,35	<0,0001	-512,63
(AÇ/ÖM) ²	329,59	1	329,59	220,78	<0,0001	-175,78
(GDBA/Karışım) ²	267,32	1	267,32	179,06	<0,0001	-2532,90
(Bekletme Süresi) ²	19,65	1	19,65	13,16	0,0004	-0,14
Hata	170,18	114	1,49			
Toplam	4484,96	134				

Çizelge 4.13. NaCl çözeltisinde bekletme sonunda eğilme dayanımları için ANOVA sonuçları ve model formülü katsayıları

Kaynak	Kareler Toplamı	Serbestlik Derecesi	Ortalama Kare	F-değeri	p-değeri	Model Formülü Katsayısı
Model	65,590	20	3,280	127,900	<0,0001	-116,94 (sabit)
SD/ÖM	1,540	1	1,540	59,890	<0,0001	25,17
YFC/ÖM	0,791	1	0,791	30,840	<0,0001	65,00
AÇ/ÖM	14,770	1	14,770	575,870	<0,0001	32,96
GDBA/Karışım	23,020	1	23,020	897,650	<0,0001	325,95
Bekletme Süresi	6,910	1	6,910	269,360	<0,0001	0,31
SD/ÖM×YFC/ÖM	2,390	1	2,390	93,240	<0,0001	69,15
SD/ÖM×AÇ/ÖM	2,980	1	2,980	116,060	<0,0001	-38,58
SD/ÖM×GDBA/Karışım	0,686	1	0,686	26,770	<0,0001	74,10
SD/ÖM×(Bekletme Süresi)	0,001	1	0,001	0,052	0,8201	-0,04
YFC/ÖM×AÇ/ÖM	0,287	1	0,287	11,180	0,0011	11,98
YFC/ÖM×GDBA/Karışım	1,780	1	1,780	69,380	<0,0001	-119,30
YFC/ÖM×(Bekletme Süresi)	0,001	1	0,001	0,037	0,8469	0,03
AÇ/ÖM×GDBA/Karışım	0,270	1	0,270	10,540	0,0015	23,25
AÇ/ÖM×(Bekletme Süresi)	0,019	1	0,019	0,729	0,3952	-0,07
GDBA/Karışım×(Bekletme Süresi)	0,025	1	0,025	0,962	0,3288	0,33
(SD/ÖM) ²	5,740	1	5,740	223,850	<0,0001	-92,79
(YFC/ÖM) ²	1,480	1	1,480	57,900	<0,0001	-47,19
(AÇ/ÖM) ²	4,080	1	4,080	158,950	<0,0001	-19,55
(GDBA/Karışım) ²	3,470	1	3,470	135,490	<0,0001	-288,77
(Bekletme Süresi) ²	1,610	1	1,610	62,620	<0,0001	-0,04
Hata	2,92	114	0,0256			
Toplam	68,52	134				



Şekil 4.18. NaCl çözeltisinde bekletme sonunda eğilme dayanımları için yüzey grafikleri: a) SD/ÖM ve YFC/ÖM, b) AÇ/ÖM ve GDBA/Karışım, c) Bekletme süresi

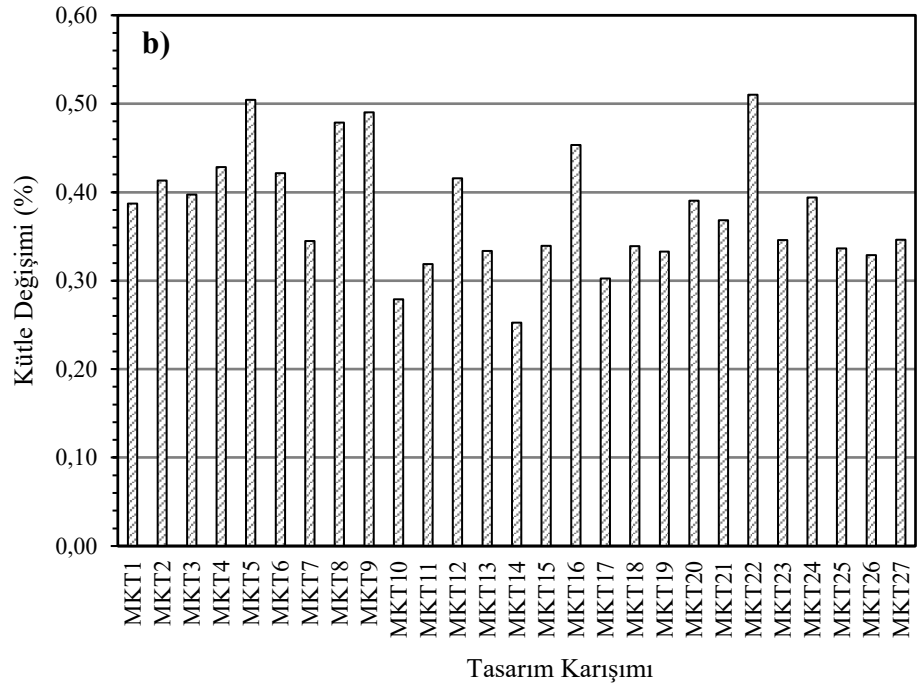
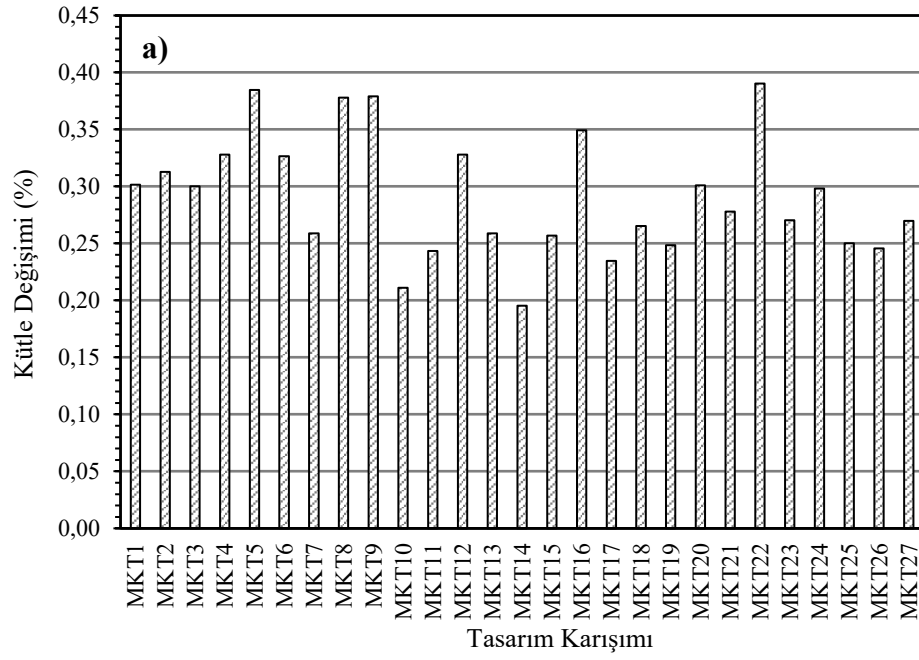


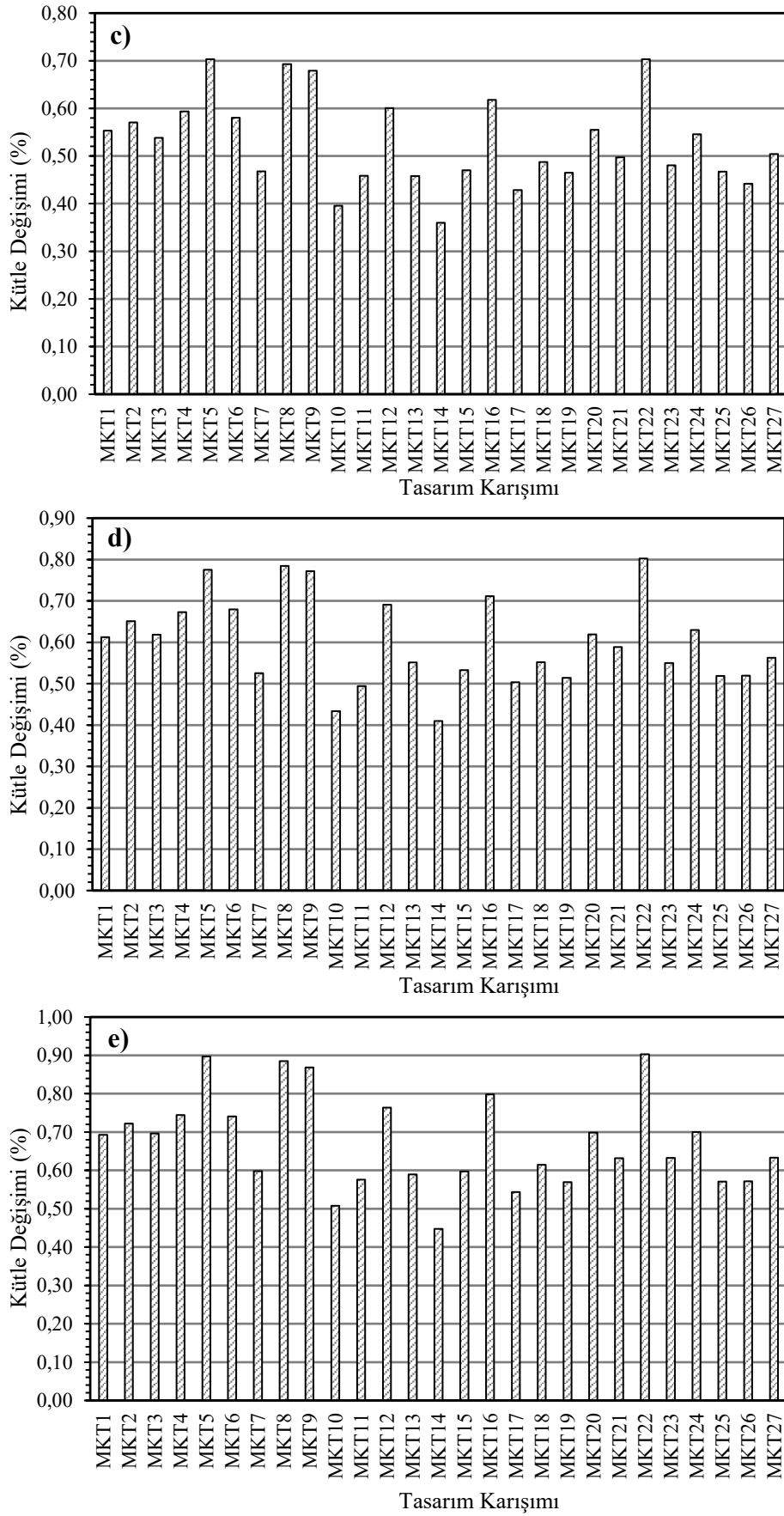
Şekil 4.19. NaCl çözeltisinde bekletilme sonunda eğilme dayanımları için yüzey grafikleri: a) SD/ÖM ve YFC/ÖM, b) AÇ/ÖM ve GDBA/Karışım, c) Bekletme süresi

$$\begin{aligned}
\text{Basınç dayanımı (MPa)} = & 299,05 \times \left(\frac{SD}{\ddot{O}M} \right) + 511,78 \times \left(\frac{YFC}{\ddot{O}M} \right) + 319,65 \times \left(\frac{A\check{C}}{\ddot{O}M} \right) \\
& + 2925,37 \times \left(\frac{GDBA}{Karişım} \right) + 0,41 \times \left(\frac{Bekletme}{Süresi} \right) + 547,95 \times \left(\frac{SD}{\ddot{O}M} \times \frac{YFC}{\ddot{O}M} \right) \\
& - 167,58 \times \left(\frac{SD}{\ddot{O}M} \times \frac{A\check{C}}{\ddot{O}M} \right) + 246,50 \times \left(\frac{SD}{\ddot{O}M} \times \frac{GDBA}{Karişım} \right) - 0,25 \times \left(\frac{SD}{\ddot{O}M} \times \frac{Bekletme}{Süresi} \right) \\
& + 36,88 \times \left(\frac{YFC}{\ddot{O}M} \times \frac{A\check{C}}{\ddot{O}M} \right) - 642,50 \times \left(\frac{YFC}{\ddot{O}M} \times \frac{GDBA}{Karişım} \right) + 0,55 \times \left(\frac{YFC}{\ddot{O}M} \times \frac{Bekletme}{Süresi} \right) \\
& + 129,25 \times \left(\frac{A\check{C}}{\ddot{O}M} \times \frac{GDBA}{Karişım} \right) - 0,56 \times \left(\frac{A\check{C}}{\ddot{O}M} \times \frac{Bekletme}{Süresi} \right) + 2,99 \times \left(\frac{GDBA}{Karişım} \times \frac{Bekletme}{Süresi} \right) \\
& - 855,13 \times \left(\frac{SD}{\ddot{O}M} \right)^2 - 512,63 \times \left(\frac{YFC}{\ddot{O}M} \right)^2 - 175,78 \times \left(\frac{A\check{C}}{\ddot{O}M} \right)^2 - 2532,90 \times \left(\frac{GDBA}{Karişım} \right)^2 \\
& - 0,14 \times \left(\frac{Bekletme}{Süresi} \right)^2 - 1089,75
\end{aligned} \tag{4.9}$$

$$\begin{aligned}
\text{Eğilme dayanımı (MPa)} = & 25,17 \times \left(\frac{SD}{\ddot{O}M} \right) + 65,00 \times \left(\frac{YFC}{\ddot{O}M} \right) + 32,96 \times \left(\frac{A\check{C}}{\ddot{O}M} \right) \\
& + 325,95 \times \left(\frac{GDBA}{Karişım} \right) + 0,31 \times \left(\frac{Bekletme}{Süresi} \right) + 69,15 \times \left(\frac{SD}{\ddot{O}M} \times \frac{YFC}{\ddot{O}M} \right) \\
& - 38,58 \times \left(\frac{SD}{\ddot{O}M} \times \frac{A\check{C}}{\ddot{O}M} \right) + 74,10 \times \left(\frac{SD}{\ddot{O}M} \times \frac{GDBA}{Karişım} \right) - 0,04 \times \left(\frac{SD}{\ddot{O}M} \times \frac{Bekletme}{Süresi} \right) \\
& + 11,98 \times \left(\frac{YFC}{\ddot{O}M} \times \frac{A\check{C}}{\ddot{O}M} \right) - 119,30 \times \left(\frac{YFC}{\ddot{O}M} \times \frac{GDBA}{Karişım} \right) + 0,03 \times \left(\frac{YFC}{\ddot{O}M} \times \frac{Bekletme}{Süresi} \right) \\
& + 23,25 \times \left(\frac{A\check{C}}{\ddot{O}M} \times \frac{GDBA}{Karişım} \right) - 0,07 \times \left(\frac{A\check{C}}{\ddot{O}M} \times \frac{Bekletme}{Süresi} \right) + 0,33 \times \left(\frac{GDBA}{Karişım} \times \frac{Bekletme}{Süresi} \right) \\
& - 92,79 \times \left(\frac{SD}{\ddot{O}M} \right)^2 - 47,19 \times \left(\frac{YFC}{\ddot{O}M} \right)^2 - 19,55 \times \left(\frac{A\check{C}}{\ddot{O}M} \right)^2 - 288,77 \times \left(\frac{GDBA}{Karişım} \right)^2 \\
& - 0,04 \times \left(\frac{Bekletme}{Süresi} \right)^2 - 116,94
\end{aligned} \tag{4.10}$$

NaCl çözeltilerinde bekletme ile kütlede MgSO₄ çözeltisinde bekletmede olduğu gibi artış göstermiş (Şekil 4.20); fakat bu artış benzer şekilde değişkenlerle ilişkili olmamıştır. Bu sonuçtan, kütle artışlarının sadece numune yüzeylerinde ve boşluklarında çökelme nedeniyle birikmiş NaCl kristalleri ile meydana geldiği anlaşılmıştır.





Şekil 4.20. NaCl çözeltisinde bekletme sonunda kütle değişimleri: a) Bir ay, b) İki ay, c) Üç ay, d) Dört ay, e) Altı ay

4.5. SEM ve XRD Analizleri

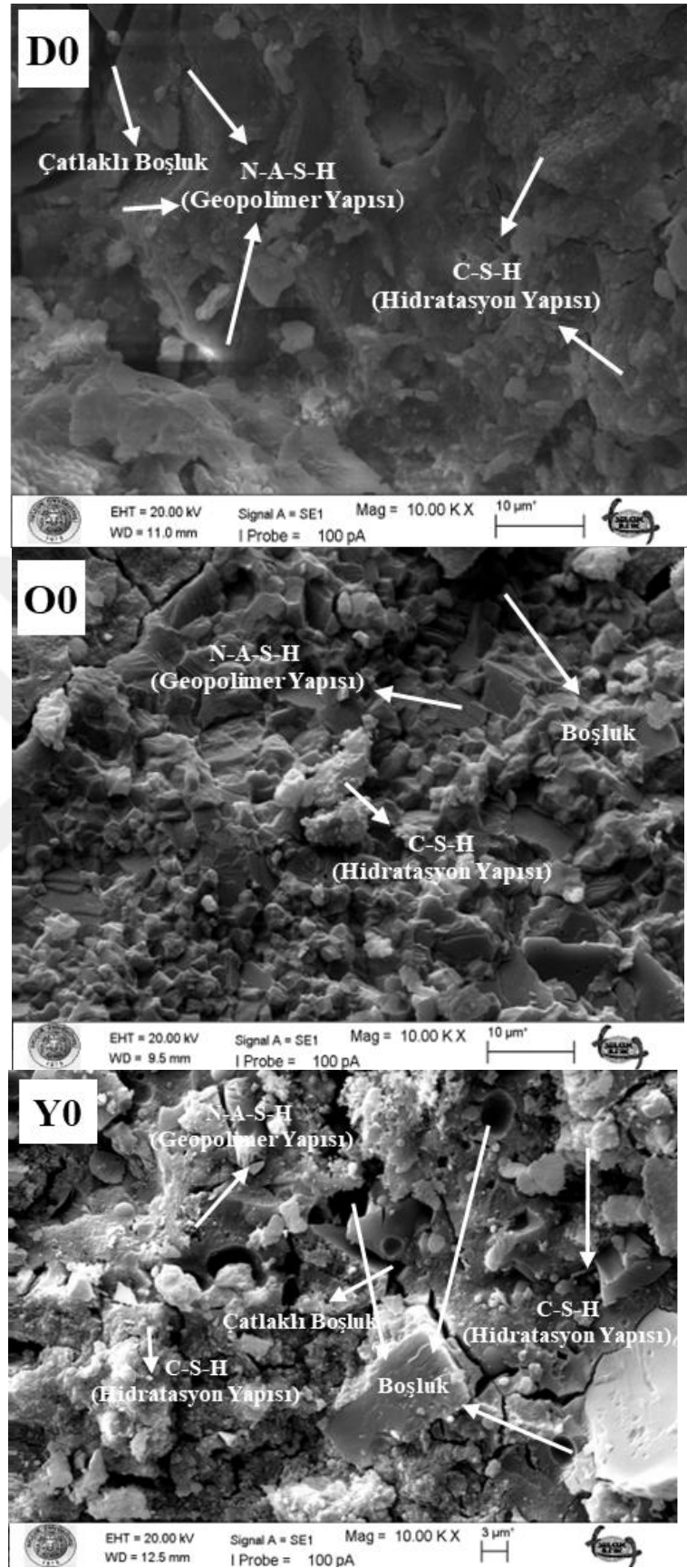
SEM ve XRD analizleri için 27 karışımdan oluşan MKT içinden 28 günlük oda koşullarında kür sonunda basınç dayanımları düşük (MKT6), orta (MKT22) ve yüksek (MKT12) olan üç farklı karışım seçilmiş ve bunların numuneleri sırasıyla D0, O0, Y0 olarak isimlendirilmiştir. Bu karışımların 2, 4 ve 6 ay $MgSO_4$ ve NaCl çözeltilerinde bekletilmiş numuneleri Çizelge 4.14'te verildiği gibi isimlendirilmiştir. SEM ve XRD analizleri hem çözeltilerde bekletilmiş hem de bekletilmemiş olan Çizelge 4.14'teki tüm numunelerde yapılmıştır.

NaCl çözeltisinde bekletilen numunelerde kristal yapıda sodyum ve $MgSO_4$ çözeltilerinde bekletilen numunelerde etrenjit veya jips oluşumu geopolimer ve çimentolu harçlarda oluşması beklenen ürünlerdendir. Bu ürünler harç/beton yapısına zarar vererek mekanik performansta yetersizliklere neden olur. NaCl çözeltisinde bekletme neticesinde çatlak veya boşlukları dolduran sodyum kristalleri donatısız harçlarda ek iç gerilmeler ile stabiliteyi bozarken donatılı harçlarda veya betonlarda donatının paslanmasında büyük rol oynar. Performansı olumsuz etkileyen bu yapılar XRD ve SEM analizleri ile belirlenebilmektedir.

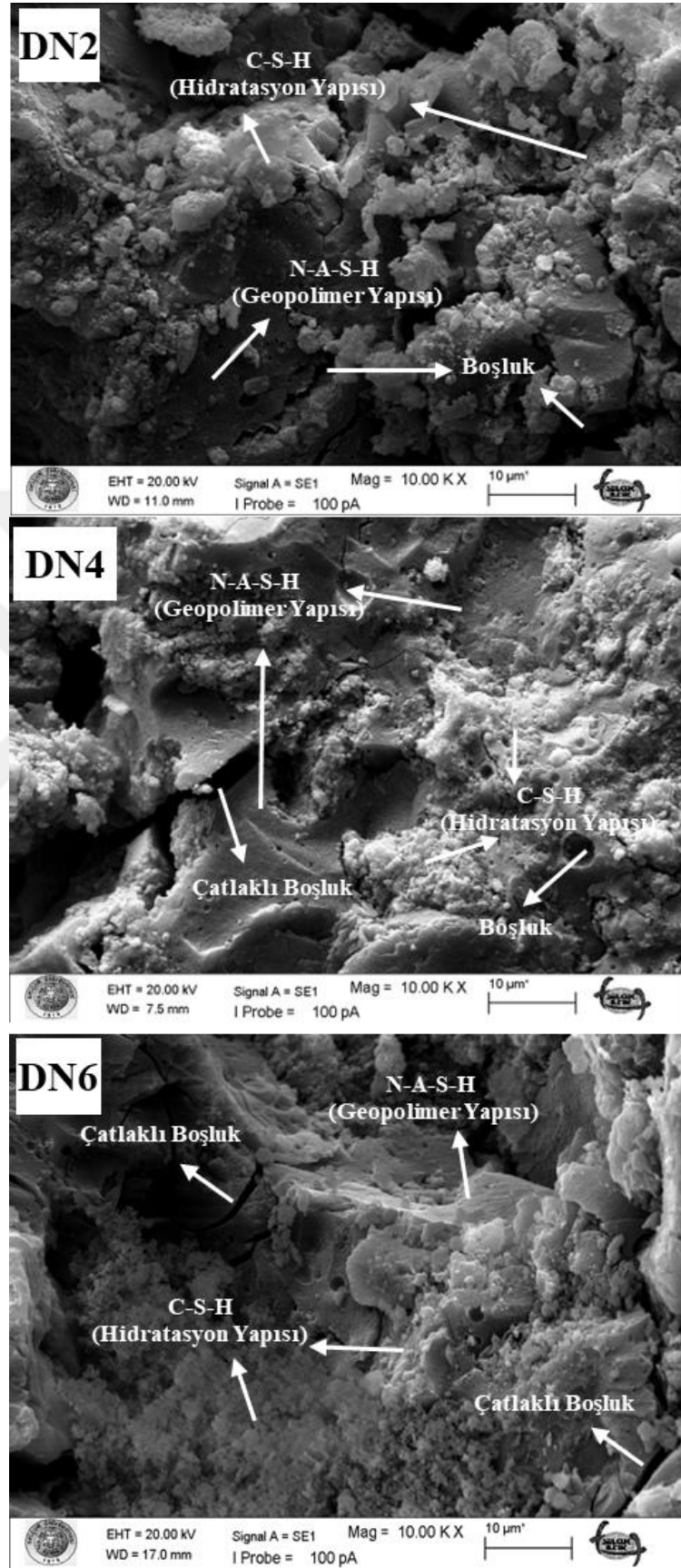
Çizelge 4.14. XRD ve SEM analizi numuneleri

Numune	Çözelti	Bekletme Süresi (ay)
D0	-	-
O0	-	-
Y0	-	-
DN2	NaCl	2
DN4	NaCl	4
DN6	NaCl	6
ON2	NaCl	2
ON4	NaCl	4
ON6	NaCl	6
YN2	NaCl	2
YN4	NaCl	4
YN6	NaCl	6
DM2	$MgSO_4$	2
DM4	$MgSO_4$	4
DM6	$MgSO_4$	6
OM2	$MgSO_4$	2
OM4	$MgSO_4$	4
OM6	$MgSO_4$	6
YM2	$MgSO_4$	2
YM4	$MgSO_4$	4
YM6	$MgSO_4$	6

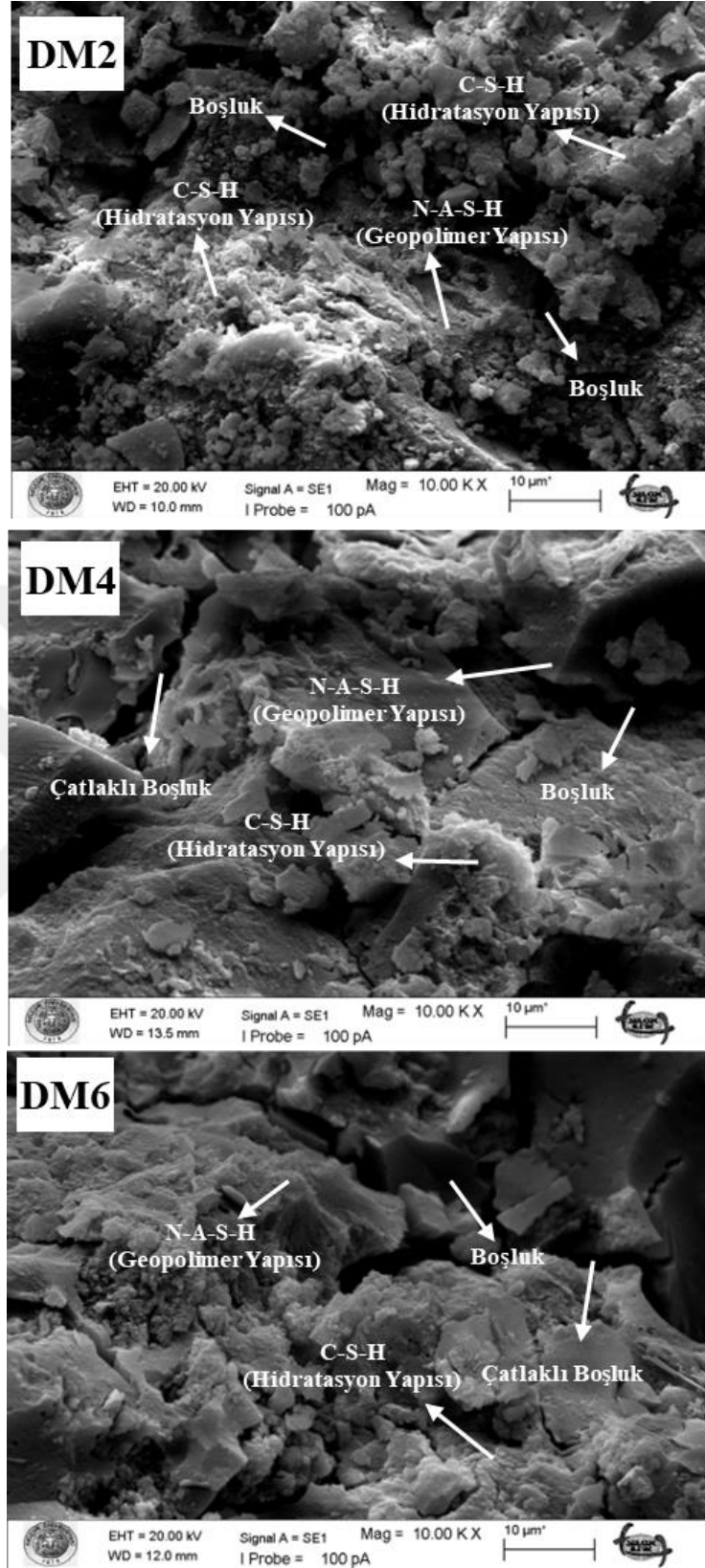
Tez çalışması kapsamında Çizelge 4.14'te verilmiş olan GGH numuneleri için elde edilmiş SEM görüntüleri incelendiğinde esas ürün olarak C-S-H ve N-A-S-H meydana geldiği belirlenmiştir (Şekil 4.21–4.27). Geopolimer harçlarda N-A-S-H'nin asıl ürün olarak ortaya çıkması beklenir (Provis ve Van Deventer, 2009). Tez çalışmasında kullanılan UK'nin az miktarda ve YFC'nin yüksek miktarda CaO içermesi nedeniyle C-S-H'nin de ürün olarak meydana geldiği görülmüştür (Yip ve diğ., 2009). Bu ürünler GGH'nin dayanım kazanmasını sağlayıp mekanik ve dayanıklılık performansını doğrudan etkiler (Bernal ve diğ., 2012). Fakat çözeltilerde bekletilmeyen ve bekletilen numunelerin görüntülerinde önemli farklar olmamıştır. En önemlisi de SEM görüntülerinin hiçbirinde GGH'lerin performansını olumsuz yönde etkileyecek bireysel sodyum kristalleri ve etrenjit veya jips yapıları meydana gelmemiştir. Bu durumda hem NaCl çözeltisinde hem de MgSO₄ çözeltisinde bekletme neticesinde GGH performansını olumsuz yönde etkileyecek zararlı ürünler oluşmamıştır. Geopolimerin çimentolu sistemlere göre daha dayanıklı olduğu literatürde daha önce belirtilmiştir (Bakharev, 2005). Bu tez çalışmasında da benzer bir durum ortaya çıkmıştır. SEM görüntülerinde zararlı ürün oluşumu gözlenmemesine rağmen boşluklar ve çatlaklar meydana geldiği görülmüştür. Boşlukların bir kısmı hapsolmuş haldeyken bir kısmı çatlaklar şeklinde meydana gelmiştir. Boşluklar ve özellikle çatlaklar NaCl ve Na₂SO₄ çözeltilerinde bekletme sonunda meydana gelen zararlı ürünler veya bireysel sodyum kristalleri ile meydana gelebilir (Santhanam ve diğ., 2002; Adediran ve diğ., 2022); fakat çalışma kapsamında bu ürünlerin varlığı gözlenmemiştir. Buna göre iki durum ortaya çıkmaktadır: Bunlardan ilki, zararlı ürünlerin daha önce oluşup boşluk ve çatlak oluşturduktan sonra tekrar çözünmesi veya taşınmış olması; ikincisi ise AÇ'den karışıma katılan fazla su nedeniyle buharlaşan veya sızan suyun yüksek miktarlarda olması. İkinci durumun bu tez çalışmasında gerçekleşmiş olması daha olasıdır. Çünkü çalışmada kullanılan AÇ/ÖM oranının en az 0,90 olması, Giriş ve Kaynak Araştırması bölümünde verilmiş olan literatür bilgilerine göre oldukça yüksektir. Yeterli işlenebilirliği sağladıktan ve reaksiyonlarda kullanıldıktan sonra fazla su sızmış ve buharlaşmış, böylece çatlaklar ve boşluklar meydana gelmiştir. Ayrıca, dayanım seviyeleri ile SEM görüntüleri arasında doğrusal bir ilişki gözlenmemiştir.



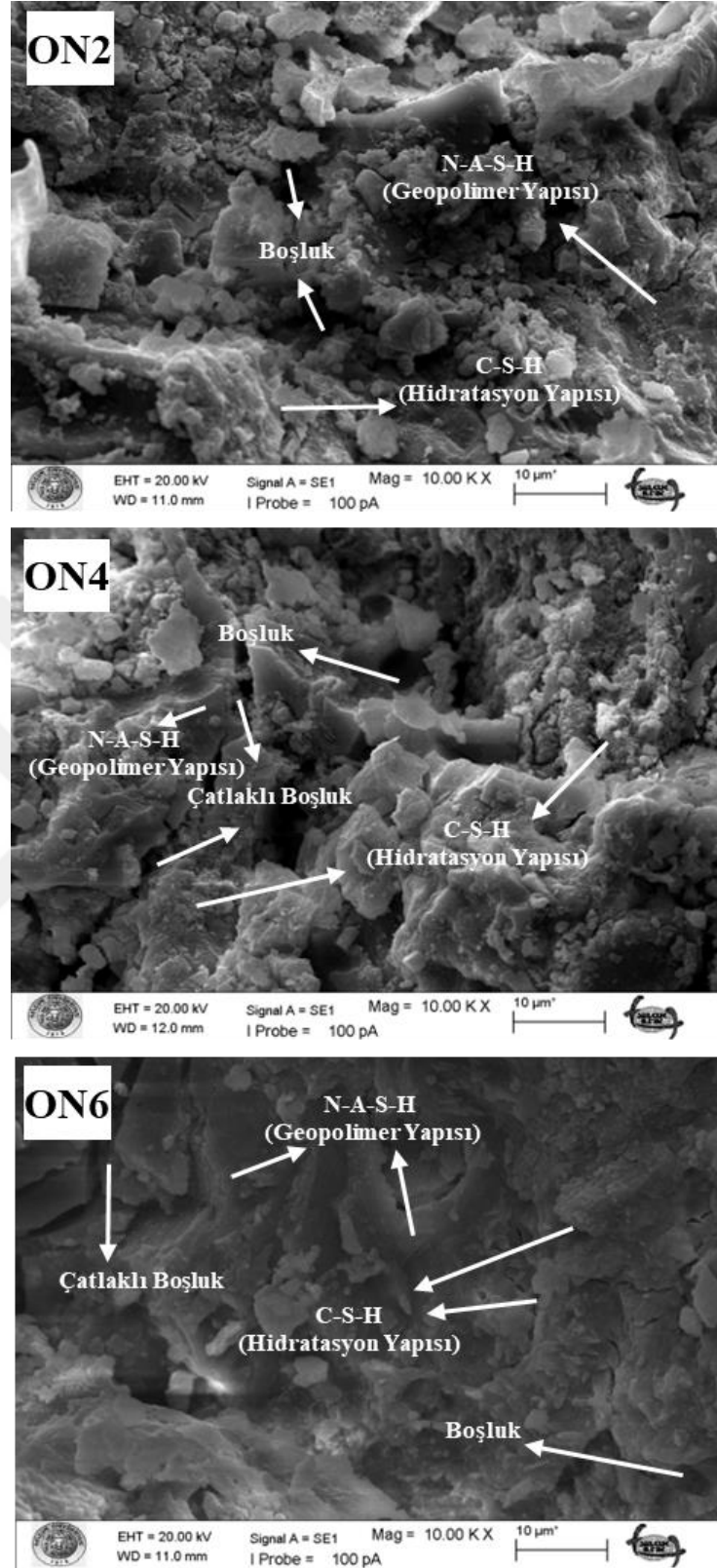
Şekil 4.21. D0, O0 ve Y0 SEM görüntüleri



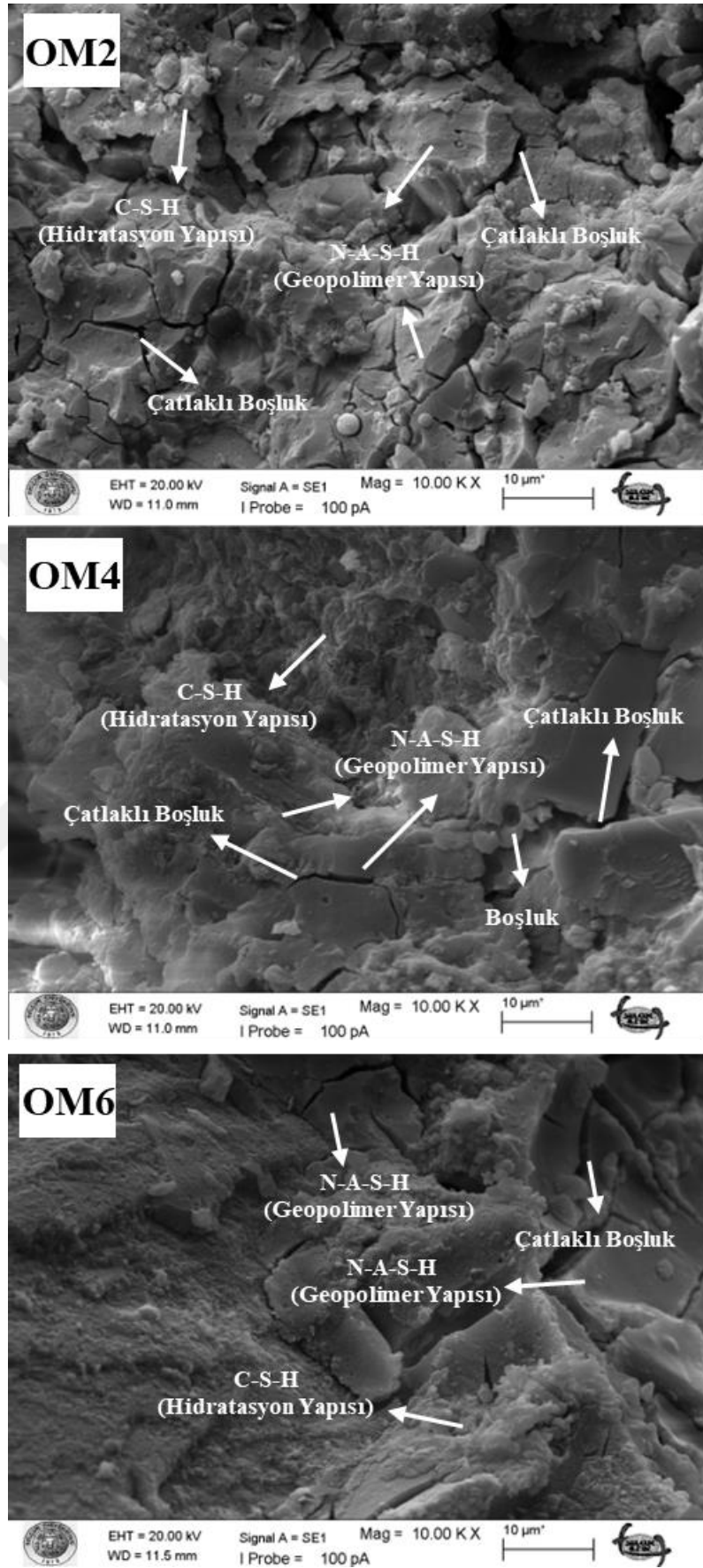
Şekil 4.22. DN2, DN4 ve DN6 SEM görüntüleri



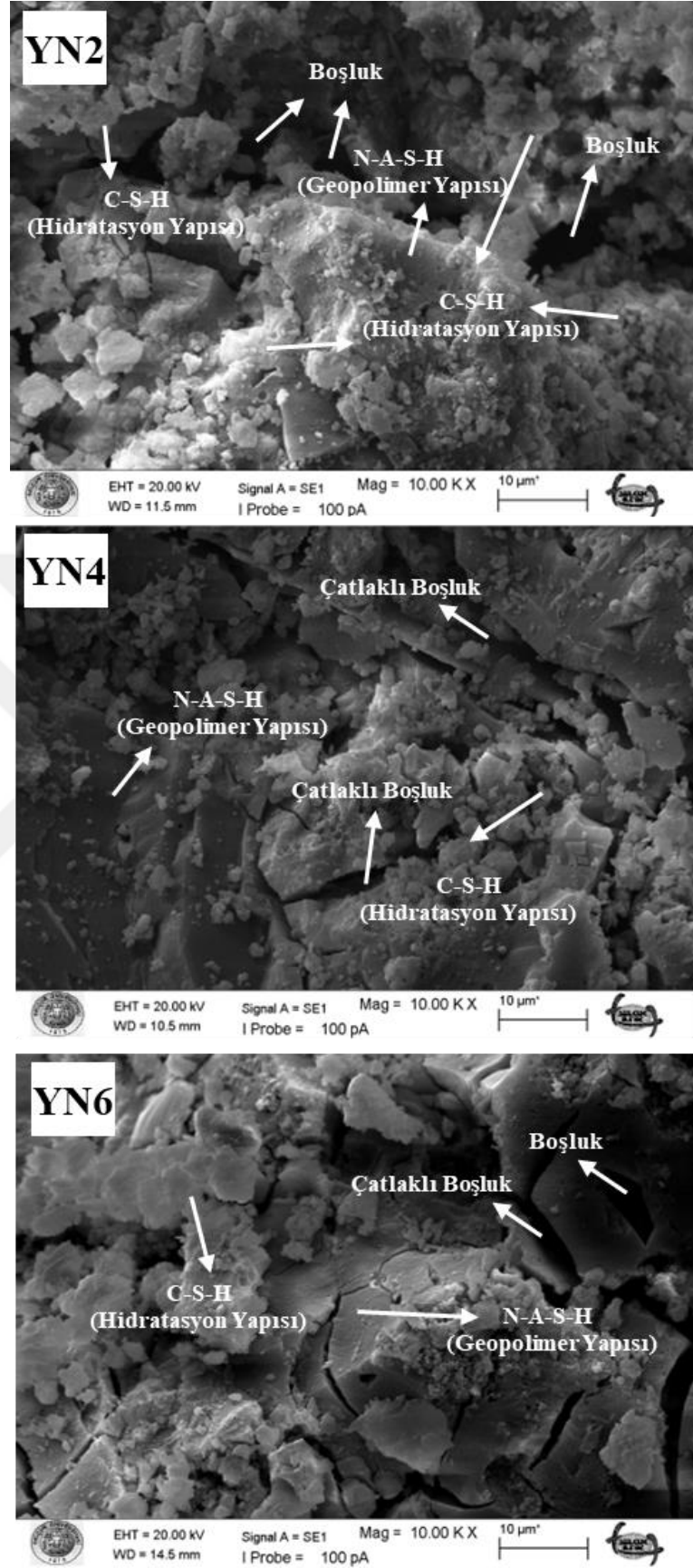
Şekil 4.23. DM2, DM4 ve DM6 SEM görüntüleri



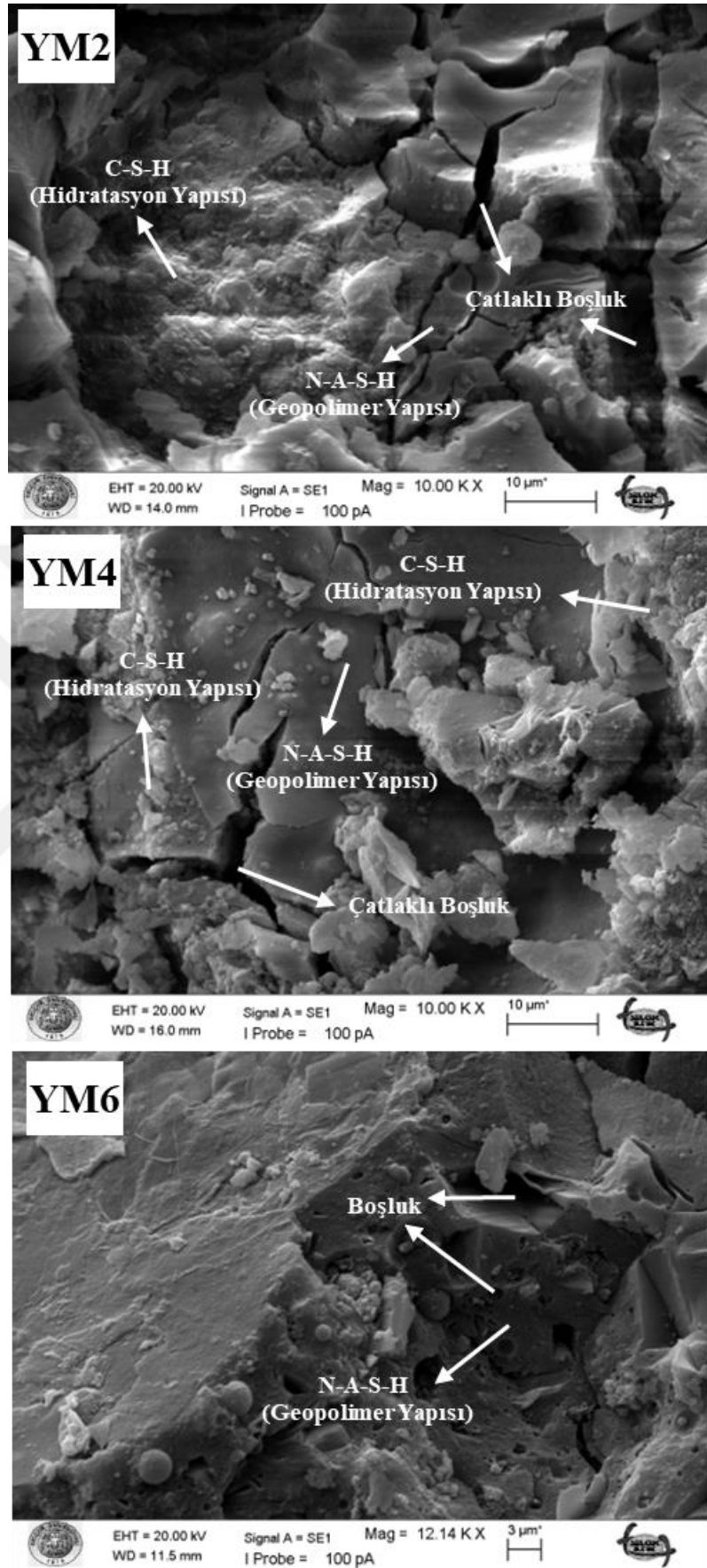
Şekil 4.24. ON2, ON4 ve ON6 SEM görüntüleri



Şekil 4.25. OM2, OM4 ve OM6 SEM görüntüleri

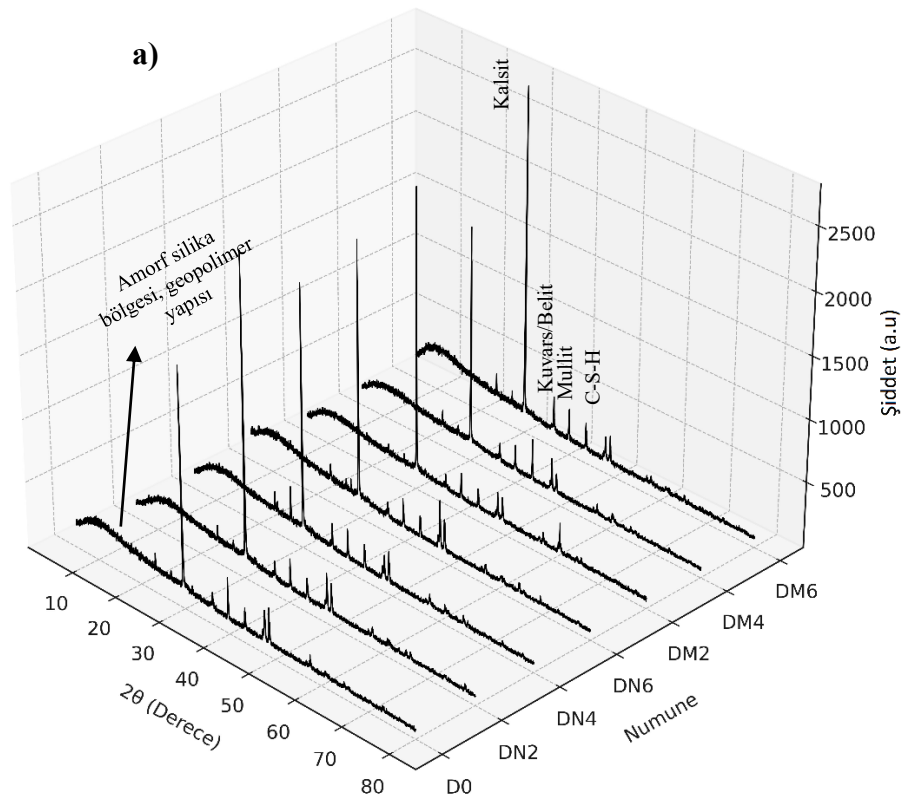


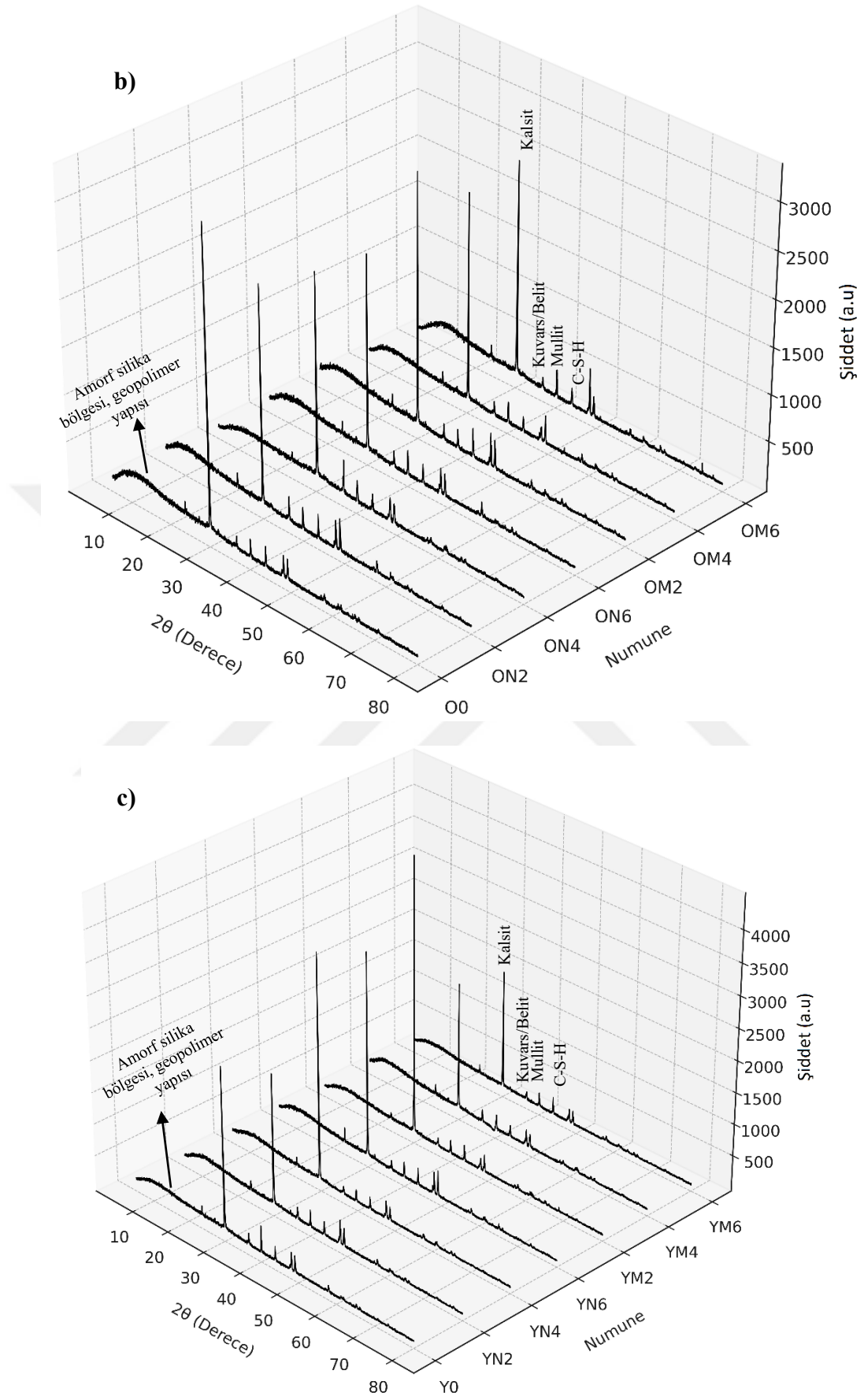
Şekil 4.26. YN2, YN4 ve YN6 SEM görüntüleri



Şekil 4.27. YM2, YM4 ve YM6 SEM görüntüleri

Tez çalışmasında Çizelge 4.14'te verilmiş olan GGH numuneleri için XRD kırınım desenleri incelendiğinde amorf silika bölgesi (geopolimer yapı), C-S-H, kalsit ve kuvars varlığı tüm kırınım desenlerinde dikkat çekmektedir (Şekil 4.28). Amorf bölge ve C-S-H varlığı GGH'lerin dayanım kazanmasındaki esas etkenlerdir. Fakat SEM görüntülerinde olduğu gibi D0, O0 ve Y0 numuneleri ile 6 aylık NaCl ve MgSO₄ çözeltilerinde bekletilmiş numuneler karşılaştırıldığında kristal fazlarda bir artma veya amorf bölgede azalma meydana gelmemiştir. Büyük bir tepe noktasında tüm çevrimlerde kalsit varlığı gözlenmiştir. Bunun nedeni GDBA'nın daha önce karbonatlaşmaya maruz kalmış yapışık çimento harcı ve kireçtaşıdan oluşan agrega kısmıdır. SEM görüntülerinde kalsiyum karbonat gözlenmemesi de buna işaret etmektedir. Bu durumda GGH'lerin 28 günlük kür sonundaki dayanımlarından bağımsız olarak hem NaCl hem de MgSO₄ çözeltisinde bekletmenin GGH'ye bir zarar vermediği anlaşılmaktadır. NaCl çözeltisinin GGH'ye zarar verdiğinin anlaşılabilmesi için en azından NaCl varlığını gösteren halit benzeri bir mineral veya bileşiğin XRD kırınım desenlerinde tepe noktalarının meydana gelmesi beklenirken bu çalışmada ilgili tepe noktaları elde edilmemiştir. Aynı şekilde MgSO₄ etkisi altında meydana gelebilecek jips veya etrenjit de XRD kırınım desenlerinde belirlenmemiştir.





Şekil 4.28. GGH numunelerinin XRD kırınım desenleri: a) Düşük dayanıma sahip, b) Orta seviyede dayanıma sahip, c) Yüksek seviyede dayanıma sahip

4.6. Optimum GGH, Kontrol Deneyleri ve GDBA'lı Geopolimer Beton

Optimum GGH'nin $MgSO_4$ ve $NaCl$ çözeltilerinde bekletilme sonundaki performansının optimizasyonda değerlendirilmesi ilk başta ön görülmüştür. Fakat zararlı ortam koşullarının, mekanik performansa olumsuz bir etkisinin olmadığı ve değişkenlerin mekanik performansa etkisinde bir değişimine yol açmadığı belirlendikten sonra oda koşullarında 28 gün kür edilen numunelerin mekanik performansı ile yayılma değerleri ve priz başlangıç süreleri dikkate alınarak optimum GGH belirlenmiştir. Optimum GGH karışımı belirlenirken Design Expert yazılımının sayısal optimizasyon modülü kullanılmıştır. Bu modülde sağlanması gereken kriterler olarak, dayanımların en yüksek olması ve yayılma değerinin ASTM C109 (2021) standardındaki hazırlanacak numune için yaklaşık %100 yayılmayı sağlayacak yayılma değeri olan 20 cm seçilmesi uygun görülmüştür. Priz başlangıç süreleri genel olarak oldukça yüksek olduğundan bir kriter olarak kullanılmamıştır. Sayısal optimizasyon modülünde optimizasyon çalışması istenirlik fonksiyonunun 1'e yakın olmasını sağlamaya yönelik olarak gerçekleştirilmiştir. Optimizasyon sonucunda SD/ÖM için 0,269, YFC/ÖM için 0,332, AÇ/ÖM için 1,05 ve GDBA/ÖM için 0,556 oranlarının uygun olduğu belirlenmiştir. Bu oranlar doğrulama değerlerinde kullanılacağı için öncelikle model formüllerine bu değişkenler yazılarak tahmini dayanımlar, yayılma değeri, priz başlangıç süresi, $MgSO_4$ çözeltilisinde bekletilme sonunda dayanımlar ve $NaCl$ çözeltilisinde bekletilme sonunda dayanımlar tespit edilmiştir. Sonrasında optimum GGH karışımı ile numuneler hazırlanmış; dayanımlar, yayılma değeri, priz başlangıç süresi, $MgSO_4$ çözeltilisinde bekletme sonunda dayanımlar ve $NaCl$ çözeltilisinde bekletme sonunda dayanımlar deneysel olarak elde edilmiştir. Tahmin verileri ile deneysel veriler ve bunların tutarlılık oranları Çizelge 4.15'te verilmiştir. Tüm performans özellikleri için deneysel verilerin model tahminlerine oranı 0,89-1,10 arasında olmuştur. Elde edilmiş olan yüksek tutarlılık değerleri istatistiksel yöntemlerle oluşturulmuş modellerin GGH performansının incelenmesinde ve optimum GGH davranışının tahmin edilmesinde uygun olduğunu göstermiştir. Bu karışımın işlenebilirlik özelliğinin iyi, priz başlangıcının uzun ve dayanımının yüksek olması, küçük ölçekli model deneylerde tekil kazık ve kazıklı radye sistemi malzemesi olarak kullanılması için uygun olduğunu ortaya koymuştur.

Optimum GGH için elde edilmiş olan SD/ÖM için 0,269, YFC/ÖM için 0,332, AÇ/ÖM için 1,05 ve GDBA/ÖM için 0,556 oranları kullanılarak oluşturulan GDBA'lı geopolimer betonun da basınç dayanımı ve dayanıklılığı belirlenmiştir (Çizelge 4.16).

GGH ile GDBA'lı geopolimer betonun basınç dayanımları arasındaki oran 0,85-0,97 arasında olmuştur. Buna göre geopolimer betonda daha düşük basınç dayanımı elde edilmiştir. İri agrega kullanımı nedeniyle oluşabilen gerilme yığılmaları ve arayüz geçiş bölgesinde meydana gelebilen zayıflıklar betonun basınç dayanımının harçtan daha düşük olmasına neden olmuştur.

Çizelge 4.15. Optimum GGH için model tahminleri ve deneysel çalışma karşılaştırması

Özellik	Çözelti	Bekletme Süresi (ay)	Model Tahmini	Deneysel Veri	Tutarlılık
Yayılma (cm)	-	-	19,96	19,12	0,96
Priz Süresi (dk)	-	-	517	538	1,04
	-	-	34,84-6,54	34,01-6,14	0,98-0,94
	MgSO ₄	1	37,38-6,97	35,14-6,22	0,94-0,89
	MgSO ₄	2	38,55-7,22	37,02-6,72	0,96-0,93
	MgSO ₄	3	39,44-7,41	40,23-7,14	1,02-0,96
	MgSO ₄	4	40,04-7,54	40,44-7,28	1,01-0,97
	MgSO ₄	6	40,41-7,61	40,82-7,35	1,01-0,97
	NaCl	1	37,19-6,98	34,96-6,84	0,94-0,98
	NaCl	2	38,37-7,28	36,84-7,98	0,96-1,10
	NaCl	3	39,27-7,50	38,17-8,14	0,97-1,09
	NaCl	4	39,88-7,64	38,25-8,25	0,96-1,08
	NaCl	6	40,26-7,67	38,36-8,34	0,95-1,09

Çizelge 4.16. GDBA'lı geopolimer beton basınç dayanımları

Çözelti	Bekletme Süresi (ay)	Basınç Dayanımı (MPa)	GDBA'lı Geopolimer Beton Basınç Dayanımının GGH Basınç Dayanımına Oranı
Sadece 28 gün oda şartlarında kür	-	30,20	0,89
MgSO ₄	1	33,94	0,97
MgSO ₄	2	34,48	0,93
MgSO ₄	3	36,19	0,90
MgSO ₄	4	36,75	0,91
MgSO ₄	6	36,89	0,90
NaCl	1	29,82	0,85
NaCl	2	32,87	0,89
NaCl	3	35,11	0,92
NaCl	4	36,16	0,95
NaCl	6	36,29	0,95

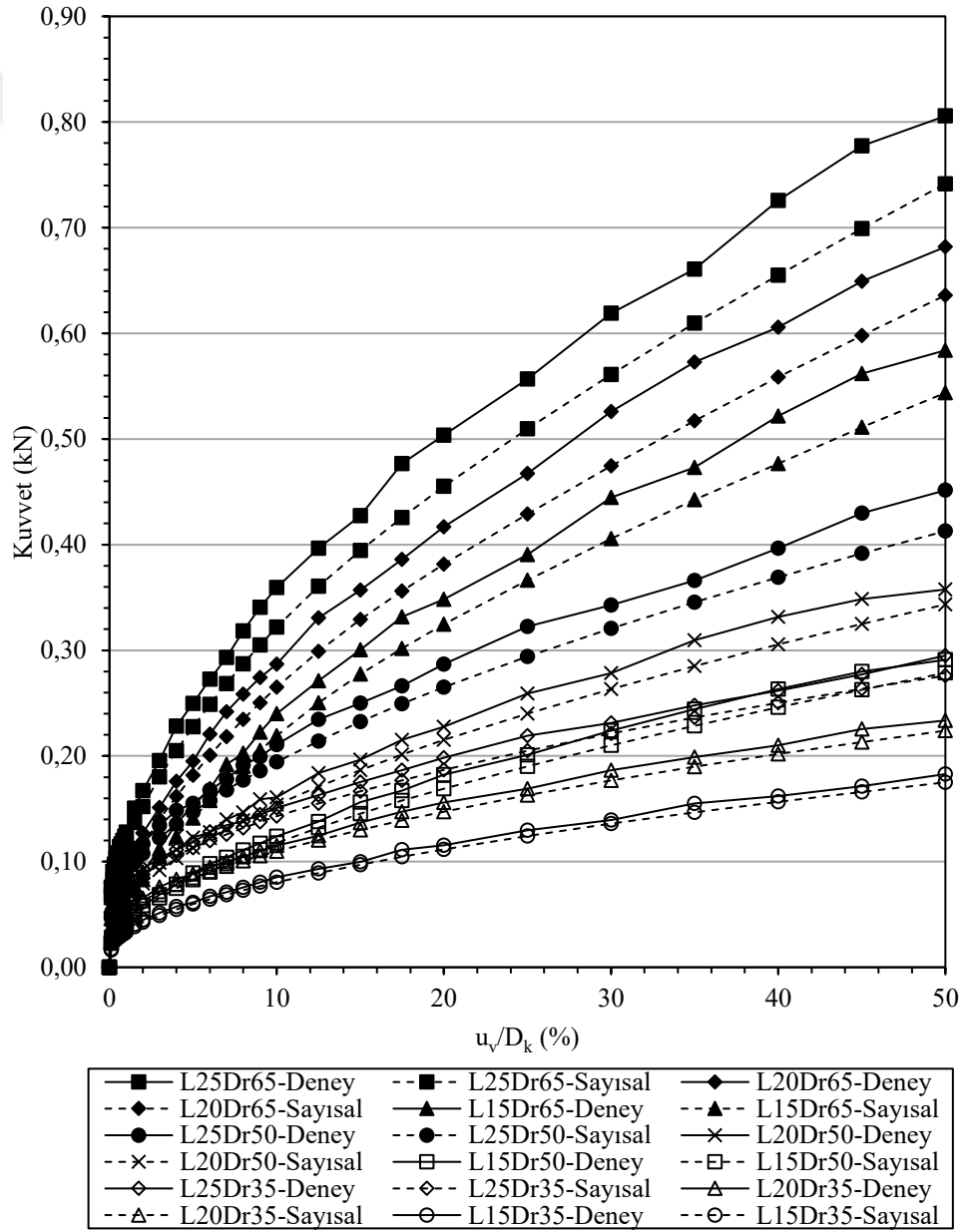
4.7. Tekil Kazıklarda Düşey Yükleme

Tekil kazıklar için yapılan düşey yükleme deneyleri ile kazıkların kuvvet-oturma davranışı, kazıklardaki eksenel yükler ve çevre sürtünmesi ile zeminde meydana gelen gerilme artışları bu bölümde sunulmuştur. Bu bölümde u_v sembolü oturmayı göstermektedir. Ayrıca her bölümde u_v/D_k oranının %0,5, %5 ve %20 olduğu oturma seviyelerinde elde edilen veriler için istatistik analiz yapılmış; L_k/D_k , D_{rkum} ve u_v/D_k değişkenlerinin sonuçlar üzerindeki etkisi incelenmiştir.

4.7.1. Kuvvet-oturma davranışı

Kazıklarda yapılan düşey yükleme ile kazıkların hem deneyler hem de sayısal analizler ile kuvvet-oturma davranışı elde edilmiştir (Şekil 4.29). Buna göre u_v/D_k oranının %0,5, %5 ve %20 olduğu oturma seviyelerinde en büyük taşınan kuvvetler L25Dr65 tasarımında sırasıyla 0,108, 0,250 ve 0,504 kN; en küçük taşınan kuvvetler L15Dr35 tasarımında sırasıyla 0,029, 0,061 ve 0,115 kN olmuştur. Çizelge 4.17'deki girdiler ve deney sonuçlarından elde edilmiş ilgili oturma seviyesinde kazık tarafından taşınan toplam yükler ile ANOVA yapılmış (Çizelge 4.18) ve R^2 , R^2_d ve R^2_t değerleri sırasıyla 0,988, 0,984 ve 0,971 olmuştur. Model; ana etki, etkileşim ve L_k/D_k değişkeninin ikinci dereceden terimi hariç ikinci dereceden terimleri içerecek şekilde oluşturulmuştur (Eşitlik 4.11). Şekil 4.30 değişkenlerin taşınan kuvvetlere etkisinin incelenmesinde dikkate alınmıştır. Modelin R^2 değerlerinin ve F değerlerinin yüksek olması ile p değerinin küçük olması bu modelin oldukça anlamlı bir model olduğunu ve davranışı doğru bir şekilde yakalayabildiğini göstermiştir (Şekil 4.31). Kuvvet-oturma davranışını en fazla etkileyen etkenin u_v/D_k olduğu, sonra kumun dayanım ve rijitliğinin göstergesi olan D_{rkum} olduğu gözlenmiştir. Bir değişken olarak sonradan eklenen u_v/D_k artışıyla taşınan yükler sürekli artmıştır. Bu artış aslında tasarım parametresi etkisinden ziyade yük-oturma mekanizmasında çevre sürtünmesinin ve uç dirençlerin kademeli olarak harekete geçmesiyle ilgili olmuştur. Etkileşim terimlerinin modeldeki katsayılarının pozitif olması da bu durumun önemli bir göstergesidir. D_{rkum} artışı kumun içsel sürtünme açısını, dilatasyon potansiyelini ve rijitliğini artırmıştır. D_{rkum} 'un olumlu etkisi oturma seviyesinin artmasıyla daha da kuvvetlenmiştir. D_{rkum} etkisinin yüksek oturma seviyelerinde daha belirgin olması, sıkı kumda uç direncinin de çok daha büyük değerlere ulaşabilmesiyle ilgilidir; çünkü oturma seviyeleri arttıkça uç direncinin etkisi baskın hale

gelmektedir. L_k/D_k değerinin artmasıyla taşınan yükte artış meydana gelmesi de çevre sürtünmesinin ve uç direncinin artmasıyla açıklanabilir. Tek başına L_k/D_k oranının 15'ten 25'e yükselmesi, bütün rölatif sıkılık ve oturma seviyelerinde toplam kuvvet üzerinde olumlu etki yapmıştır. Bununla birlikte, bu etkinin büyüklüğü sabit olmamış, düşük oturma seviyelerinde daha etkili olmuştur. Buna karşılık, D_{rkum} ve u_v/D_k arttıkça L_k/D_k 'nin olumlu etkisi devam etmiş, L_k/D_k sıkılık ve oturma ile beraber etkili olmuştur. Yani oturma ve sıkılık düşük seviyelerdeyken toplam kuvvetin artışına yüzde olarak etkisi daha fazla olmuştur. Özellikle oturma daha düşük seviyelerdeyken çevre sürtünmesinin hızlı bir şekilde artması bu durumda etkili olmuştur.



Şekil 4.29. Tekil kazıkların taşıdığı kuvvetlerin oturma seviyelerine bağlı olarak değişimi

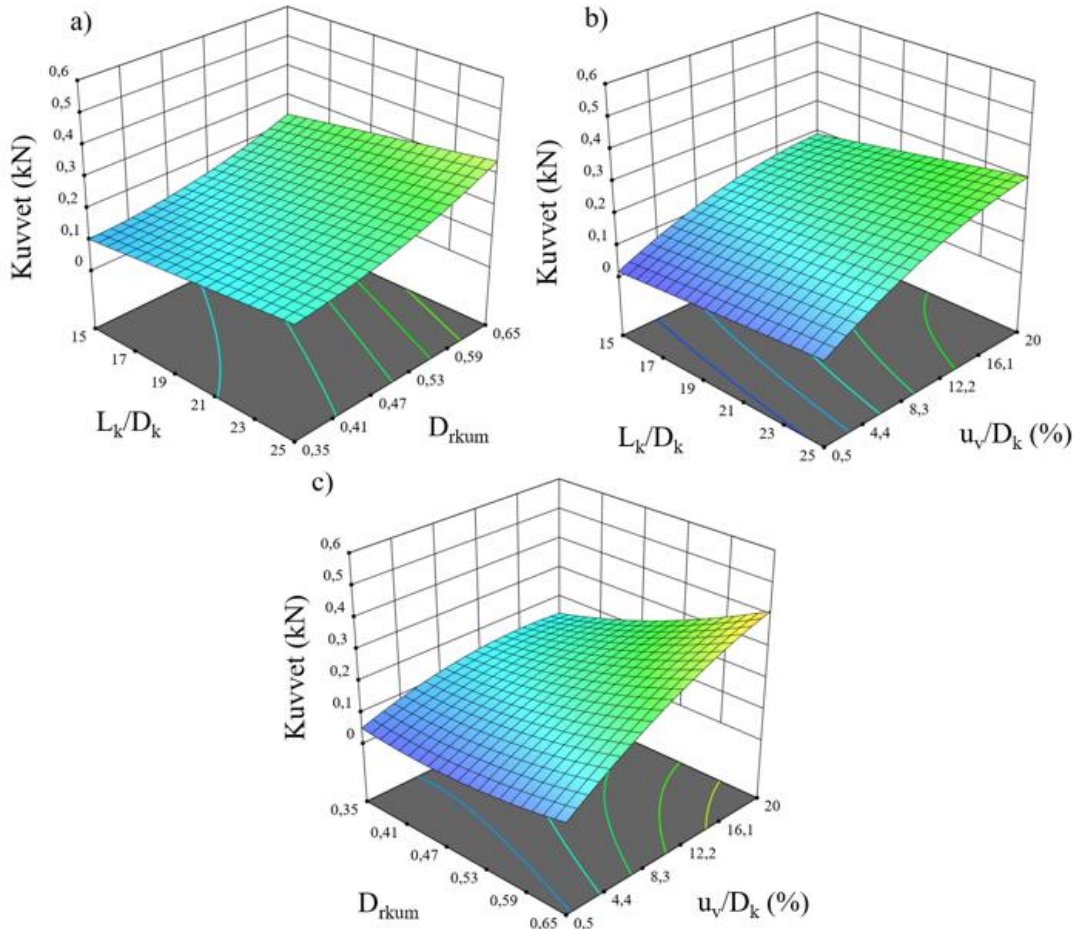
Çizelge 4.17. Tekil kazıklarda kuvvet-oturma davranışının istatistiksel analizinde dikkate alınan değişkenler ve toplam kuvvetler

Tasarım	L_k/D_k	D_{rkum}	u_v/D_k (%)	Kuvvet (kN)
L25Dr65	25	0,65	0,50	0,108
L20Dr65	20	0,65	0,50	0,076
L15Dr65	15	0,65	0,50	0,049
L25Dr50	25	0,50	0,50	0,081
L20Dr50	20	0,50	0,50	0,057
L15Dr50	15	0,50	0,50	0,035
L25Dr35	25	0,35	0,50	0,070
L20Dr35	20	0,35	0,50	0,048
L15Dr35	15	0,35	0,50	0,029
L25Dr65	25	0,65	5,00	0,250
L20Dr65	20	0,65	5,00	0,195
L15Dr65	15	0,65	5,00	0,153
L25Dr50	25	0,50	5,00	0,155
L20Dr50	20	0,50	5,00	0,123
L15Dr50	15	0,50	5,00	0,089
L25Dr35	25	0,35	5,00	0,118
L20Dr35	20	0,35	5,00	0,088
L15Dr35	15	0,35	5,00	0,061
L25Dr65	25	0,65	20,00	0,504
L20Dr65	20	0,65	20,00	0,417
L15Dr65	15	0,65	20,00	0,348
L25Dr50	25	0,50	20,00	0,287
L20Dr50	20	0,50	20,00	0,228
L15Dr50	15	0,50	20,00	0,182
L25Dr35	25	0,35	20,00	0,198
L20Dr35	20	0,35	20,00	0,156
L15Dr35	15	0,35	20,00	0,115

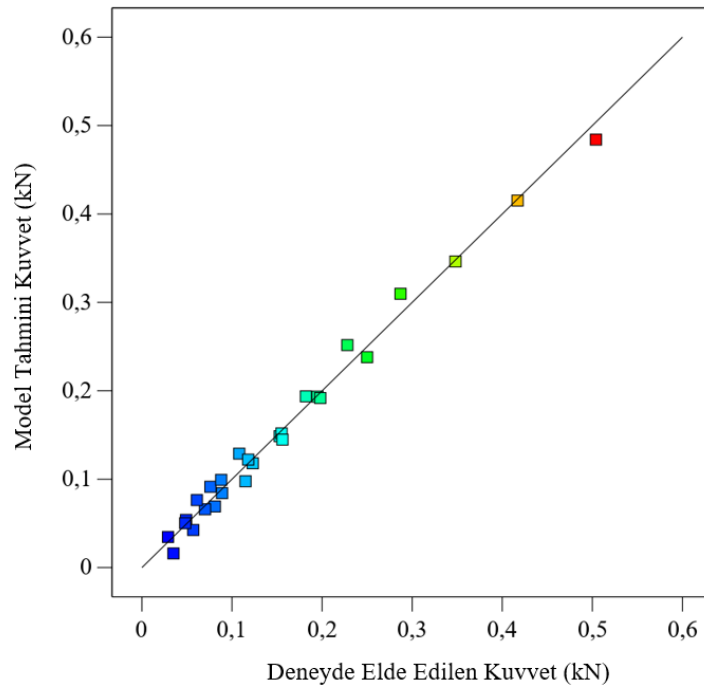
Çizelge 4.18. Tekil kazıklarda kuvvet-oturma davranışı için yapılan ANOVA sonuçları

Kaynak	Kareler Toplamı	Serbestlik Derecesi	Ortalama Kare	F-değeri	p-değeri	Model Formülü Katsayısı
Model	0,3649	8	0,0456	198,04	< 0,0001	0,331 (Sabit)
L_k/D_k	0,0308	1	0,0308	133,74	< 0,0001	-0,002
D_{rkum}	0,1046	1	0,1046	454,26	< 0,0001	-1,430
u_v/D_k	0,1968	1	0,1968	854,44	< 0,0001	-0,007
$L_k/D_k \times D_{rkum}$	0,0014	1	0,0014	6,21	0,0227	0,015
$L_k/D_k \times u_v/D_k$	0,0033	1	0,0033	14,14	0,0014	0,0003
$D_{rkum} \times u_v/D_k$	0,0432	1	0,0432	187,69	< 0,0001	0,039
$(D_{rkum})^2$	0,0048	1	0,0048	20,83	0,0002	1,257
$(u_v/D_k)^2$	0,0040	1	0,0040	17,56	0,0005	-0,0004
Hata	0,0041	18	0,0002			

$$\begin{aligned}
Kuvvet \text{ (kN)} = & -0,002 \times \left(\frac{L_k}{D_k} \right) - 1,430 \times (D_{rkum}) - 0,007 \times \left(\frac{u_v}{D_k} \right) + 0,015 \times \left(\frac{L_k}{D_k} \times D_{rkum} \right) \\
& + 0,0003 \times \left(\frac{L_k}{D_k} \times \frac{u_v}{D_k} \right) + 0,039 \times \left(D_{rkum} \times \frac{u_v}{D_k} \right) + 1,257 \times (D_{rkum})^2 \\
& - 0,0004 \times \left(\frac{u_v}{D_k} \right)^2 + 0,331
\end{aligned} \tag{4.11}$$



Şekil 4.30. Tekil kazıklarda taşınan toplam kuvvetin değişkenlere bağlı olarak değişimi: a) L_k/D_k ve D_{rkum} , b) L_k/D_k ve u_v/D_k , c) D_{rkum} ve u_v/D_k

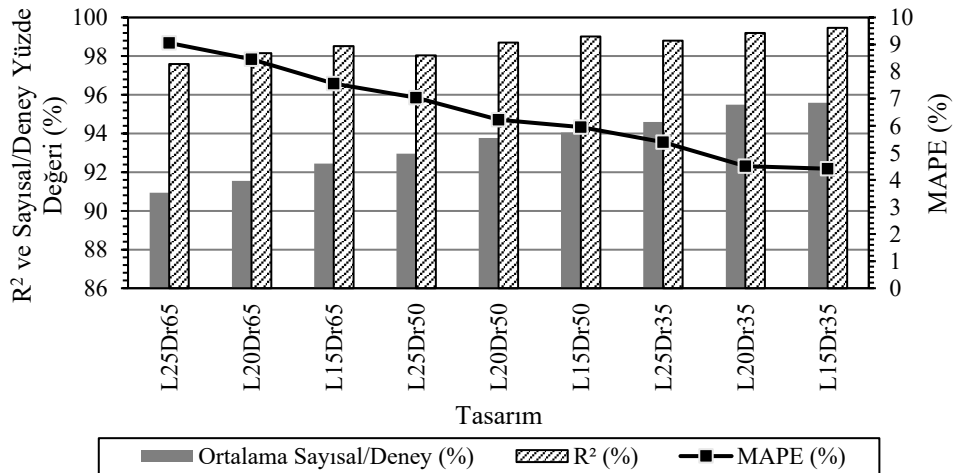


Şekil 4.31. Tekil kazıkların taşıdığı kuvvetler için model tahmini ve deney sonuçlarının ilişkisi

Sayısal analizlerden ve deneylerden elde edilen kuvvetlerin değerlendirilebilmesi için Çizelge 4.19 ve Şekil 4.32 oluşturulmuştur. Ortalama MAPE %6,51 ve sayısal/deney verilerinin ortalaması %93,49 olmuştur. Bu durum deney ve sayısal analiz sonuçlarının uyumlu ve sapmanın büyük olmadığına işaret edebilir. Sayısal/deney verisi oranlarının tüm tasarımlarda %89,32 ile %97,64 arasında olması ise deney sonuçlarının sayısal analiz sonuçlarına göre daha büyük olduğunu göstermiştir. Ortalama R^2 değerinin 0,986 olması, deney ve sayısal analiz verileri arasındaki ilişkinin tutarlı olduğunu ortaya koymuştur. En iyi uyum MAPE'si %4,41 ve R^2 'si 0,995 olan L15Dr35 tasarımında ve en kötü uyum ise MAPE'si %9,06 ve R^2 'si 0,976 olan L25Dr65 tasarımında olmuştur. Bu durum, D_{rkum} ve L_k/D_k artışıyla beraber deney ve sayısal analiz verileri arasında sapmanın da arttığını ortaya koymuştur.

Çizelge 4.19. Tekil kazıklarda deney ve sayısal analizler ile elde edilen taşınan kuvvetlerin karşılaştırılmasında kullanılan göstergeler

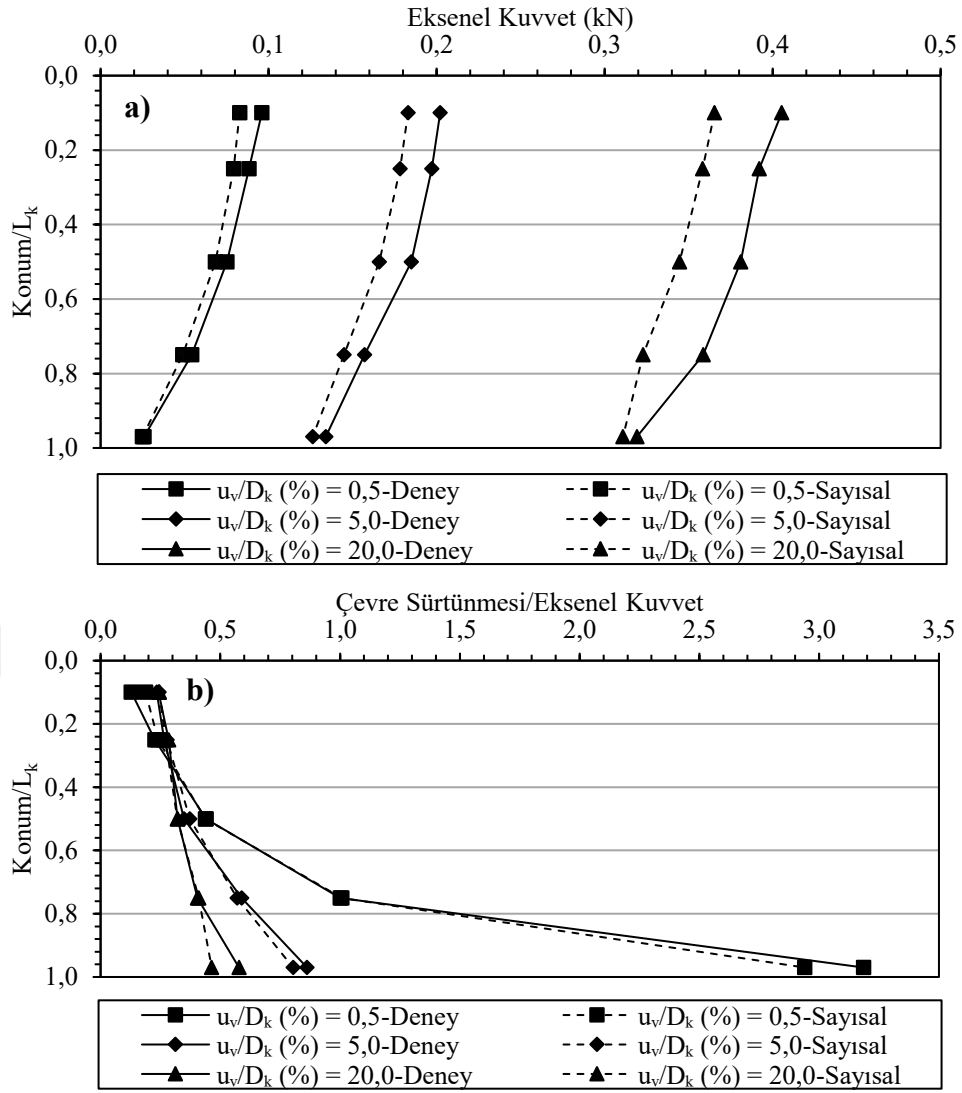
Tasarım	MAPE (%)	En Küçük Sayısal/Deney (%)	En Büyük Sayısal/Deney (%)	Ortalama Sayısal/Deney (%)	R^2
L25Dr65	9,06	89,32	92,59	90,94	0,976
L20Dr65	8,46	90,09	93,28	91,54	0,982
L15Dr65	7,56	90,65	93,95	92,44	0,985
L25Dr50	7,04	90,96	95,02	92,96	0,980
L20Dr50	6,23	92,05	96,04	93,77	0,987
L15Dr50	5,95	92,58	95,85	94,05	0,990
L25Dr35	5,40	93,39	95,71	94,60	0,988
L20Dr35	4,51	94,32	96,62	95,49	0,992
L15Dr35	4,41	93,98	97,64	95,59	0,995
Ortalama	6,51	91,93	95,19	93,49	0,986



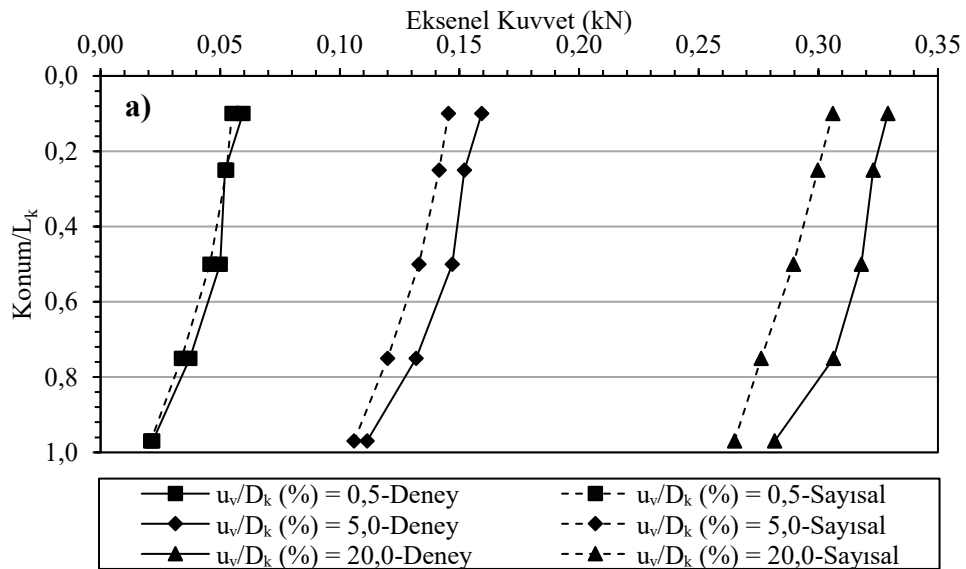
Şekil 4.32. Tekil kazıklarda taşınan kuvvetlerin sayısal analiz ve deney verilerinin kıyaslanmasında kullanılan göstergelerin tasarımlara göre değişimi

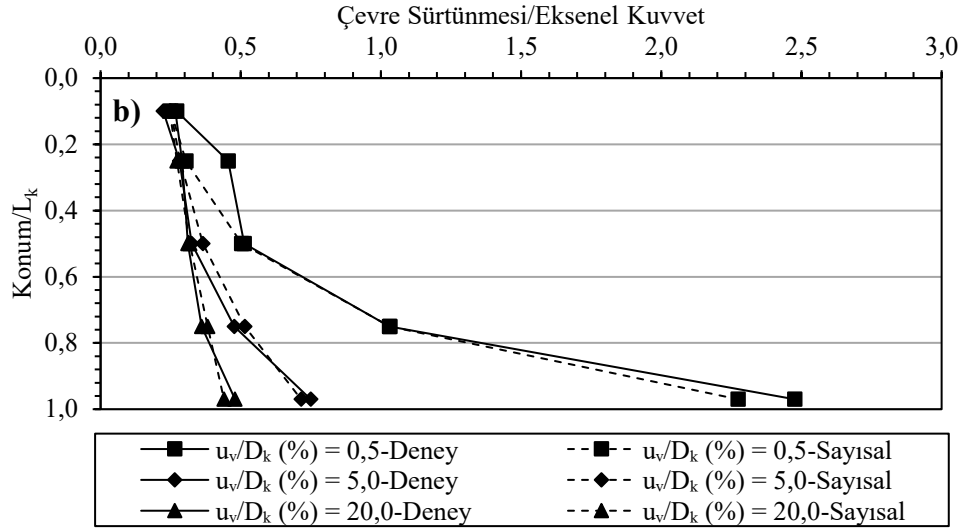
4.7.2. Kazıklarda eksenel kuvvet ve çevre sürtünmesi

Kazıklarda yapılan düşey yüklemde kazık uzunluğu boyunca yerleştirilmiş 5 gerinim ölçer pul kullanılarak kazık eksenel yükleri hesaplanmış ve kazık uzunluğu boyunca değişimi belirlenmiştir. Ayrıca, belirli oturma seviyelerindeki eklenik çevre sürtünmesi hesaplanmıştır. Kazıkların eksenel yüklerinin doğal olarak oturma miktarı arttıkça arttığı görülmüştür. Kazıklardaki eksenel kuvvetler ve çevre sürtünmelerinin eksenel yüklere oranla değişimi Şekil 4.33–4.41’de gösterilmiştir. Buna göre u_v/D_k oranının %0,5, %5 ve %20 olduğu oturma seviyelerinde en büyük çevre sürtünmesi/eksenel kuvvet oranı L25Dr35 tasarımında sırasıyla 4,126, 1,258 ve 0,807; en küçük çevre sürtünmesi/eksenel kuvvet oranı L15Dr65 tasarımında sırasıyla 1,692, 0,565 ve 0,477 olmuştur. Çevre sürtünmesinin eksenel kuvvetlere oranı Çizelge 4.20’de verilen sonuçlar tablosu için ANOVA yapılarak irdelenmiştir. Şekil 4.42 değişkenlerin çevre sürtünmesi/eksenel kuvvet oranına etkisinin incelenmesinde dikkate alınmıştır. Oluşturulan modelde çevre sürtünmesinin eksenel yüklere oranlarında logaritma dönüşümü uygulanmış, modelin R^2 , R_d^2 ve R_t^2 değerleri sırasıyla 0,984, 0,979 ve 0,972 olmuş, ayrıca düşük p değerleri ve yüksek F değerleri hem modelin anlamlı olduğunu hem de terimlerin bu oranın değişimini tutarlı bir şekilde yansıtabildiğini göstermiştir (Şekil 4.43). Model, ana etki terimleri dışında D_{kum} değişkeninin ikinci dereceden terimi hariç ikinci dereceden terimler ve $L_k/D_k \times u_v/D_k$ etkileşim terimi içermiştir (Eşitlik 4.12). Oturma seviyesinin artmasıyla kazıklarda çevre sürtünmesinin orantısal olarak azaldığı tespit edilmiştir. Bunun en büyük nedeni kazık çevre sürtünmesinin uç direncine göre çok düşük oturma seviyelerinde harekete geçmesidir. Oturmalar arttıkça çevre sürtünmesi artmaya devam etmesine rağmen uç direnci daha büyük bir oranla etkin olmaya başladığından yukarıda bahsedilen bu davranış meydana gelmiştir. Buna göre çevre sürtünmesinin eksenel kuvvetlere oranını azaltan esas etken oturmalar olurken, ikincil etken kazık uzunluğu olmuştur (Çizelge 4.21). L_k/D_k oranının artması, genel olarak çevre sürtünmesinin eksenel kuvvetlere oranını artırmıştır. Bu sonuç beklenen bir mekanik karşılığa sahiptir. L_k/D_k arttıkça çevre sürtünmesinin gelişebileceği gömülü yüzey alanı artmış, yük kazık boyunca daha uzun bir yol üzerinden zemine dağıtılabilmektedir. Oturmanın artışıyla bu etki azalmıştır. D_{rkum} çevre sürtünmesinin eksenel kuvvetlere oranını azaltmıştır. Ancak bu durum hem çevre sürtünmelerinin hem de eksenel kuvvetlerin D_{rkum} artışıyla beraber artmasıyla ilgilidir. Buna göre eksenel kuvvetler özellikle büyük oturma seviyelerinde daha fazla artmıştır.

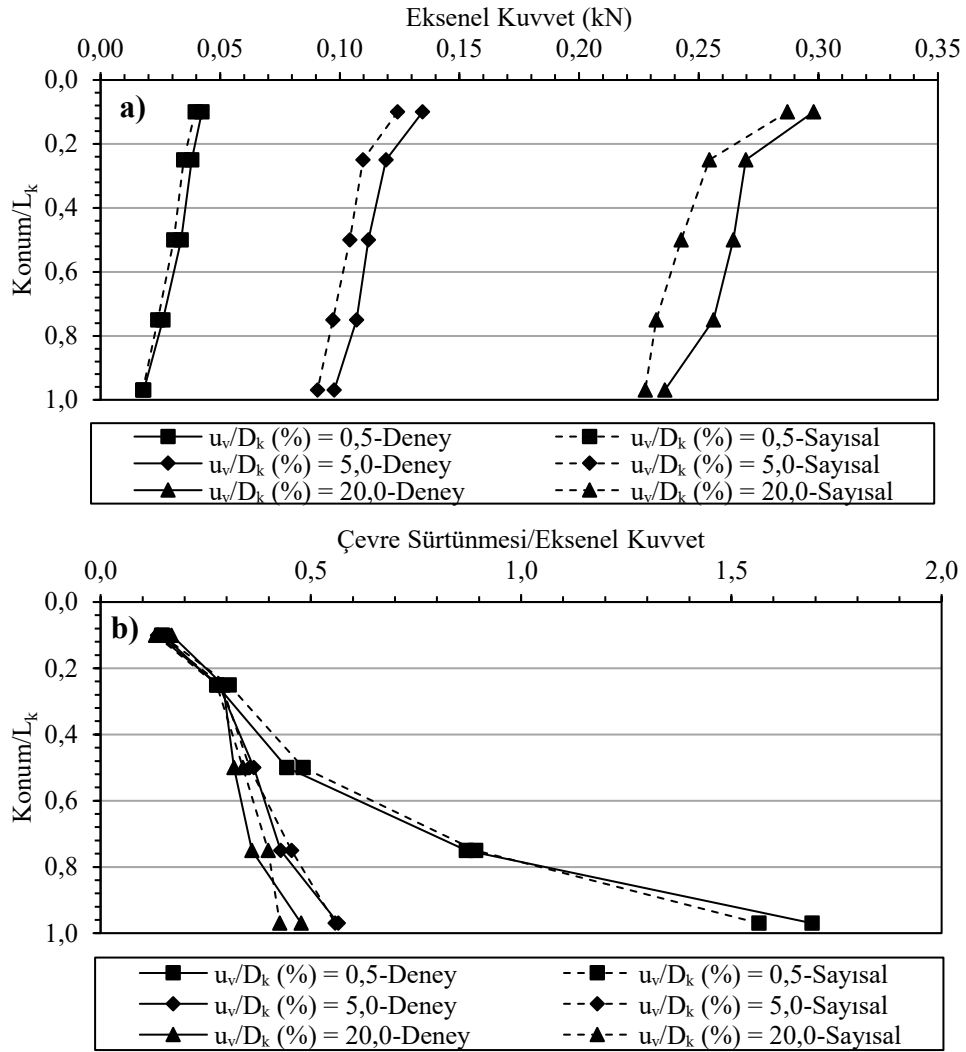


Şekil 4.33. L25Dr65 tasarımı için deney ve sayısal analizler ile elde edilen: a) Eksenel kuvvetin kazık boyunca değişimi, b) Çevre sürtünmesi/eksenel kuvvet oranının kazık boyunca değişimi

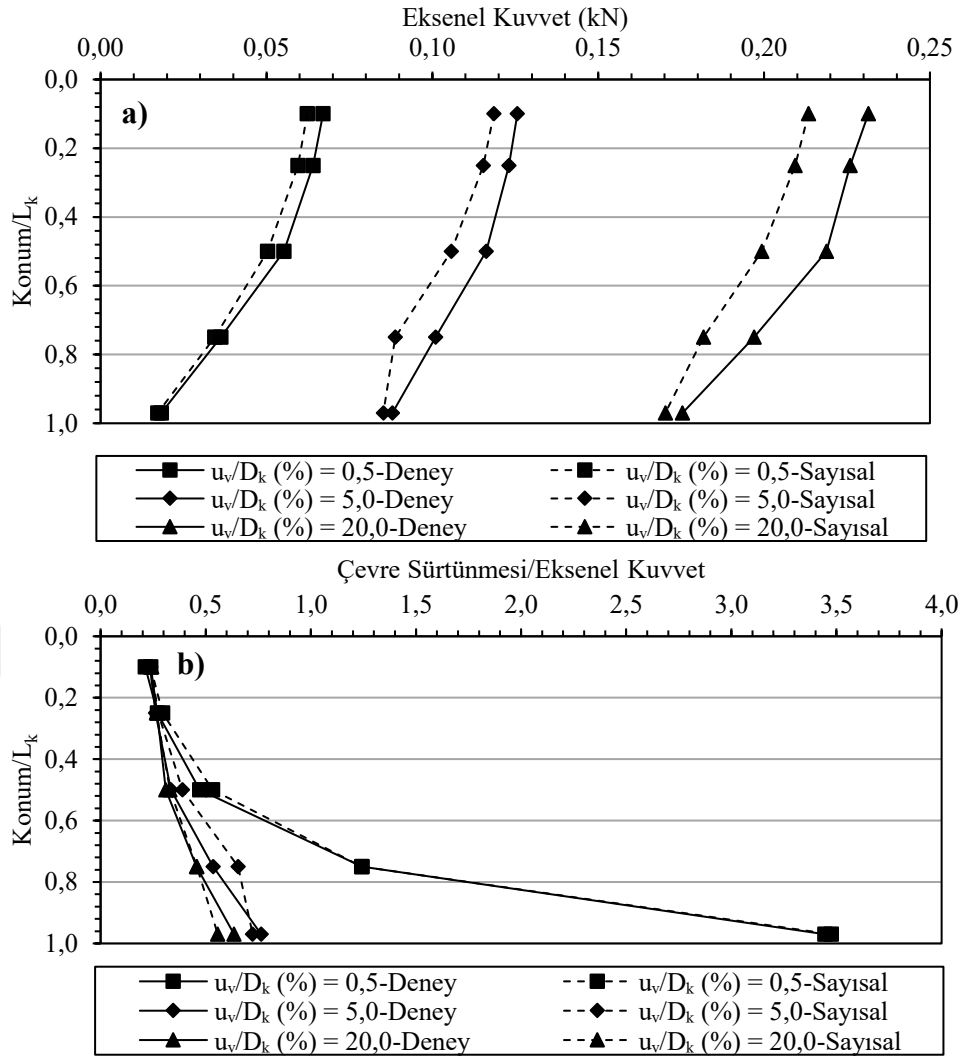




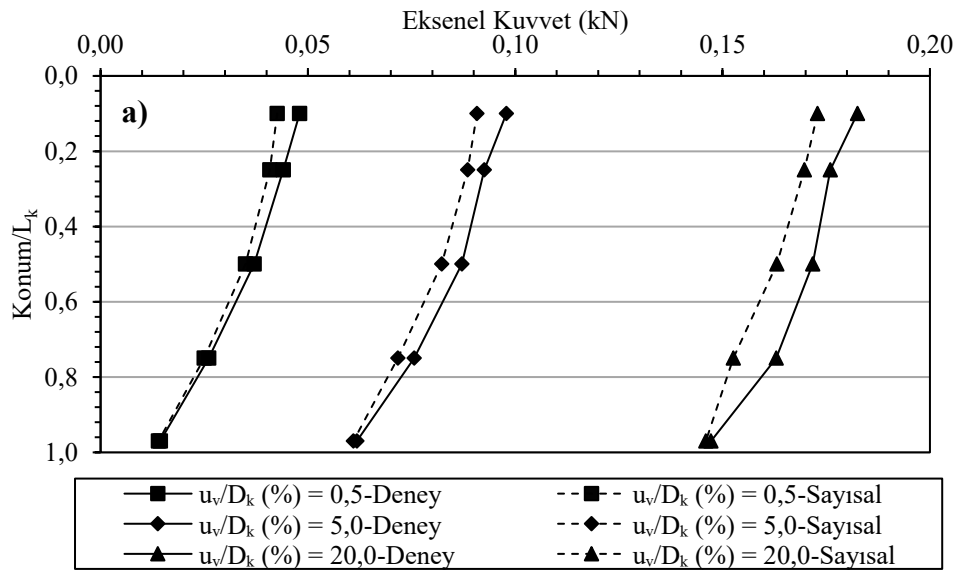
Şekil 4.34. L20Dr65 tasarımı için deney ve sayısal analizler ile elde edilen: a) Eksenel kuvvetin kazık boyunca değişimi, b) Çevre sürtünmesi/eksenel kuvvet oranının kazık boyunca değişimi

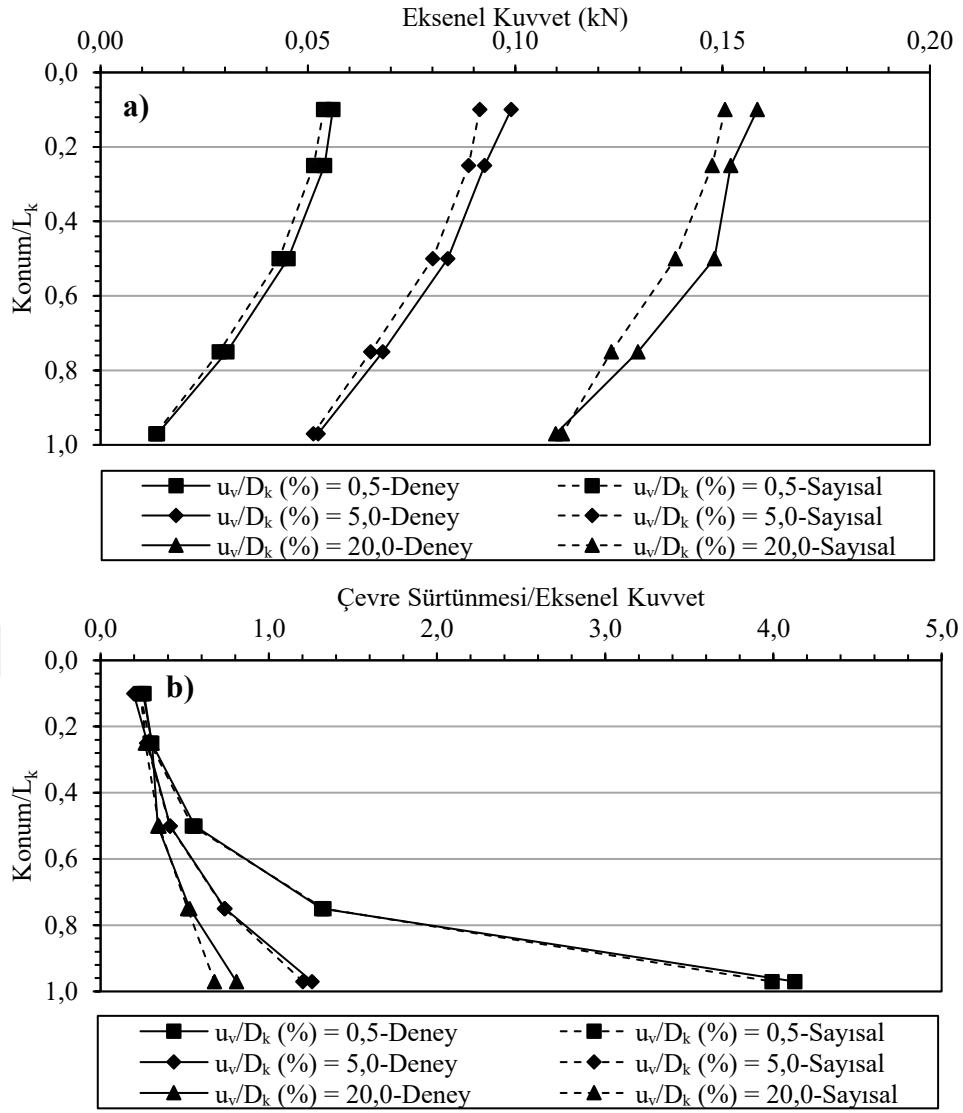


Şekil 4.35. L15Dr65 tasarımı için deney ve sayısal analizler ile elde edilen: a) Eksenel kuvvetin kazık boyunca değişimi, b) Çevre sürtünmesi/eksenel kuvvet oranının kazık boyunca değişimi

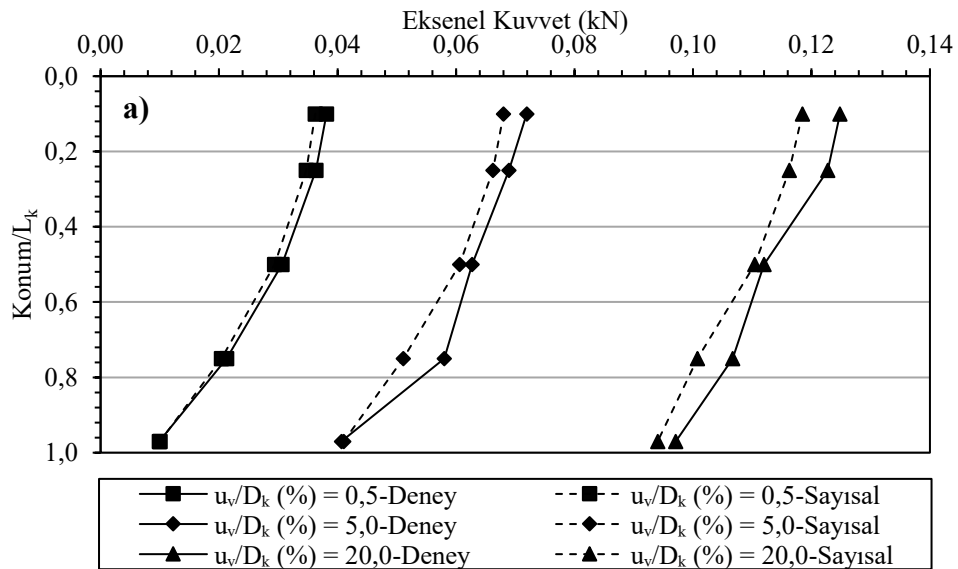


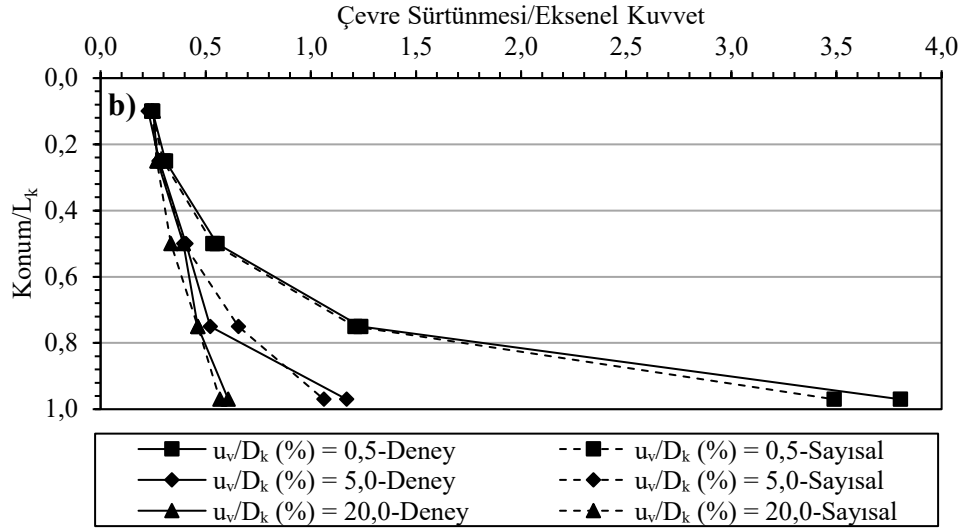
Şekil 4.36. L25Dr50 tasarımı için deney ve sayısal analizler ile elde edilen: a) Eksenel kuvvetin kazık boyunca değişimi, b) Çevre sürtünmesi/eksenel kuvvet oranının kazık boyunca değişimi



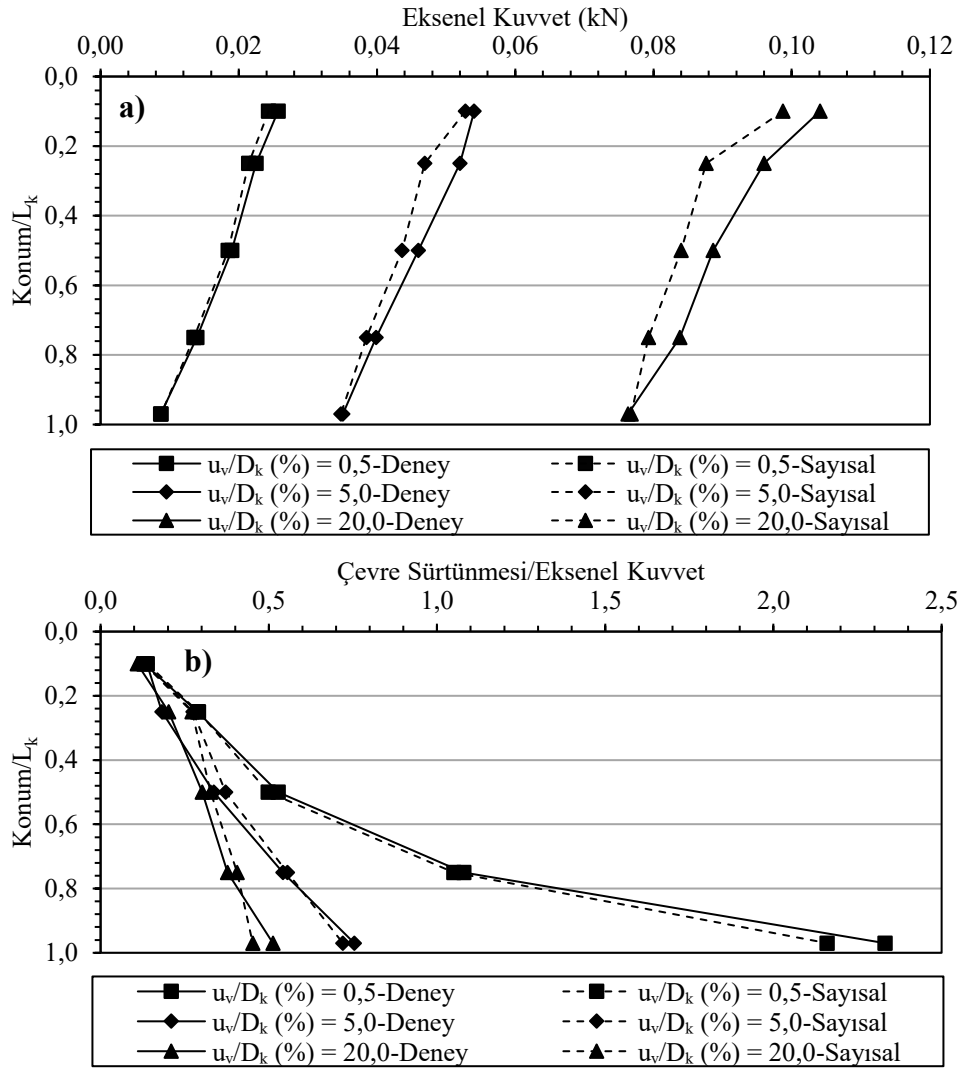


Şekil 4.39. L25Dr35 tasarımı için deney ve sayısal analizler ile elde edilen: a) Eksenel kuvvetin kazık boyunca değişimi, b) Çevre sürtünmesi/Eksenel kuvvet oranının kazık boyunca değişimi





Şekil 4.40. L20Dr35 tasarımı için deney ve sayısal analizler ile elde edilen: a) Eksenel kuvvetin kazık boyunca değişimi, b) Çevre sürtünmesi/eksenel kuvvet oranının kazık boyunca değişimi



Şekil 4.41. L15Dr35 tasarımı için deney ve sayısal analizler ile elde edilen: a) Eksenel kuvvetin kazık boyunca değişimi, b) Çevre sürtünmesi/eksenel kuvvet oranının kazık boyunca değişimi

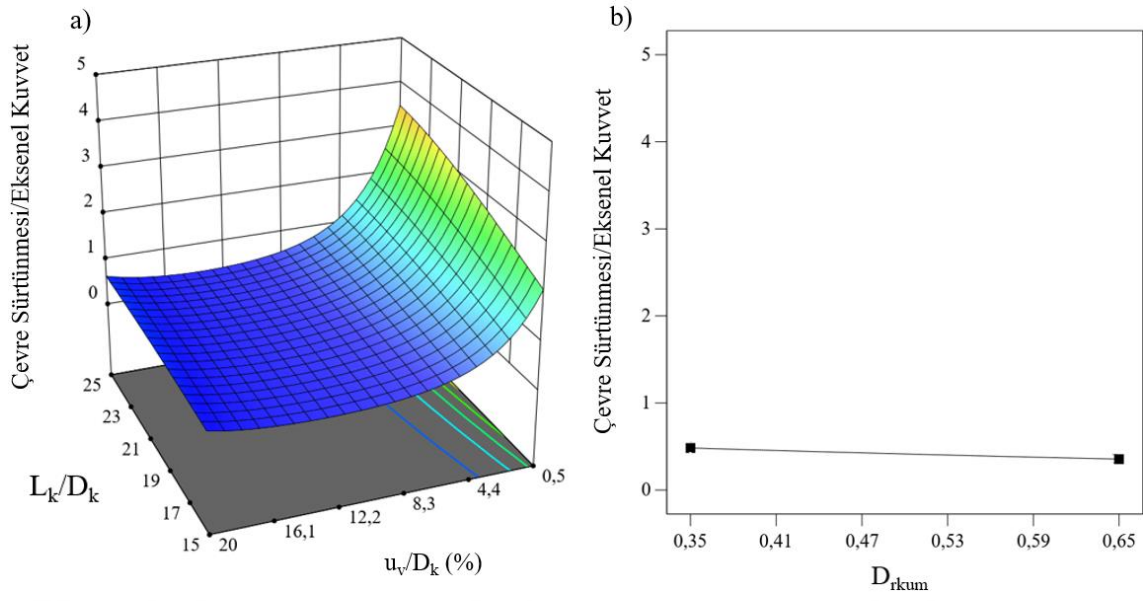
Çizelge 4.20. Tekil kazıklarda çevre sürtünmesi/eksenel kuvvet oranı değişiminin istatistiksel analizinde dikkate alınan değişkenler ve çevre sürtünmesi/eksenel kuvvet oranları

Tasarım	L_k/D_k	D_{rkum}	u_v/D_k (%)	Çevre Sürtünmesi/Eksenel Kuvvet
L25Dr65	25	0,65	0,50	3,185
L20Dr65	20	0,65	0,50	2,476
L15Dr65	15	0,65	0,50	1,692
L25Dr50	25	0,50	0,50	3,445
L20Dr50	20	0,50	0,50	2,972
L15Dr50	15	0,50	0,50	1,939
L25Dr35	25	0,35	0,50	4,126
L20Dr35	20	0,35	0,50	3,804
L15Dr35	15	0,35	0,50	2,332
L25Dr65	25	0,65	5,00	0,862
L20Dr65	20	0,65	5,00	0,749
L15Dr65	15	0,65	5,00	0,565
L25Dr50	25	0,50	5,00	0,764
L20Dr50	20	0,50	5,00	0,987
L15Dr50	15	0,50	5,00	0,657
L25Dr35	25	0,35	5,00	1,258
L20Dr35	20	0,35	5,00	1,170
L15Dr35	15	0,35	5,00	0,754
L25Dr65	25	0,65	20,00	0,578
L20Dr65	20	0,65	20,00	0,480
L15Dr65	15	0,65	20,00	0,477
L25Dr50	25	0,50	20,00	0,635
L20Dr50	20	0,50	20,00	0,545
L15Dr50	15	0,50	20,00	0,501
L25Dr35	25	0,35	20,00	0,807
L20Dr35	20	0,35	20,00	0,607
L15Dr35	15	0,35	20,00	0,512

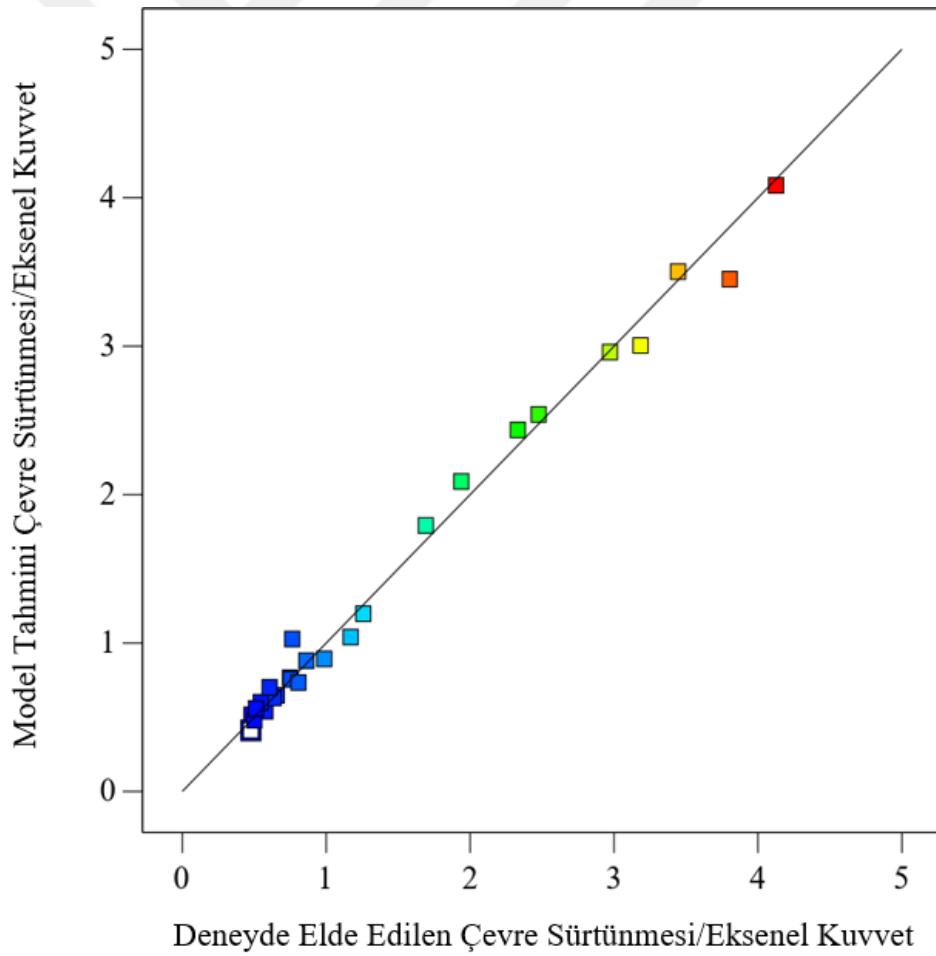
Çizelge 4.21. Tekil kazıklarda çevre sürtünmesi/eksenel kuvvet oranı davranışı için yapılan ANOVA sonuçları (çevre sürtünmesi/eksenel kuvvet oranı değerlerinde $\log_{10}$ dönüşümü uygulanmıştır)

Kaynak	Kareler Toplamı	Serbestlik Derecesi	Ortalama Kare	F-değeri	p-değeri	Model Formülü Katsayısı
Model	2,580	6	0,430	207,47	< 0,0001	-0,319 (Sabit)
L_k/D_k	0,126	1	0,126	60,95	< 0,0001	0,085
D_{rkum}	0,080	1	0,080	38,51	< 0,0001	-0,444
u_v/D_k	2,150	1	2,150	1038,31	< 0,0001	-0,134
$L_k/D_k \times u_v/D_k$	0,009	1	0,009	4,48	0,0469	-0,001
$(L_k/D_k)^2$	0,009	1	0,009	4,45	0,0478	-0,002
$(u_v/D_k)^2$	0,712	1	0,712	343,39	< 0,0001	0,005
Hata	0,042	20	0,002			

$$\begin{aligned}
 \log_{10}(\text{çevre sürtünmesi/eksenel kuvvet}) = & 0,085 \times \left(\frac{L_k}{D_k}\right) - 0,444 \times (D_{rkum}) - 0,134 \times \left(\frac{u_v}{D_k}\right) \\
 & - 0,001 \times \left(\frac{L_k}{D_k} \times \frac{u_v}{D_k}\right) - 0,002 \times \left(\frac{L_k}{D_k}\right)^2 + 0,005 \times \left(\frac{u_v}{D_k}\right)^2 - 0,319
 \end{aligned} \quad (4.12)$$



Şekil 4.42. Tekil kazıklarda çevre sürtünmesi/eksenel kuvvet oranının değişkenlere bağlı olarak değişimi:
a) L_k/D_k ve u_v/D_k , c) D_{rkum}

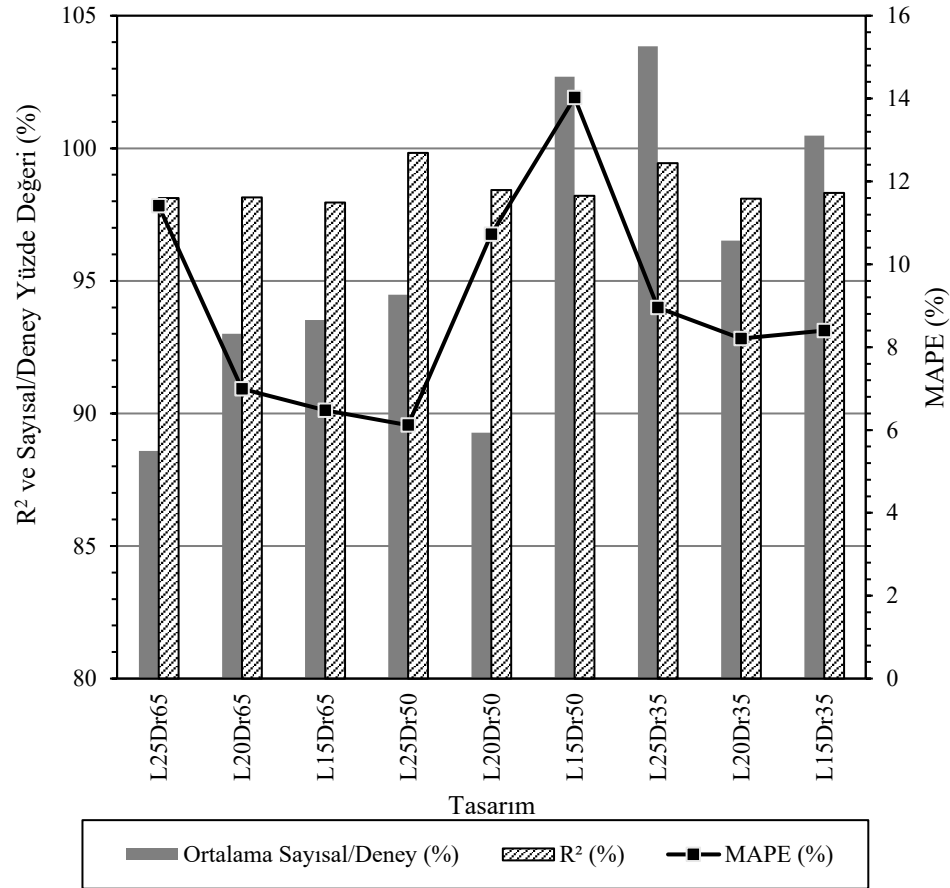


Şekil 4.43. Tekil kazıkların çevre sürtünmesi/eksenel kuvvet oranı için model tahmini ve deney sonuçlarının ilişkisi

Sayısal analizlerden ve deneylerden elde edilen çevre sürtünmesi/eksenel kuvvet oranları arasındaki ilişki Çizelge 4.22 ve Şekil 4.44 ile değerlendirilmiştir. Ortalama MAPE %9,03 ve sayısal/deney verilerinin ortalaması %95,82 olmuştur. MAPE'nin görece olarak yüksek olması sayısal analiz ve deney sonuçları arasındaki farkın kısmen fazla olabileceğini göstermiştir. Sayısal/deney verisi oranlarının %80,25 olup %125,09'a kadar çıkabilmesi deney ve sayısal analiz verilerinin hangisinin büyük olduğu ile ilgili kesin bir fikir verememiştir; fakat ortalama üzerinden değerlendirme yapılırsa genel olarak sayısal analiz sonuçlarının deney sonuçlarına göre daha düşük olduğu söylenebilir. Ortalama R^2 değerinin 0,985 olması, deney ve sayısal analiz verileri arasındaki ilişkinin tutarlı olduğunu ortaya koymasına rağmen MAPE'nin %9,03 olması nedeniyle dikkatli olunması gerekir. L_k/D_k değişiminin sapma üzerindeki etkisi ikincil seviyede olmuştur. D_{rkum} arttıkça ortalama çevre sürtünmesi/eksenel kuvvet oranı azalmıştır. Sayısal model bu eğilimi korumuş, ancak büyüklük olarak çoğu durumda deneysel sonucun altında kalmıştır. En baskın hata kaynağı u_v/D_k olmuştur. Çevre sürtünmesi/eksenel kuvvet oranı oturumların artmasıyla azalmakta, dolayısıyla mekanizma çevre sürtünmesinin baskın olduğu durumdan eksenel kuvvetin daha belirgin hale geldiği duruma doğru dönüşmektedir. Sayısal analizlerde bu azalma yönü doğru yakalanmış, ancak azalışın büyüklüğü deney sonuçlarına göre daha fazla tahmin edilmiştir. Bu durum özellikle büyük plastik şekil değiştirme seviyelerinde arayüz parametreleri, yük transfer eğrilerinin eğimi ve kazık çevresindeki gerilme dağılımının modele aktarılma derecesiyle ilişkili olabilir.

Çizelge 4.22. Tekil kazıklarda deney ve sayısal analizler ile elde edilen çevre sürtünmesi/eksenel kuvvet oranlarının karşılaştırılmasında kullanılan göstergeler

Tasarım	MAPE (%)	En Küçük Sayısal/Deney (%)	En Büyük Sayısal/Deney (%)	Ortalama Sayısal/Deney (%)	R^2
L25Dr65	11,41	80,28	93,22	88,59	0,981
L20Dr65	7,00	91,74	95,43	93,00	0,981
L15Dr65	6,47	89,36	98,72	93,53	0,980
L25Dr50	6,12	87,80	100,89	94,47	0,998
L20Dr50	10,73	86,62	94,17	89,27	0,984
L15Dr50	14,02	87,47	125,09	102,70	0,980
L25Dr35	8,96	95,61	119,20	103,84	0,994
L20Dr35	8,21	90,75	107,08	96,51	0,981
L15Dr35	8,40	92,63	113,31	100,47	0,983
Ortalama	9,03	89,14	105,23	95,82	0,985

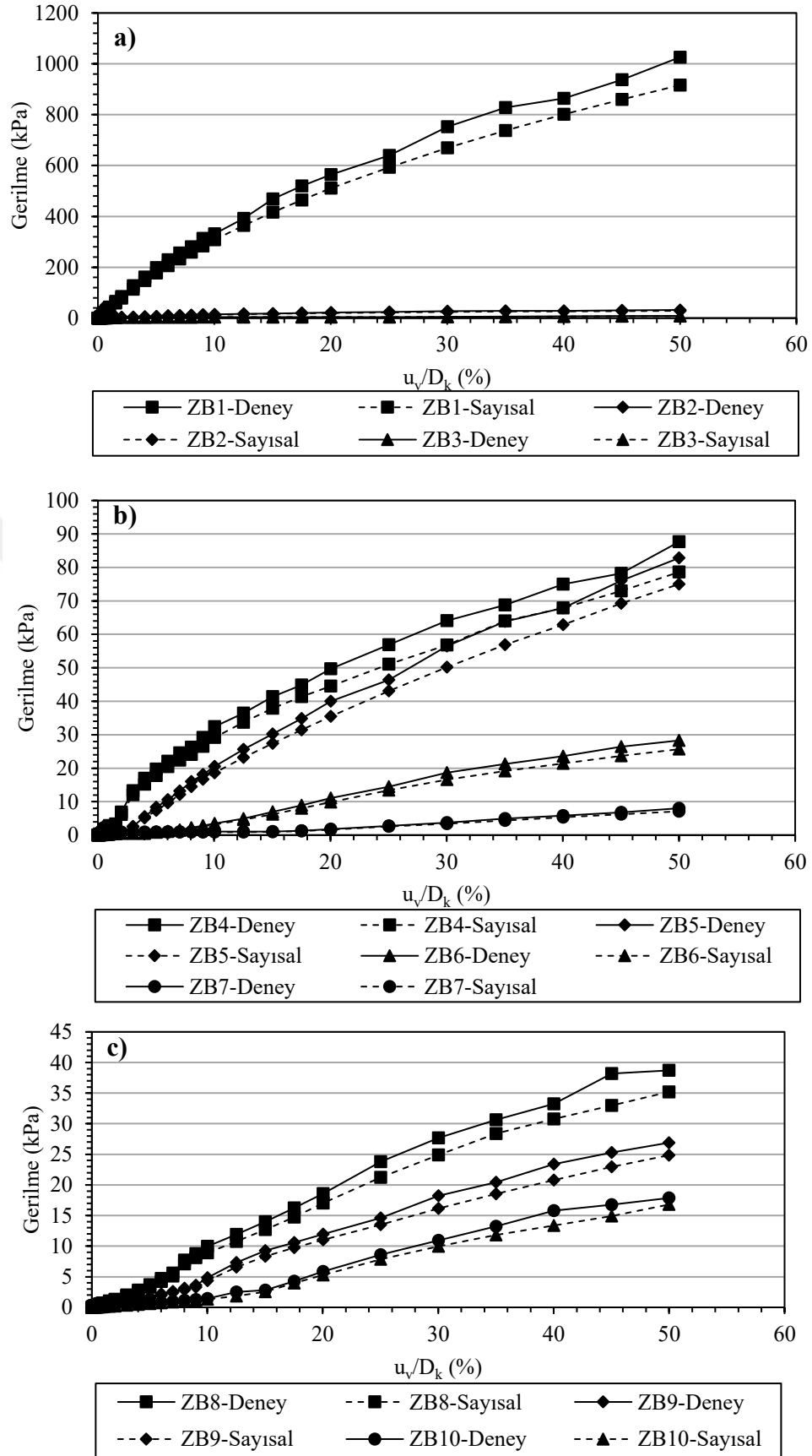


Şekil 4.44. Tekil kazıklarda çevre sürtünmesi/eksenel kuvvet oranlarının sayısal analiz ve deney verilerinin kıyaslanmasında kullanılan göstergelerin tasarımlara göre değişimi

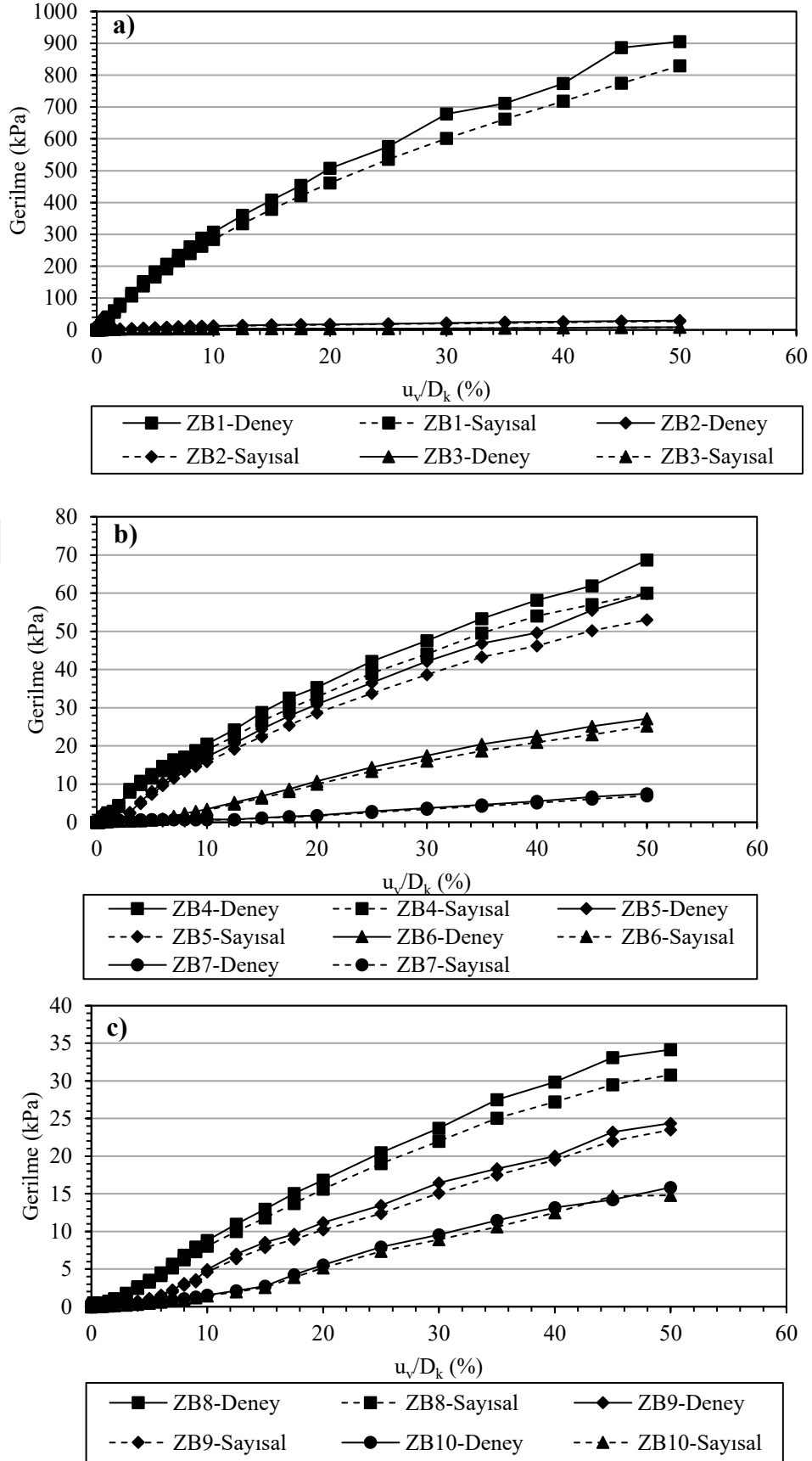
4.7.3. Zeminde meydana gelen gerilmeler

Tekil kazıklarda kazık alt ucundan itibaren belirli derinlik ve yatay mesafelerde yerleştirilmiş zemin basınç ölçerler ile zeminde meydana gelen gerilmeler belirlenmiştir (Şekil 4.45–4.53). Genel olarak kazık ucundan yatay mesafede uzaklaştıkça gerilmelerin çok hızlı bir şekilde azaldığı, oturma seviyesi arttıkça gerilmelerin arttığı gözlenmiştir. Oturmaların artan seviyelerinde ZB’lerdeki gerilmelerin değişimini ayrıntılı bir şekilde inceleyebilmek için kazığın hemen altındaki ZB1, ZB4 ve ZB8 sensörlerinin kaydettiği gerilme değerleri ile Çizelge 4.23’teki tablo kullanılarak ANOVA (Çizelge 4.24, Çizelge 4.25 ve Çizelge 4.26) bu üç sensör için gerçekleştirilmiştir. Şekil 4.54 değişkenlerin ZB1, ZB4 ve ZB8 gerilmelerine etkisinin incelenmesinde dikkate alınmıştır ZB1 gerilmeleri için model R^2 , R^2_d ve R^2_t değerleri sırasıyla 0,988, 0,984 ve 0,972 olarak; ZB4 gerilmeleri için R^2 , R^2_d ve R^2_t değerleri sırasıyla 0,948, 0,936 ve 0,904 olarak; ZB8 gerilmeleri için 0,985, 0,981 ve 0,972 olarak elde edilmiştir. Bu yüksek R^2 değerleri ile yüksek F ve düşük

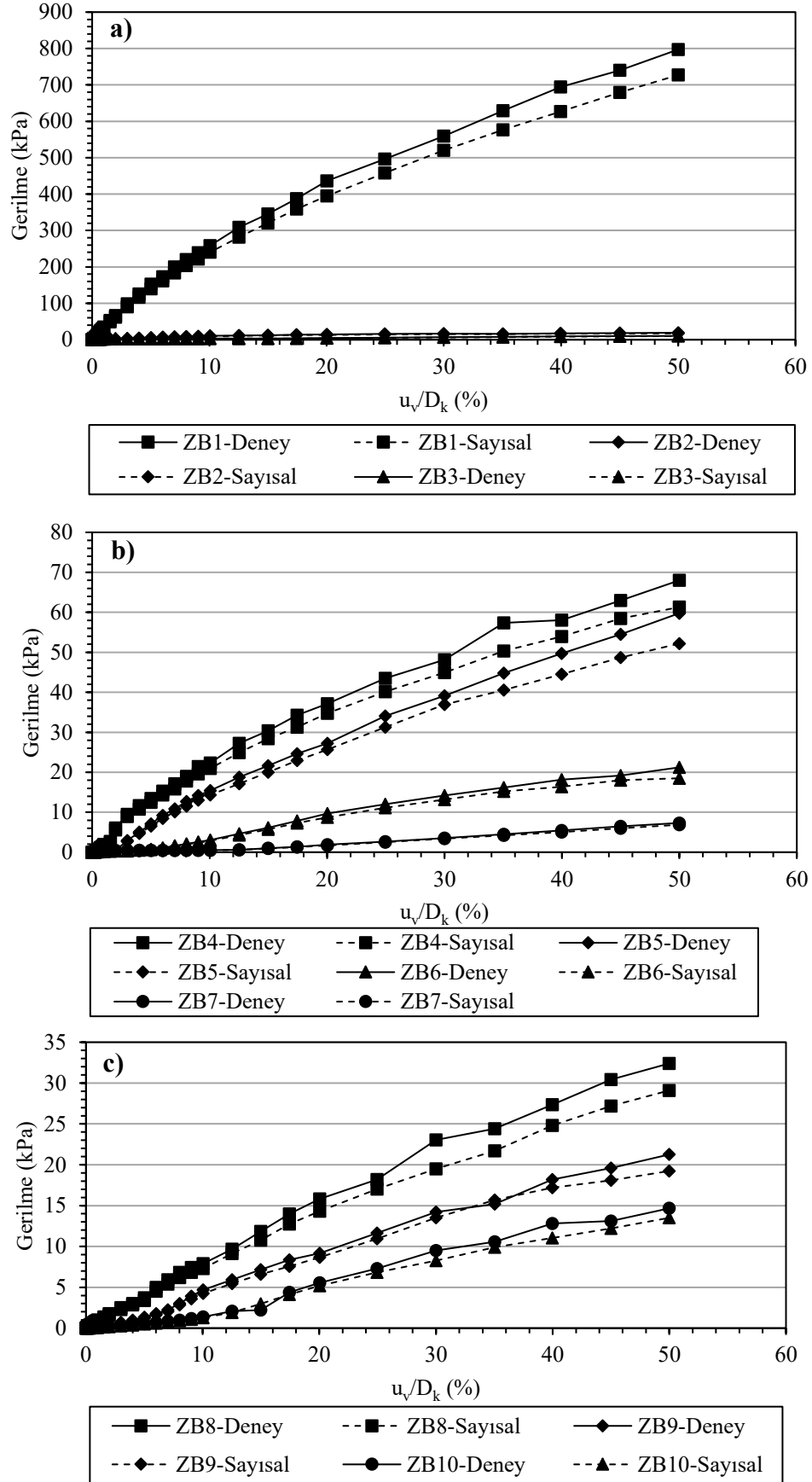
p değerleri modellerin istatistiksel olarak anlamlı ve tutarlılığın yüksek olduğunu göstermiştir (Şekil 4.55) Modellerde bazı ikinci dereceden ve etkileşim terimleri de etkili olmuştur, bu terimler modele dahil edilmiştir (Eşitlik 4.13 Eşitlik 4.14 ve Eşitlik 4.15). u_v/D_k oranının gerilmelerin değişimine etkisinin çok baskın olduğu gözlenmiştir. Deneylerin ortalama değerleri dikkate alındığında, u_v/D_k oranının %0,5'ten %20'ye yükselmesiyle ZB1, ZB4 ve ZB8 ölçümleri sırasıyla yaklaşık 29,8 kat, 35,4 kat ve 47,0 kat artmıştır. Bu sonuç, kazık ucunda oturmanın artmasıyla birlikte zeminde harekete geçen uç etkisinin yalnızca kazık ucuna yakın bölgede büyümediğini, daha derin katmanlara iletilen gerilme bileşeninin de hızla güçlendiğini göstermiştir. Bununla birlikte, mutlak büyüklük açısından gerilmeler $ZB1 > ZB4 > ZB8$ şeklinde sıralanmış ve genelde $ZB4/ZB1$ gerilme oranı ile $ZB8/ZB1$ oranı sırasıyla yaklaşık %7,8 ve %2,7 seviyesinde kalmıştır. Buna göre kazık ucu altında oluşan gerilme alanı derinlikle çok hızlı sönümlenmiş, ancak oturma seviyeleri arttıkça gerilmenin daha derin bölgelere görel olarak daha fazla aktarılabildiği belirlenmiştir. D_{rkum} , u_v/D_k 'den sonra ikinci baskın değişken olarak belirlenmiştir. Ortalama gerilmeler, D_{rkum} değerinin 0,35'ten 0,65'e artışıyla ZB1, ZB4 ve ZB8 için sırasıyla yaklaşık %210, %258,0 ve %436 arttığını ortaya koymuştur. Özellikle ZB8'deki yüksek artış, sıkı kumun yalnızca kazık ucu yakınında daha yüksek gerilme meydana gelmesine katkıda bulunmadığını; aynı zamanda yükün daha derin bölgelere yayılabilme verimini de artırdığını göstermiştir. Bu eğilim, sıkı kumların daha yüksek rijitliğe ve kayma direncine sahip olmasıyla açıklanabilir. L_k/D_k oranının artışı zemindeki gerilmeleri artırırken, etki olarak oldukça zayıf kalmıştır. L_k/D_k 'nin 15'ten 25'e artışı, ortalama ZB1 ve ZB4 gerilme değerlerinde yaklaşık %30'luk artışlara, ZB8'de ise yaklaşık %13,7'lik bir gerilme artışına neden olmuştur. ZB konumu daha derinde oldukça L_k/D_k 'nin etkisinin daha da azalmış olduğu belirlenmiştir. Genel olarak, daha uzun kazıklar daha büyük sürtünme alanı ve daha gelişmiş yük transfer yolu sayesinde uç bölgesinde ve orta derinlikte daha fazla gerilmeyi harekete geçirebilmiş; ancak bu etki u_v/D_k ve D_{rkum} kadar baskın olamamıştır.



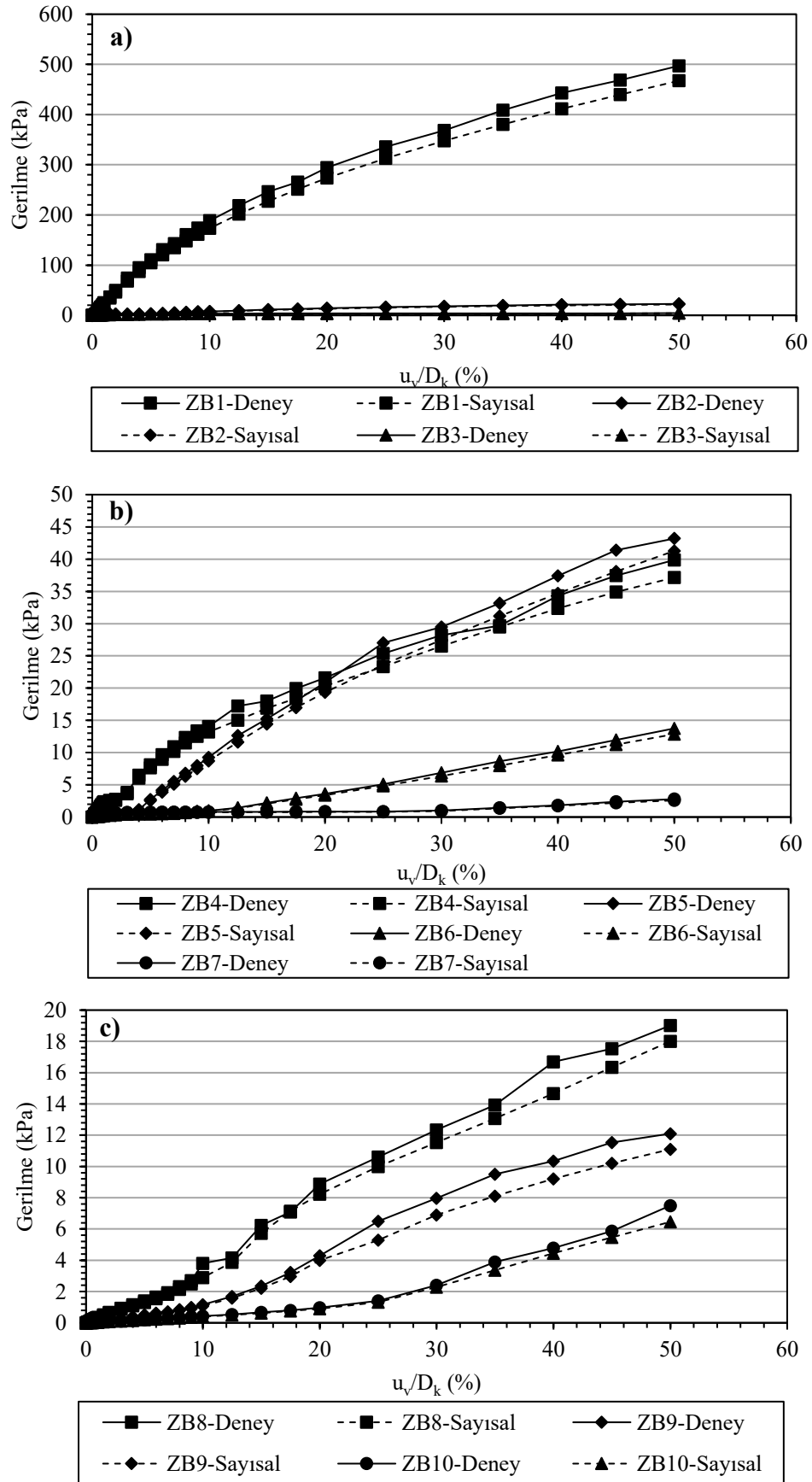
Şekil 4.45. L25Dr65 tasarımı için ZB noktalarında deney ve sayısal analizler ile elde edilen zeminde meydana gelen gerilmeler: a) ZB1-3 arası, b) ZB4-7 arası, c) ZB8-10 arası



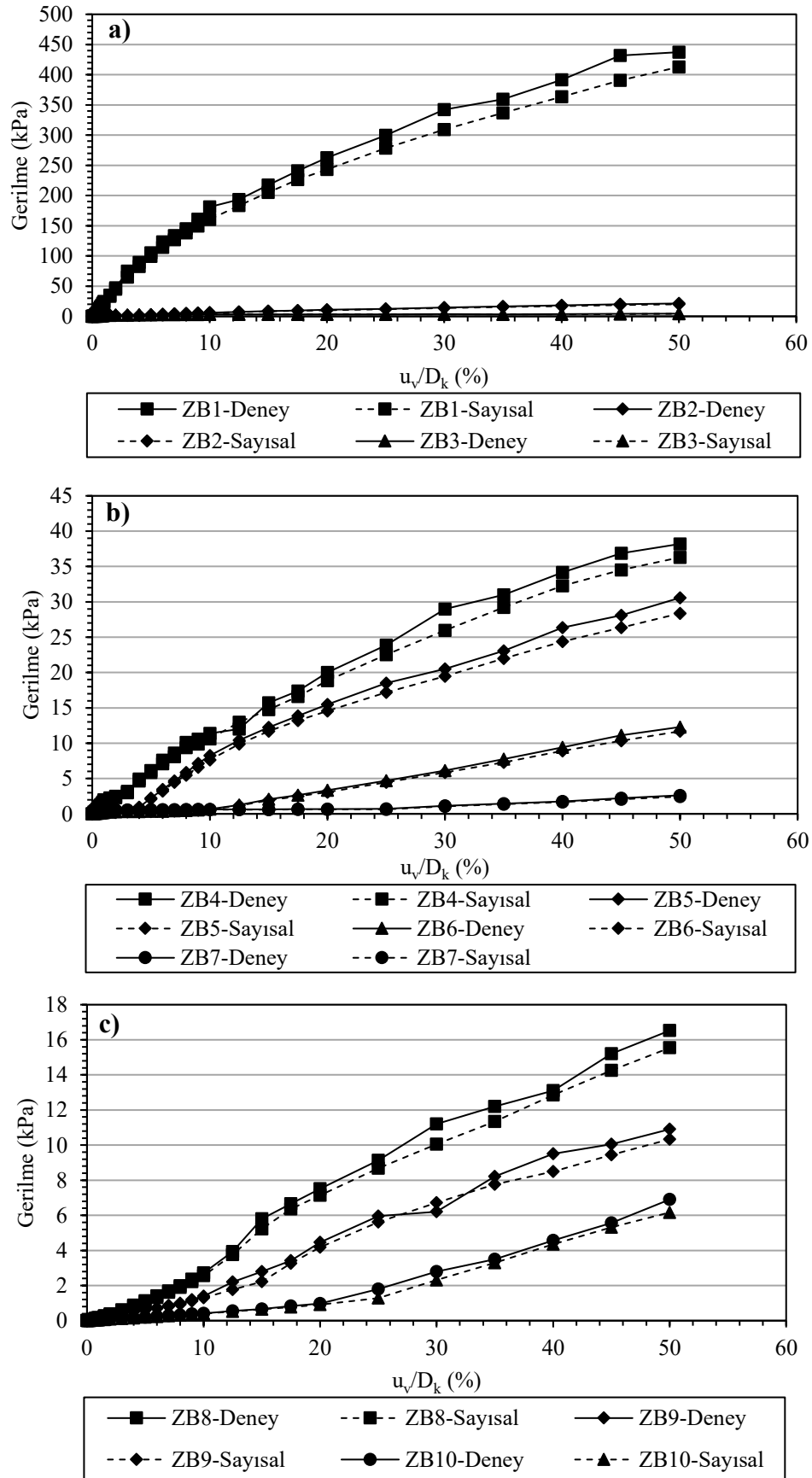
Şekil 4.46. L20Dr65 tasarımı için ZB noktalarında deney ve sayısal analizler ile elde edilen zeminde meydana gelen gerilmeler: a) ZB1-3 arası, b) ZB4-7 arası, c) ZB8-10 arası



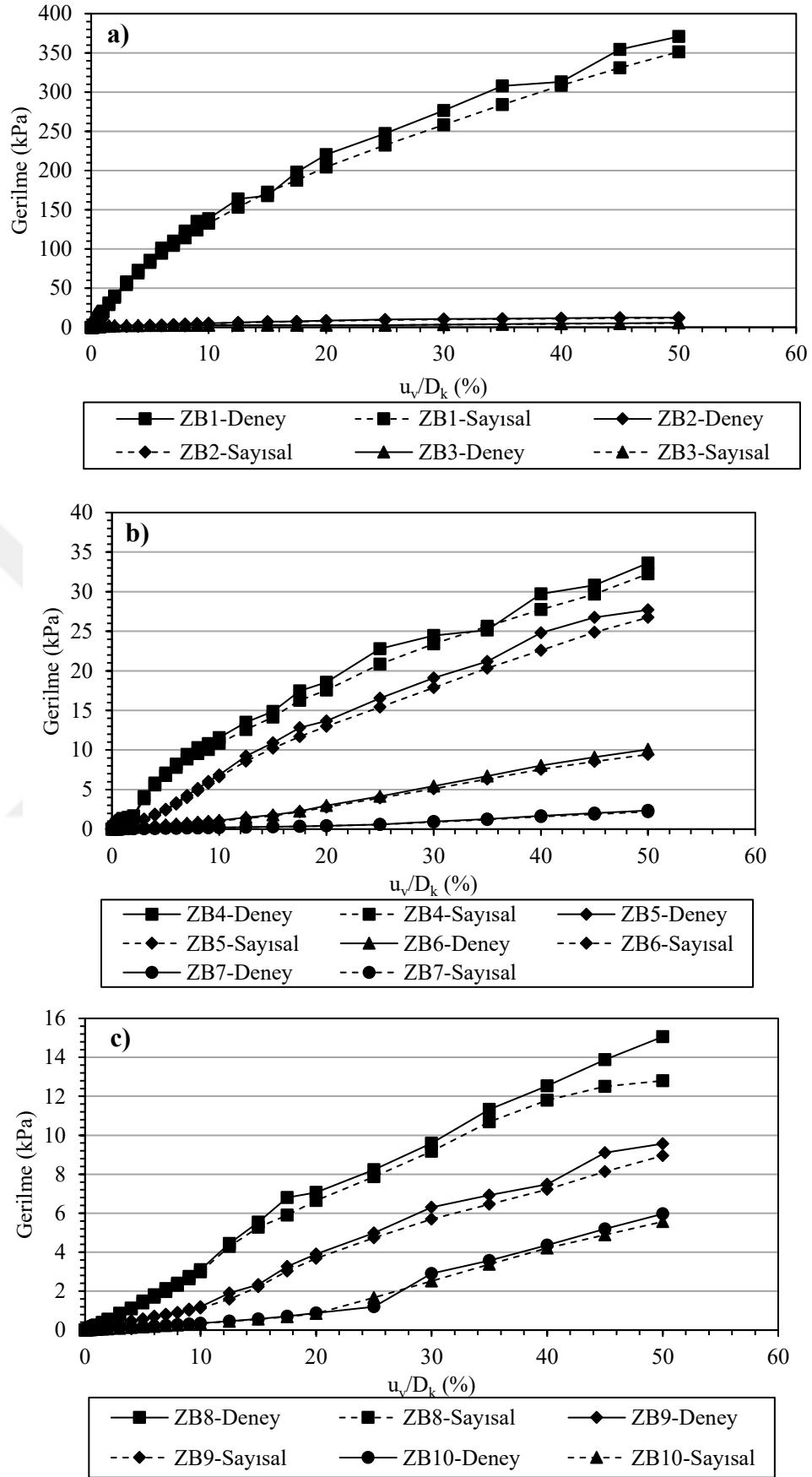
Şekil 4.47. L15Dr65 tasarımı için ZB noktalarında deney ve sayısal analizler ile elde edilen zeminde meydana gelen gerilmeler: a) ZB1-3 arası, b) ZB4-7 arası, c) ZB8-10 arası



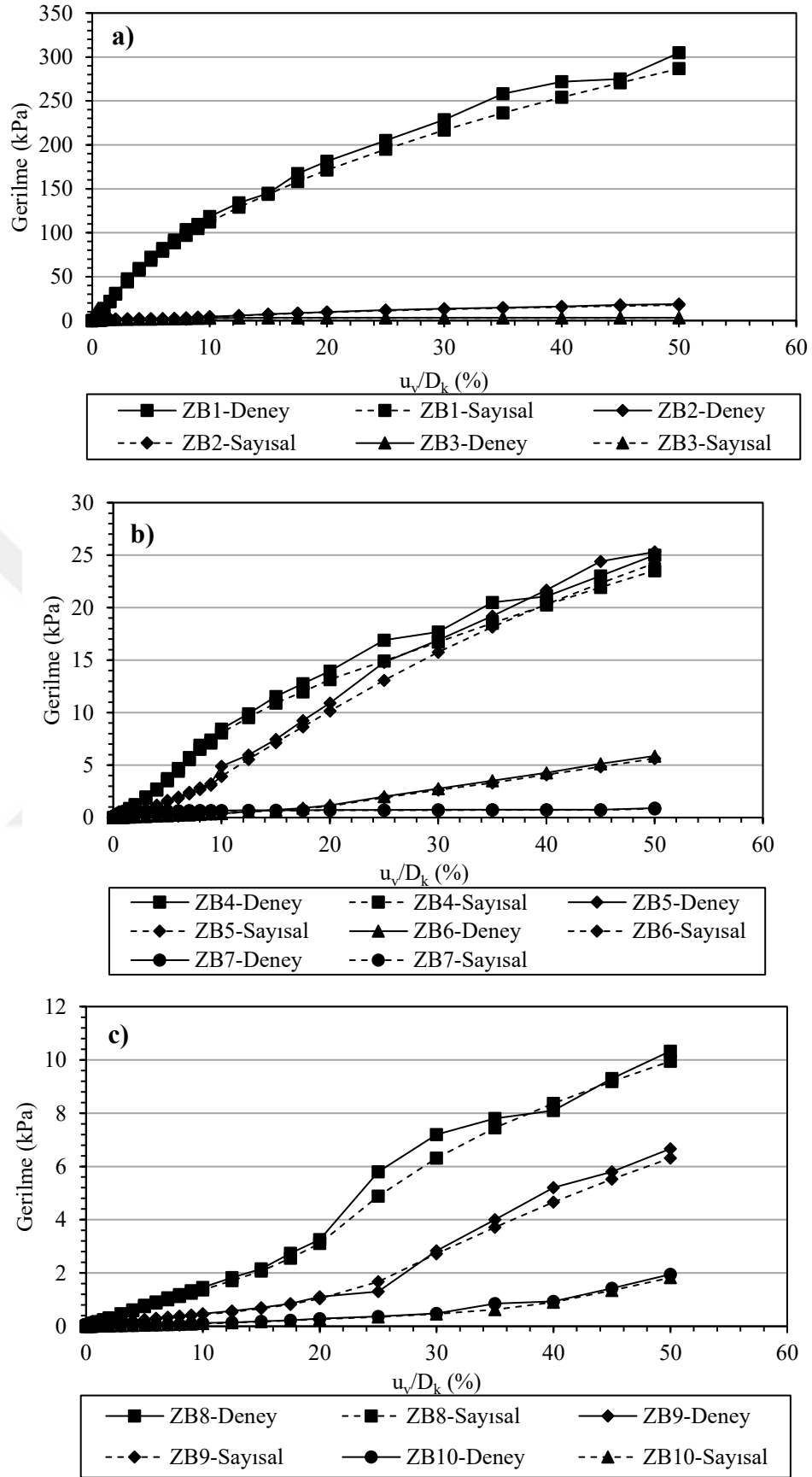
Şekil 4.48. L25Dr50 tasarımı için ZB noktalarında deney ve sayısal analizler ile elde edilen zeminde meydana gelen gerilmeler: a) ZB1-3 arası, b) ZB4-7 arası, c) ZB8-10 arası



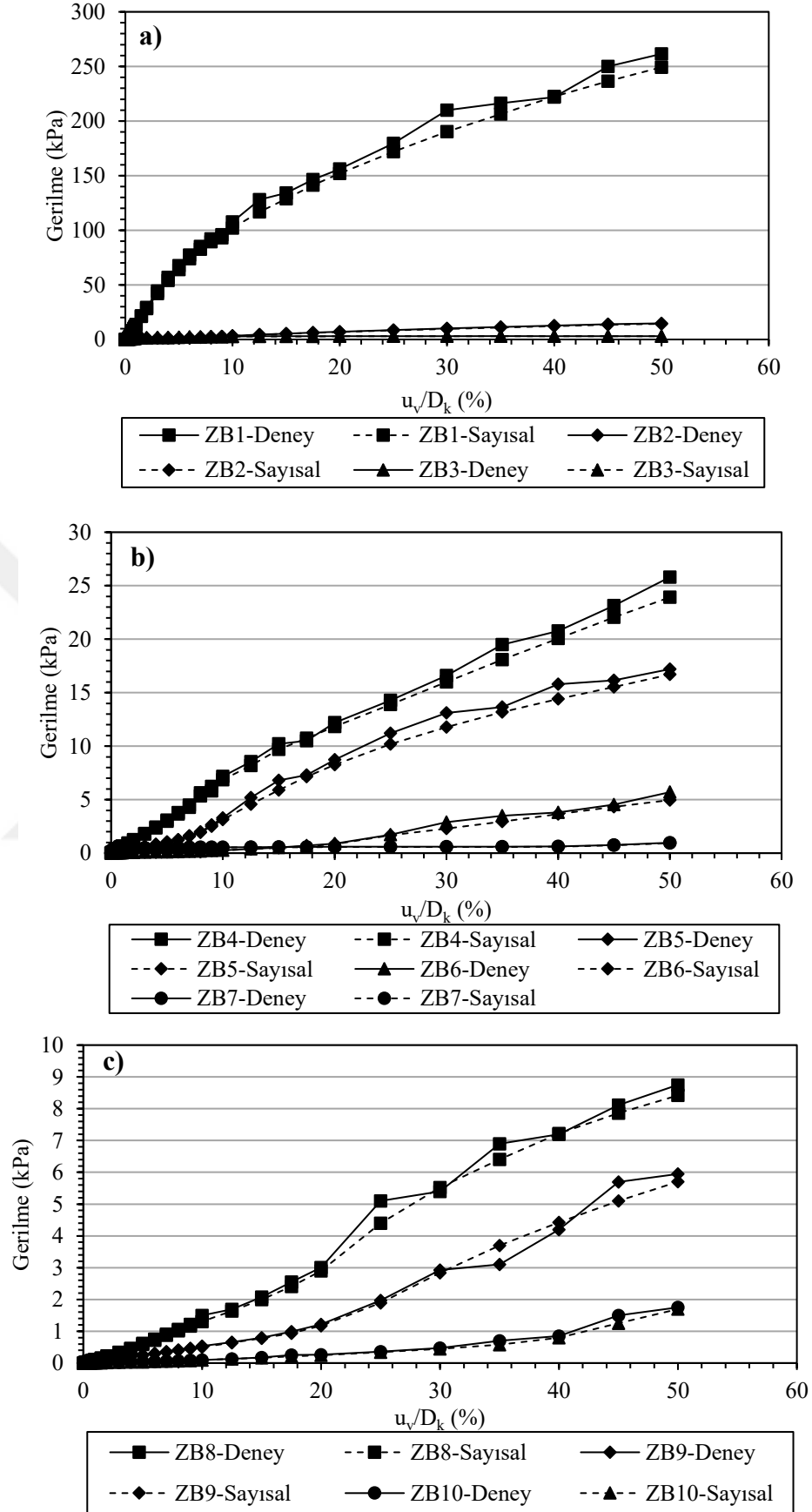
Şekil 4.49. L20Dr50 tasarımı için ZB noktalarında deney ve sayısal analizler ile elde edilen zeminde meydana gelen gerilmeler: a) ZB1-3 arası, b) ZB4-7 arası, c) ZB8-10 arası



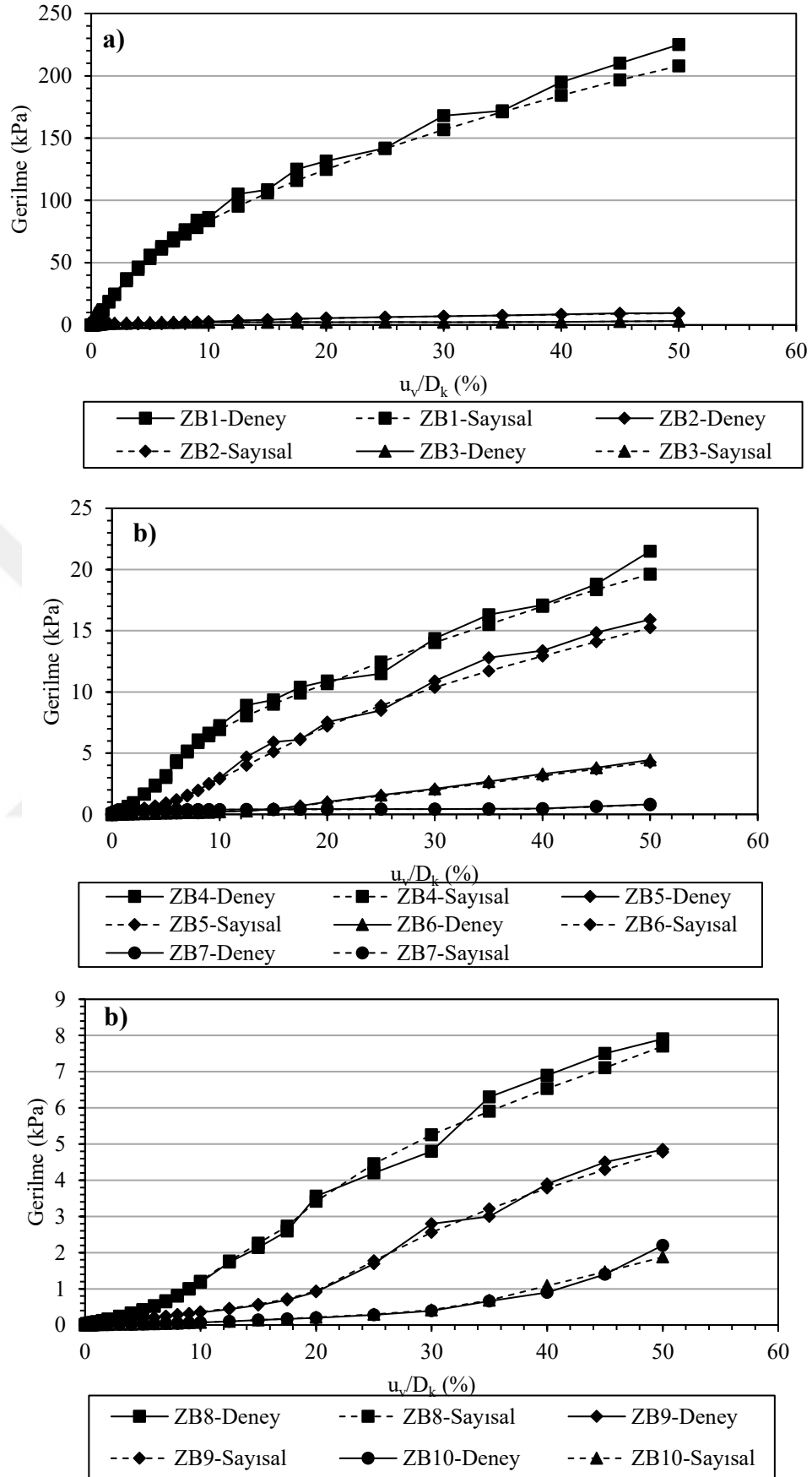
Şekil 4.50. L15Dr50 tasarımı için ZB noktalarında deney ve sayısal analizler ile elde edilen zeminde meydana gelen gerilmeler: a) ZB1-3 arası, b) ZB4-7 arası, c) ZB8-10 arası



Şekil 4.51. L25Dr35 tasarımı için ZB noktalarında deney ve sayısal analizler ile elde edilen zeminde meydana gelen gerilmeler: a) ZB1-3 arası, b) ZB4-7 arası, c) ZB8-10 arası



Şekil 4.52. L20Dr35 tasarımı için ZB noktalarında deney ve sayısal analizler ile elde edilen zeminde meydana gelen gerilmeler: a) ZB1-3 arası, b) ZB4-7 arası, c) ZB8-10 arası



Şekil 4.53. L15Dr35 tasarımı için ZB noktalarında deney ve sayısal analizler ile elde edilen zeminde meydana gelen gerilmeler: a) ZB1-3 arası, b) ZB4-7 arası, c) ZB8-10 arası

Çizelge 4.23. Tekil kazıklarda zeminde meydana gelen gerilmelerin istatistiksel analizinde dikkate alınan değişkenler ve ZB1, ZB4, ZB8 gerilme değerleri

Tasarım	L_k/D_k	D_{rkum}	u_v/D_k (%)	ZB1 (kPa)	ZB4 (kPa)	ZB8 (kPa)
L25Dr65	25	0,65	0,5	18,804	1,327	0,461
L20Dr65	20	0,65	0,5	18,255	0,950	0,246
L15Dr65	15	0,65	0,5	16,561	0,450	0,558
L25Dr50	25	0,50	0,5	8,773	1,079	0,162
L20Dr50	20	0,50	0,5	9,284	0,881	0,042
L15Dr50	15	0,50	0,5	8,852	0,729	0,126
L25Dr35	25	0,35	0,5	3,767	0,227	0,094
L20Dr35	20	0,35	0,5	4,107	0,376	0,054
L15Dr35	15	0,35	0,5	4,057	0,178	0,052
L25Dr65	25	0,65	5,0	198,080	19,694	3,678
L20Dr65	20	0,65	5,0	182,425	12,520	3,515
L15Dr65	15	0,65	5,0	152,430	13,460	3,732
L25Dr50	25	0,50	5,0	110,820	8,083	1,401
L20Dr50	20	0,50	5,0	105,310	6,124	1,134
L15Dr50	15	0,50	5,0	85,333	7,077	1,482
L25Dr35	25	0,35	5,0	72,050	3,711	0,787
L20Dr35	20	0,35	5,0	67,583	3,089	0,618
L15Dr35	15	0,35	5,0	56,102	3,018	0,415
L25Dr65	25	0,65	20,0	564,035	49,715	18,587
L20Dr65	20	0,65	20,0	507,750	35,333	16,802
L15Dr65	15	0,65	20,0	436,554	37,162	15,806
L25Dr50	25	0,50	20,0	294,503	21,584	8,875
L20Dr50	20	0,50	20,0	262,570	19,992	7,511
L15Dr50	15	0,50	20,0	220,289	18,568	7,063
L25Dr35	25	0,35	20,0	181,250	13,954	3,249
L20Dr35	20	0,35	20,0	156,171	12,191	3,005
L15Dr35	15	0,35	20,0	131,646	10,909	3,554

Çizelge 4.24. Tekil kazıklarda ZB1 gerilme değişimleri için yapılan ANOVA sonuçları

Kaynak	Kareler Toplamı	Serbestlik Derecesi	Ortalama Kare	F-değeri	p-değeri	Model Formülü Katsayısı
Model	621600,0	7	88798,0	226,17	< 0,0001	290,418 (sabit)
L_k/D_k	8726,8	1	8726,8	22,23	0,0002	0,288
D_{rkum}	150400,0	1	150400,0	382,97	< 0,0001	-1330,671
u_v/D_k	393800,0	1	393800,0	1002,94	< 0,0001	-9,951
$L_k/D_k \times u_v/D_k$	5280,3	1	5280,3	13,45	0,0016	0,411
$D_{rkum} \times u_v/D_k$	87090,4	1	87090,4	221,82	< 0,0001	55,624
$(D_{rkum})^2$	5810,7	1	5810,7	14,80	0,0011	1383,109
$(u_v/D_k)^2$	7059,9	1	7059,9	17,98	0,0004	-0,532
Hata	7459,7	19	0,0002			

Çizelge 4.25. Tekil kazıklarda ZB4 gerilme değişimleri için ANOVA sonuçları

Kaynak	Kareler Toplamı	Serbestlik Derecesi	Ortalama Kare	F-değeri	p-değeri	Model Formülü Katsayısı
Model	4081,71	5	816,34	77,15	< 0,0001	20,273 (Sabit)
L_k/D_k	43,01	1	43,01	4,06	0,0568	0,309
D_{rkum}	1104,37	1	1104,37	104,38	< 0,0001	-115,960
u_v/D_k	2590,77	1	2590,77	244,86	< 0,0001	-1,058
$D_{rkum} \times u_v/D_k$	561,65	1	561,65	53,08	< 0,0001	4,467
$(D_{rkum})^2$	46,35	1	46,35	4,38	0,0487	123,531
Hata	222,19	21	10,58			

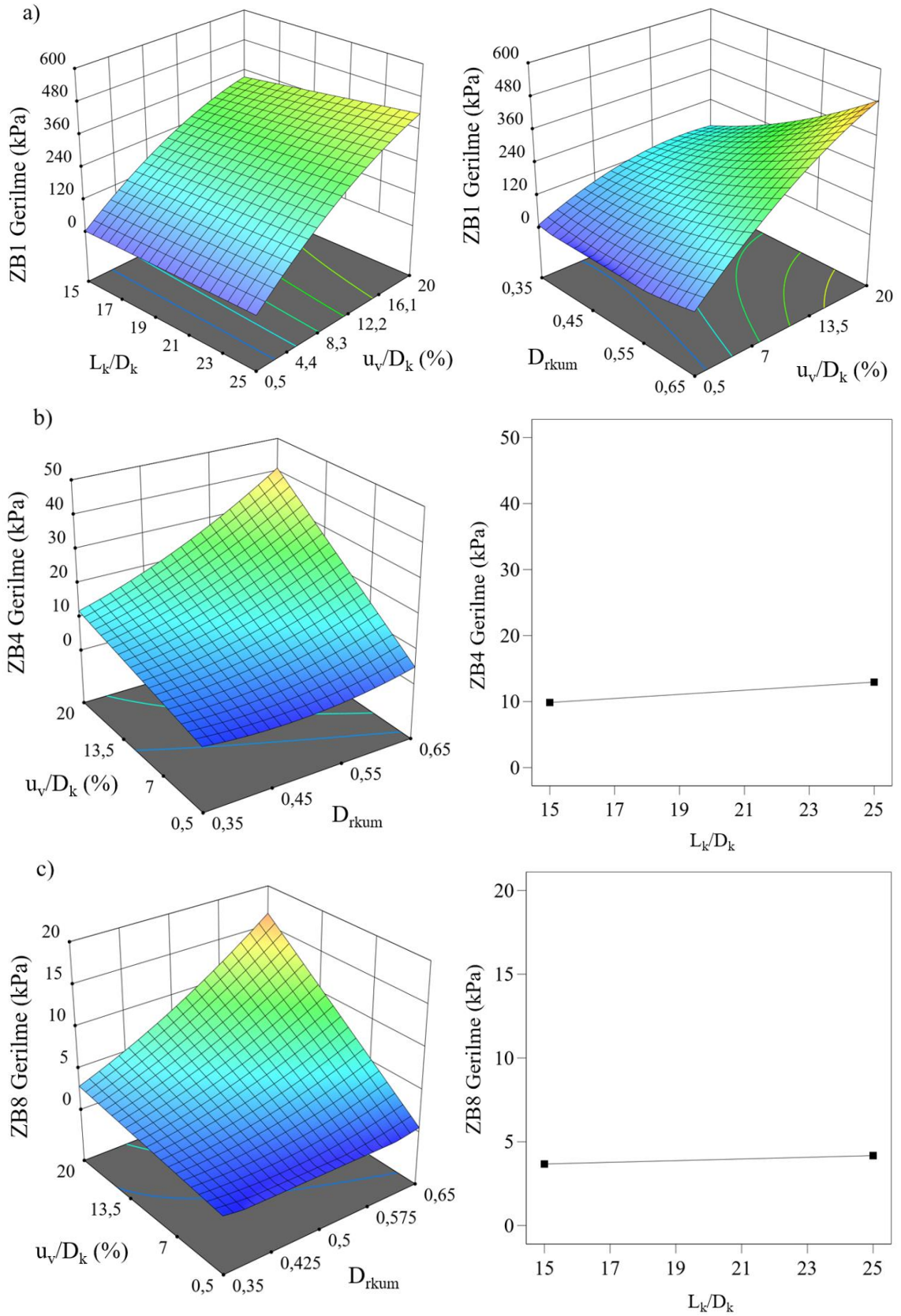
Çizelge 4.26. Tekil kazıklarda ZB8 gerilme değişimleri için ANOVA sonuçları

Kaynak	Kareler Toplamı	Serbestlik Derecesi	Ortalama Kare	F-değeri	p-değeri	Model Formülü Katsayısı
Model	737,480	5	147,500	269,560	< 0,0001	10,448 (Sabit)
L_k/D_k	1,130	1	1,130	2,060	0,1658	0,050
D_{rkum}	208,020	1	208,020	380,160	< 0,0001	-49,081
u_v/D_k	429,900	1	429,900	785,660	< 0,0001	-0,682
$D_{rkum} \times u_v/D_k$	151,650	1	151,650	277,150	< 0,0001	2,321
$(D_{rkum})^2$	7,130	1	7,130	13,030	0,0016	48,447
Hata	11,490	21	0,547			

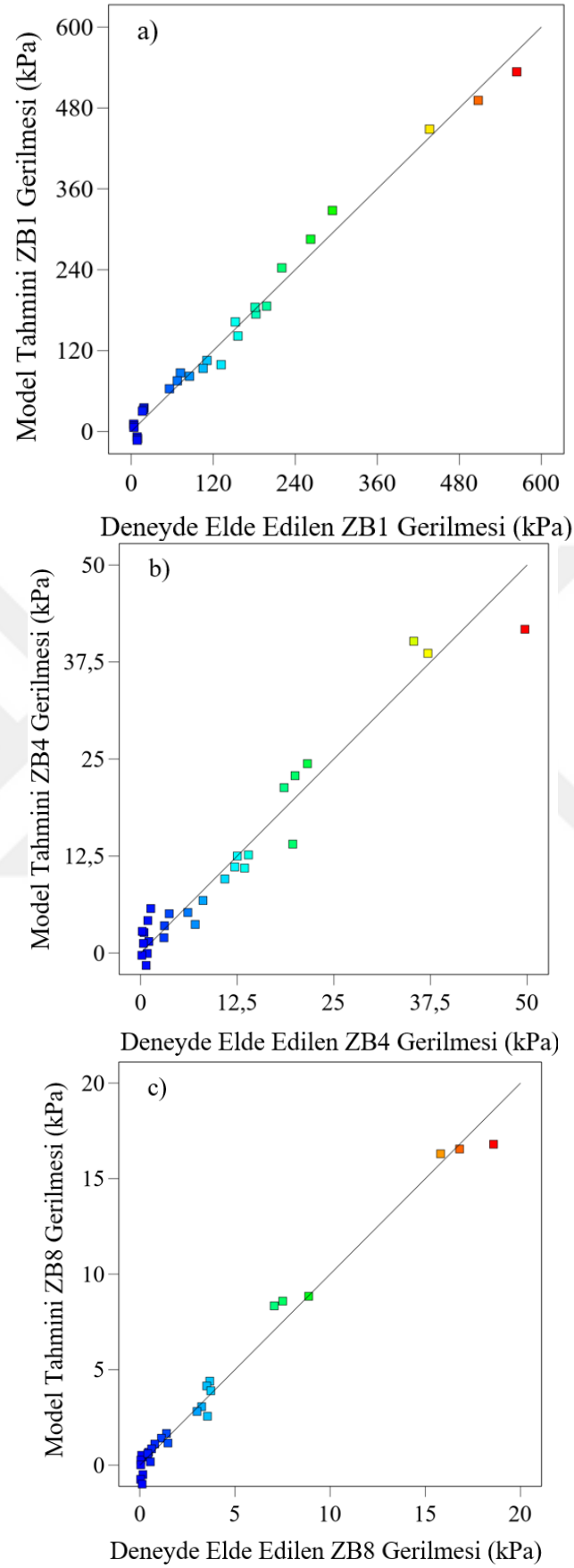
$$\begin{aligned}
ZB1 \text{ Gerilmesi (kPa)} &= 0,288 \times \left(\frac{L_k}{D_k}\right) - 1330,671 \times (D_{rkum}) - 9,951 \times \left(\frac{u_v}{D_k}\right) \\
&+ 0,411 \times \left(\frac{L_k}{D_k} \times \frac{u_v}{D_k}\right) + 55,624 \times \left(D_{rkum} \times \frac{u_v}{D_k}\right) + 1383,109 \times (D_{rkum})^2 \\
&- 0,532 \times \left(\frac{u_v}{D_k}\right)^2 + 290,418
\end{aligned} \tag{4.13}$$

$$\begin{aligned}
ZB4 \text{ Gerilmesi (kPa)} &= 0,309 \times \left(\frac{L_k}{D_k}\right) - 115,960 \times (D_{rkum}) - 1,058 \times \left(\frac{u_v}{D_k}\right) \\
&+ 4,467 \times \left(D_{rkum} \times \frac{u_v}{D_k}\right) + 123,531 \times (D_{rkum})^2 + 20,273
\end{aligned} \tag{4.14}$$

$$\begin{aligned}
ZB8 \text{ Gerilmesi (kPa)} &= 0,050 \times \left(\frac{L_k}{D_k}\right) - 49,081 \times (D_{rkum}) - 0,682 \times \left(\frac{u_v}{D_k}\right) \\
&+ 2,321 \times \left(D_{rkum} \times \frac{u_v}{D_k}\right) + 48,447 \times (D_{rkum})^2 + 10,448
\end{aligned} \tag{4.15}$$



Şekil 4.54. Tekil kazıklarda zeminde meydana gelen gerilmelerin değişkenlere bağlı olarak değişimi: a) ZB1, b) ZB4, c) ZB8



Şekil 4.55. Tekil kazıklarda zeminde meydana gelen gerilmeler için model tahmini ve deney sonuçlarının ilişkisi: a) ZB1, b) ZB4, c) ZB8

Sayısal analizlerden ve deneylerden elde edilen ZB gerilmeleri arasındaki ilişki Çizelge 4.27–4.29’da verilen tablolar ve Şekil 4.56 yardımıyla ile incelenmiştir. Sayısal analizler üç farklı ölçüm noktasındaki zemin gerilme artışlarını birbirine çok yakın seviyede tahmin edebilmiştir. ZB’ler için oluşturulmuş olan gerilme grafikleri ile Şekil 4.57 ve Şekil 4.58’de örnek olarak verilen (Diğer sayısal analiz gerilme dağılımları EK-1’de verilmiştir) sayısal analiz gerilme dağılımlarının tutarlılığı da bunu ortaya koymuştur. Ayrıca ortalama MAPE değerlerinin ZB1, ZB4 ve ZB 8 için sırasıyla %6,40, %6,34 ve %6,67 olması; ortalama R^2 değerlerinin ZB1, ZB4 ve ZB 8 için sırasıyla 0,990, 0,991 ve 0,989 olması ise tutarlılığın yüksek olduğuna işaret etmektedir. Bu tutarlılık, sayısal modelin gerilme dağılımlarını ZB konumundan bağımsız olarak aynı doğrulukta temsil edebileceğini göstermiştir. Ortalama sayısal/deney oranları %93,64-%94,29 aralığında olup sayısal analizler deneysel çalışmaya göre üç derinlikte de daha düşük gerilme tahmin etmiştir. Genel olarak değerlendirildiğinde, deney–sayısal karşılaştırma sonuçları tek kazığın düşey yüklenmesi altında zemin içinde gelişen düşey gerilme dağılımının sayısal analizler ile güvenilir biçimde temsil edilebildiğini göstermiştir. En zayıf uyum durumunda dahi R^2 değerinin 0.981 düzeyinde kalması, modelin formunu koruduğunu; farkın daha çok seviye sapması biçiminde ortaya çıktığını ortaya koymuştur. Sonuç olarak sayısal analizlerden elde edilen ZB gerilmeleri deney verilerinden daha düşük olmuş; fakat kabul edilebilir sapma ve yüksek tutarlılık ile deney sonuçlarıyla uyumlu bir davranış sergilemiştir.

Çizelge 4.27. Tekil kazıklarda deney ve sayısal analizler ile ZB1 için elde edilen zeminde meydana gelen gerilmelerin karşılaştırılmasında kullanılan göstergeler

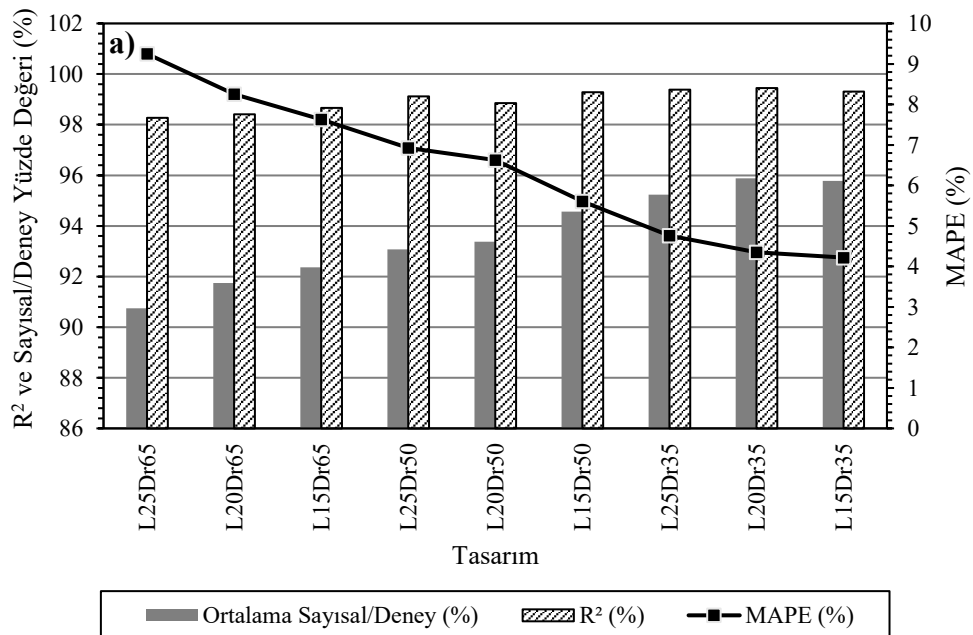
Tasarım	MAPE (%)	En Küçük Sayısal/Deney (%)	En Büyük Sayısal/Deney (%)	Ortalama Sayısal/Deney (%)	R^2 (%)
L25Dr65	9,25	88,68	92,97	90,75	0,983
L20Dr65	8,25	87,41	93,11	91,75	0,984
L15Dr65	7,63	90,25	94,46	92,37	0,987
L25Dr50	6,93	91,82	94,69	93,07	0,991
L20Dr50	6,63	86,55	95,51	93,37	0,989
L15Dr50	5,60	91,83	102,58	94,57	0,993
L25Dr35	4,76	91,57	99,13	95,24	0,994
L20Dr35	4,35	90,56	103,16	95,88	0,994
L15Dr35	4,22	90,80	99,67	95,78	0,993
Ortalama	6,40	89,94	97,25	93,64	0,990

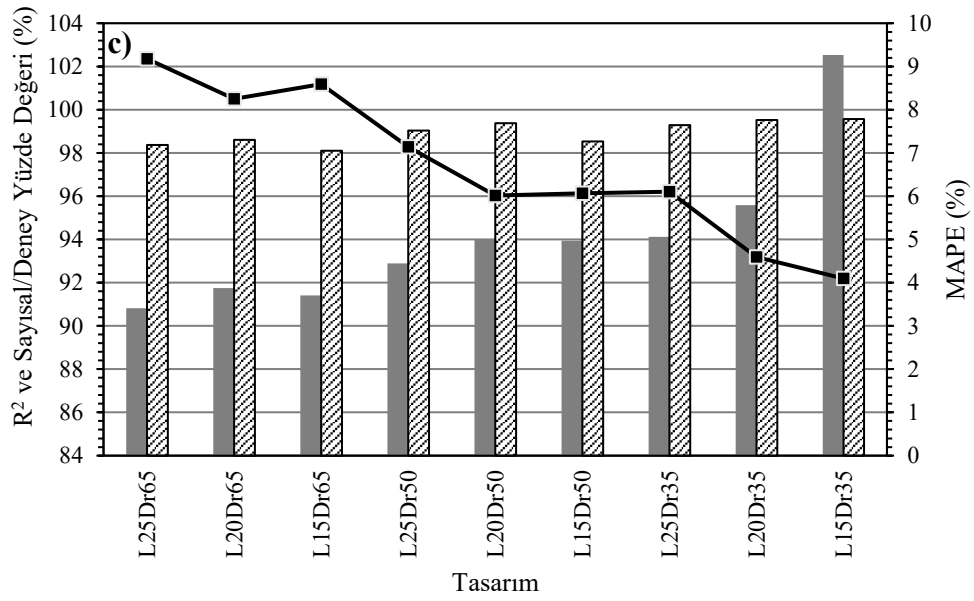
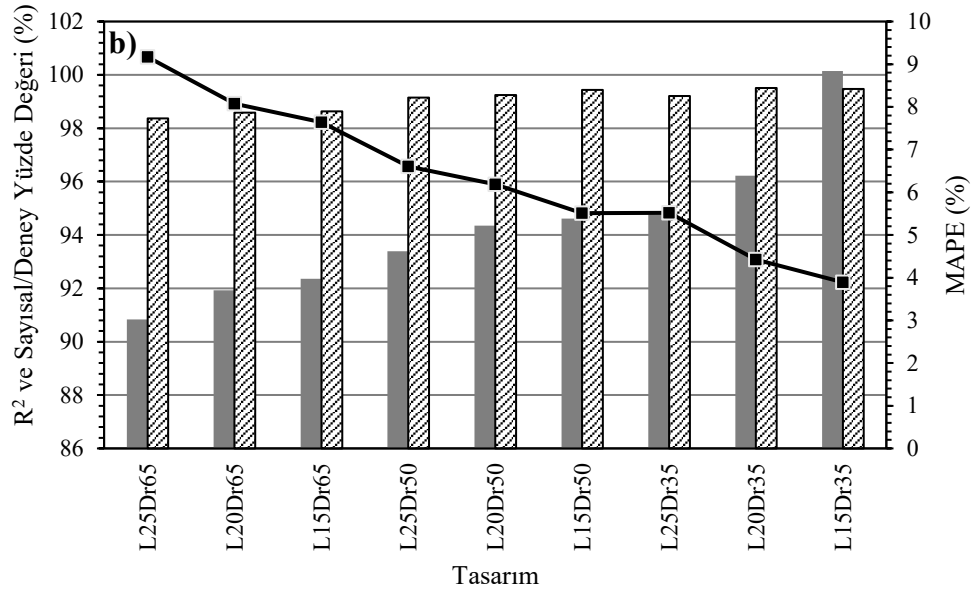
Çizelge 4.28. Tekil kazıklarda deney ve sayısal analizler ile ZB4 için elde edilen zeminde meydana gelen gerilmelerin karşılaştırılmasında kullanılan göstergeler

Tasarım	MAPE (%)	En Küçük Sayısal/Deney (%)	En Büyük Sayısal/Deney (%)	Ortalama Sayısal/Deney (%)	R ² (%)
L25Dr65	9,17	88,61	93,29	90,83	0,984
L20Dr65	8,08	87,36	92,98	91,92	0,986
L15Dr65	7,64	87,73	94,30	92,36	0,986
L25Dr50	6,61	87,38	99,27	93,39	0,991
L20Dr50	6,18	89,56	108,00	94,35	0,992
L15Dr50	5,51	91,42	101,87	94,61	0,994
L25Dr35	5,52	88,38	104,30	94,76	0,992
L20Dr35	4,42	92,70	107,53	96,22	0,995
L15Dr35	3,89	90,42	108,13	100,14	0,995
Ortalama	6,34	89,28	101,07	94,29	0,991

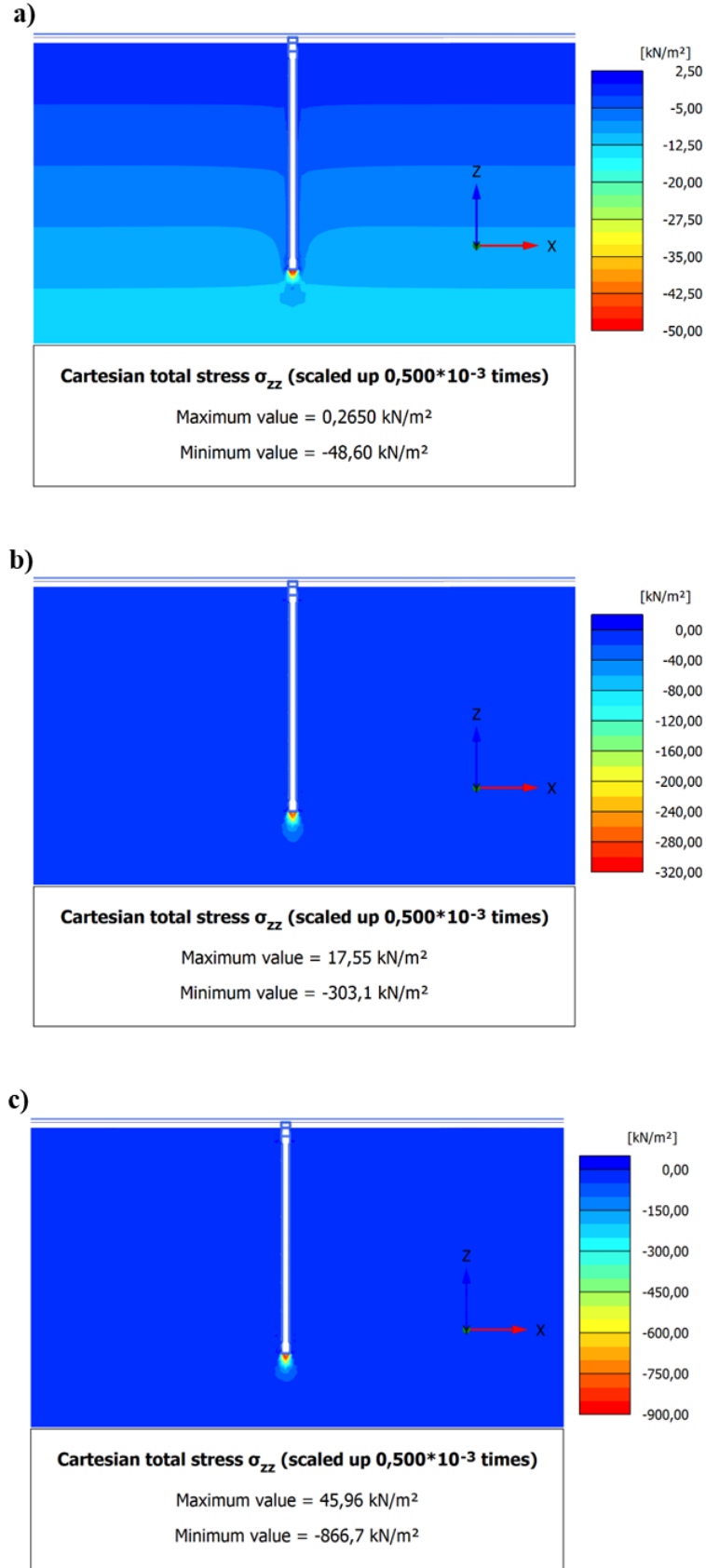
Çizelge 4.29. Tekil kazıklarda deney ve sayısal analizler ile ZB8 için elde edilen zeminde meydana gelen gerilmelerin karşılaştırılmasında kullanılan göstergeler

Tasarım	MAPE (%)	En Küçük Sayısal/Deney (%)	En Büyük Sayısal/Deney (%)	Ortalama Sayısal/Deney (%)	R ² (%)
L25Dr65	9,18	86,41	92,73	90,82	0,984
L20Dr65	8,25	89,14	93,03	91,75	0,986
L15Dr65	8,59	84,60	94,58	91,41	0,981
L25Dr50	7,14	76,03	100,57	92,90	0,990
L20Dr50	6,01	89,68	98,17	93,99	0,994
L15Dr50	6,06	85,01	96,57	93,94	0,985
L25Dr35	6,10	84,21	103,32	94,12	0,993
L20Dr35	4,59	86,27	102,30	95,58	0,995
L15Dr35	4,10	93,71	109,40	102,54	0,996
Ortalama	6,67	86,12	98,96	94,12	0,989

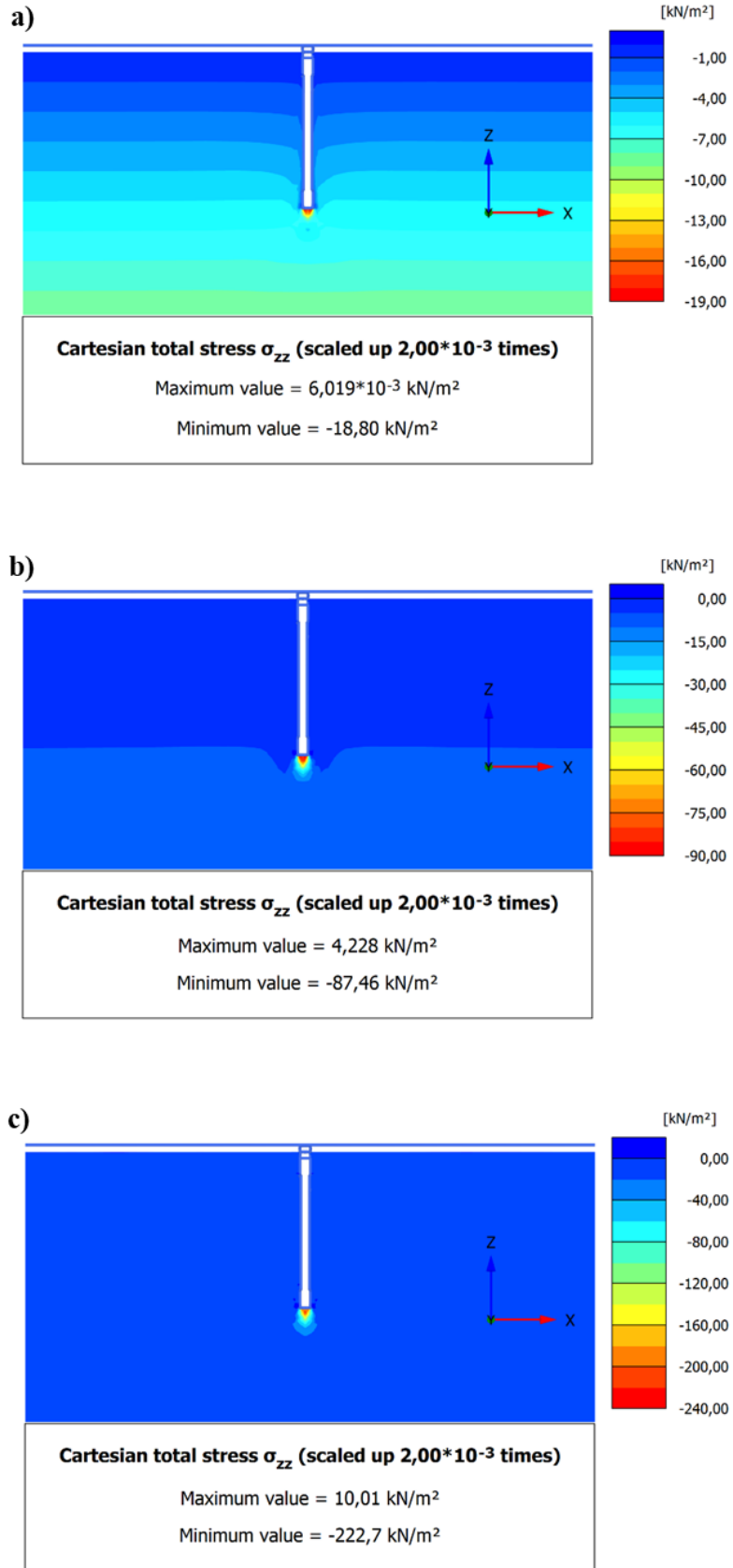




Şekil 4.56. Tekil kazıklarda zeminde meydana gelen gerilmelerin sayısal analiz ve deney verilerinin kıyaslanmasında kullanılan göstergelerin tasarımlara göre değişimi: a) ZB1, b) ZB4, c) ZB8



Şekil 4.57. L25Dr65 tasarımında farklı oturma seviyeleri için sayısal analiz ile elde edilmiş düşey gerilmelerin dağılımı: a) $u_v/D_k (\%) = 0,5$, b) $u_v/D_k (\%) = 5,0$, c) $u_v/D_k (\%) = 20,0$



Şekil 4.58. L15Dr35 tasarımında farklı oturma seviyeleri için sayısal analiz ile elde edilmiş düşey gerilmelerin dağılımı: a) u_v/D_k (%) = 0,5, b) u_v/D_k (%) = 5,0, c) u_v/D_k (%) = 20,0

4.8. Kazıklı Radye Sistemlerinde Düşey Yükleme

Kazıklı radye sistemlerinde yapılan küçük ölçekli model deneylerde uygun sensörler ile ölçümler yapıldıktan sonra elde edilen gerilme-oturma, kazık-radye yük paylaşımı, kazıklardaki eksenel yükler ve çevre sürtünmesi ile zeminde meydana gelen düşey gerilmeler bu bölümde verilmiştir. Bu bölümde u_v sembolü oturmayı göstermektedir. Sonuçlar u_v/L_{er} oranının %0,05, %0,5 ve %2 olduğu oturma seviyelerinde değerlendirilmiştir.

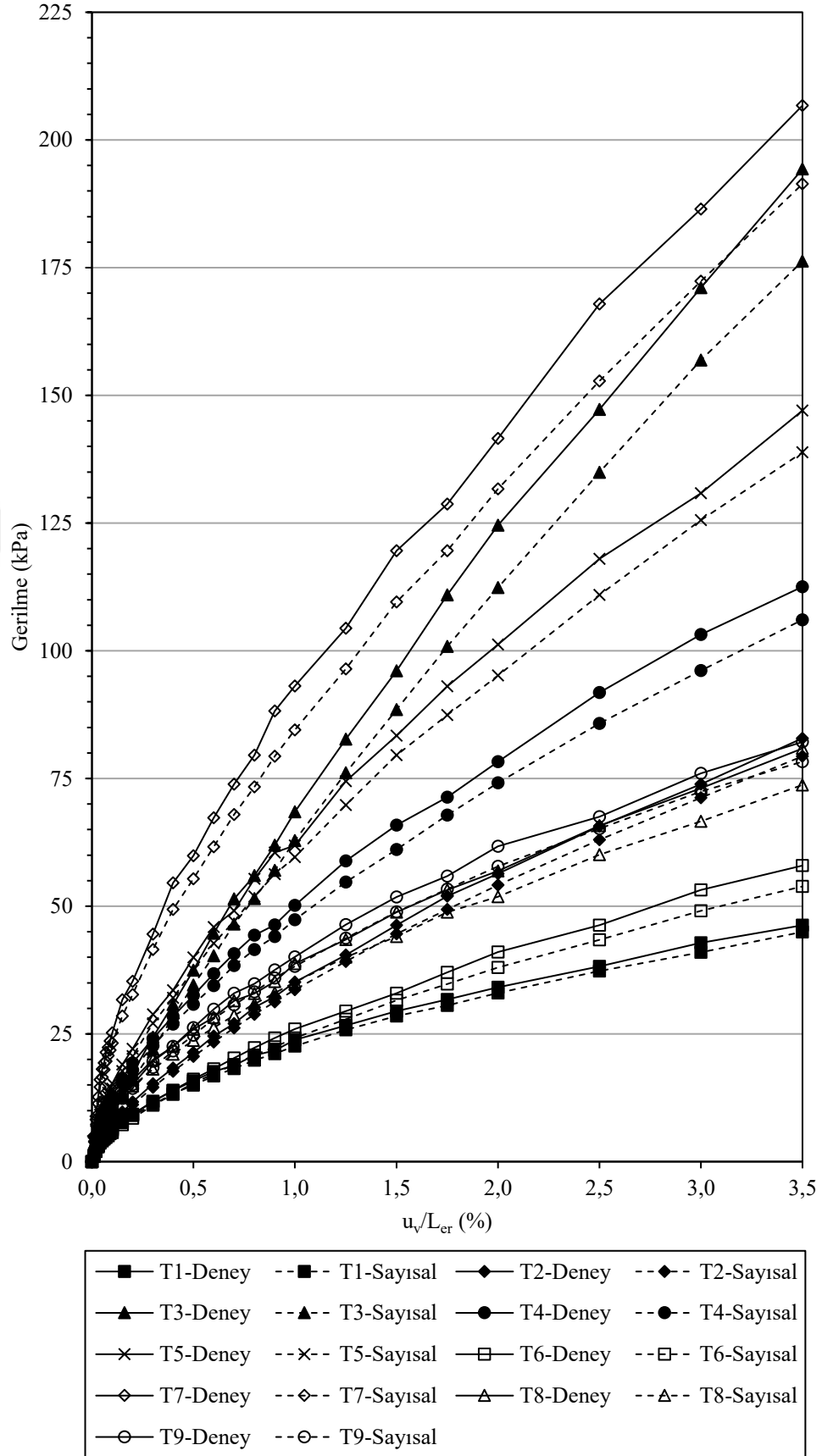
4.8.1. Gerilme-oturma davranışı

Düşey yüklemeler devam ederken yük hücresi ile ölçülen yük ve lineer potansiyometre ile ölçülen deplasman değerleri kullanılarak Taguchi L9 tasarımındaki her durum için gerilme-oturma grafikleri şeklinde çizilerek verilmiştir. Farklı oturma seviyelerine göre kazıklı radye tarafından taşınabilen gerilmenin değişkenler tarafından etkilenme derecesinin Taguchi yöntemiyle belirlenebilmesi için u_v/L_{er} oranının %0,05, %0,5 ve %2 olduğu durumlarda gerilmeler ile Taguchi analizi yapılmıştır.

Kazıklı radye sistemlerinde yapılan düşey yükleme sırasında kazıklı radye tarafından taşınan toplam gerilmeler ile sayısal analizlerden elde edilen toplam gerilmeler Şekil 4.59'da verilmiştir. Buna göre u_v/L_{er} oranının %0,05, %0,5 ve %2 olduğu durumlarda en büyük taşınan gerilme T7 tasarımında sırasıyla 18,119, 59,888 ve 141,570 kPa olarak elde edilmiştir. Fakat u_v/L_{er} oranı %0,05 iken en küçük taşınan gerilme T6 tasarımında 4,273 kPa olmuş; u_v/L_{er} oranının %0,5 ve %2 olduğu oturma seviyesinde en küçük taşınan gerilme T1 tasarımında sırasıyla 15,842 ve 34,152 kPa olmuştur. Üç oturma seviyesinde Çizelge 4.30'da verilen, her tasarıma ait üç oturma seviyesi için taşınan gerilmelerin de yazıldığı Taguchi tablosu oluşturulmuş ve istatistiksel analiz yapılmıştır. Deney sonuçlarının ortalamaları ile her değişkenin üç farklı oturma seviyesinde taşınan gerilmeler üzerindeki etkisi incelenmiş (Şekil 4.60) ve ANOVA ile değişkenlerin etki derecesi katkı dereceleri ile yorumlanmıştır (Çizelge 4.31, Çizelge 4.32, Çizelge 4.33 ve Şekil 4.61). Ana etki sıralaması oturma seviyesine göre değişmiş, düşük oturma seviyesinde en etkili değişkenler L_k/D_k ve D_{rkum} olurken; s_k ikincil, N_k ise en zayıf değişken olmuştur. Orta seviyede oturma için D_{rkum} açık ara baskın duruma geçmiş; L_k/D_k ve s_k onu izlemiş, N_k ise bu durumda hala sınırlı etki düzeyinde kalmıştır. Yüksek oturma seviyesinde ise D_{rkum} yine açık ara en etkili değişken olurken, N_k ikinci

etkili değişken olmuş; L_k/D_k ve s_k ise daha az etkili olmuştur. Bu durum, tasarım hedeflerine göre farklı değişkenlerin ön plana çıktığını göstermektedir. Kullanım yükleri altındaki küçük oturma seviyeleri için kazıkta L_k/D_k oranının optimizasyonu kritik önem taşırken, büyük oturma seviyelerinde oturmalarla karşı önlem açısından D_{rkum} değerinin iyileştirilmesi en etkili strateji olarak ortaya çıkmaktadır. L_k/D_k arttıkça ortalama gerilme üç oturma seviyesinin tamamında düzenli olarak artmıştır. L_k/D_k oranının 15'ten 25'e artması, u_v/L_{er} oturma seviyesinin %0,05 olduğu durumda ortalama gerilmede yaklaşık %124'lük bir artışa neden olurken, %0,50 ve %2,00 seviyelerinde bu artış oranı sırasıyla %50 ve %21'e düşmüştür. Bu sonuç, daha uzun kazıkların kazıklı radye sistem rijitliğini ve derin tabakalara yük transfer kabiliyetini artırdığı yönündeki genel literatür eğilimiyle uyumludur (Chandiwala ve Vasanwala, 2023). L_k/D_k katkı derecesi oturmalar arttıkça %39,404'ten %3,605'e azalmış, yani genel olarak etkisinde büyük bir azalma meydana gelmiştir. Bu durum, uzun kazığın en belirgin olumlu etkiyi düşük ve orta seviyedeki oturma safhalarında gösterdiğini ortaya koymuştur. Omeman (2012) tarafından da benzer bir davranış gözlenmiştir. Bu davranış, düşük oturma seviyelerinde kazığın etkili olduğu bir sistem davranışı ve dolayısıyla hızlı bir şekilde oluşmaya başlayan çevre sürtünmeleri ile ilgilidir. Uzun kazıklar daha fazla çevre sürtünmesi oluşmasına katkı sağladıklarından düşük oturma seviyelerinde kazık boyunun değişimi kapasitede oldukça etkili olmuş; fakat oturma seviyeleri arttıkça radyenin sistem kapasitesine katkısının artmasıyla beraber, her ne kadar uç direnci artsa da, kazıkların sistem kapasitesine etkisi daha sınırlı düzeyde olmuştur. Bu mekanizma Sharafkhah ve Shooshpasha (2018) ile Alshenawy ve diğ. (2016) tarafından belirtilen kazık uzunluğunun özellikle düşük oturma seviyelerinde kazıklı radye rijitliğini etkilediği sonucuyla örtüşmektedir. Kazıklı radyede s_k arttıkça ortalama gerilme azalmıştır. Ayrıca taşınan gerilmenin değişimine s_k 'nin katkı derecesi oturma seviyesi arttıkça %18,527'den %2,415'e azalmıştır. Ortalama gerilmedeki azalma ise u_v/L_{er} oturma seviyesinin değerinin artmasıyla yaklaşık %40,7'den %10,5'e düşmüştür. Bu bulgu s_k 'nin azalmasıyla grup veriminin, dolayısıyla kapasitenin azalacağı görüşüyle çelişmektedir. Literatürde kazık aralığının artmasının kazık-kazık etkileşim faktörlerini azalttığı ve dolayısıyla her bir kazığın bireysel kapasitesini daha etkin kullanmasını sağladığı vurgulanmıştır (Omer ve Haroglu, 2021; Yirsaw ve Asha, 2023). Ancak tez çalışmasında karşılaştırılan büyüklük toplam yük yerine ortalama gerilmedir. Ayrıca tasarımda s_k arttığında B_r ve L_r de büyümekte, dolayısıyla aynı veya daha büyük toplam yük daha geniş bir alana bölünmektedir. Bu nedenle s_k bakımından kapasite eğilimi ile gerilme eğiliminin aynı olması beklenemez. Buna göre, s_k değerinin artmasının

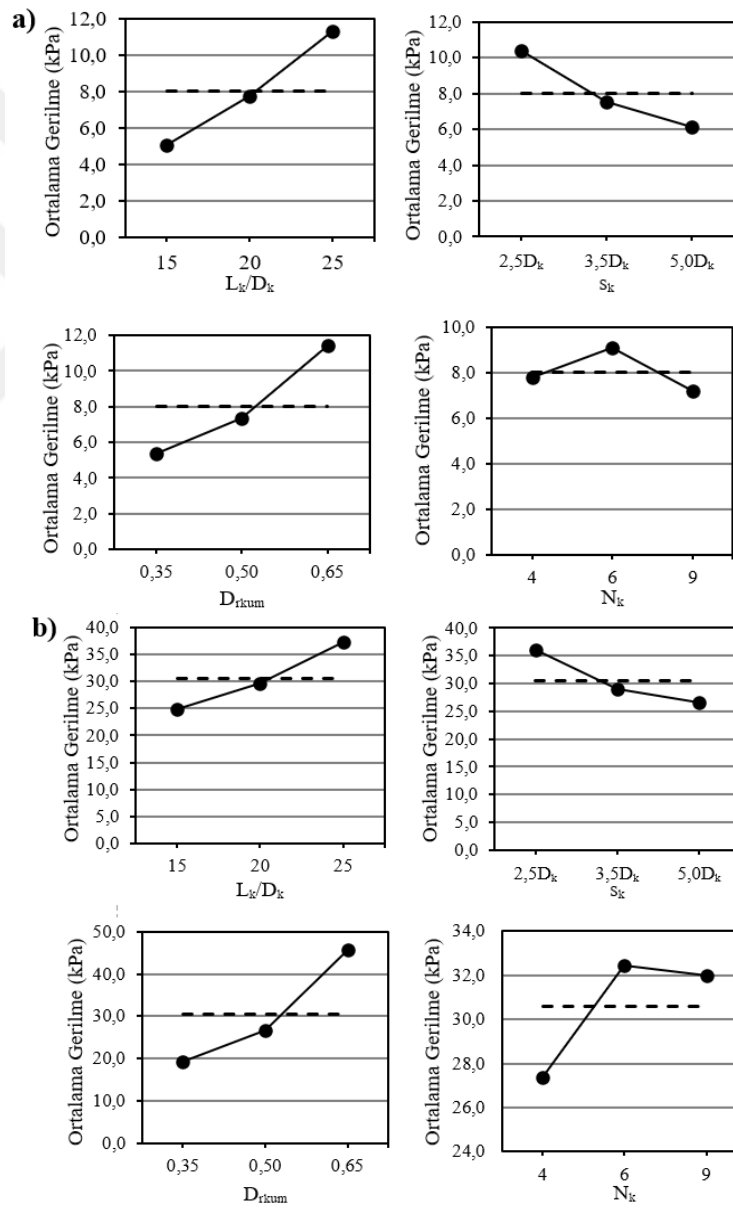
gerilmeyi azaltıcı, etkisi radye alanını artırmasıyla da ilgilidir. Tüm değişkenler içinde en tutarlı ve en fazla etkili değişken D_{rkum} olmuştur. Oturma seviyesi arttıkça D_{rkum} değerinin 0,35'ten 0,65'e artması ile ortalama gerilmede yaklaşık %113'ten %178'e kadar bir artış olmuştur. D_{rkum} katkı derecesinin oturma seviyesinin artışıyla beraber %38,296'dan %87,928'e artması bu durumun bir göstergesidir. Sıkı kumlarda kayma mukavemeti parametrelerinin gevşek kumlara kıyasla belirgin biçimde yüksek olması hem kazık çevre sürtünmesini hem de kazık uç direncini artırmaktadır. Ayrıca, kazık uç direnci büyük oturma seviyelerinde harekete geçmeye devam edeceğinden sıklığın artması gerilmeyi artırmaktadır. Çünkü sıkı kumlarda kazık uç direnci gevşek kumlara göre çok daha yüksek değerlere ulaşabilmektedir. Dahası, radye-zemin temas gerilmesi de D_{rkum} ile doğru orantılı olarak artmakta, bu da radyenin daha etkili olduğu yüksek oturma seviyelerinde D_{rkum} 'un da kapasite üzerindeki etkisini güçlü kılmaya devam etmektedir. N_k 'nin etkisi oturma seviyesine bağlı olarak belirgin şekilde değişmiştir. Oturma seviyesi u_v/L_{er} 'nin %0,05'ten %2'ye artmasıyla N_k 'nin katkı derecesi sırasıyla %3,773, %3,079 ve %6,052 olmuştur. Ayrıca kazık sayısının ortalama gerilme üzerindeki etkisi düşük oturma seviyesinde zayıf olmuş ve yüksek oturma seviyesinde ise açık biçimde artıran şekilde olmuştur. Bu karmaşık davranış, kazık sayısının artmasının bir yandan kazıklı radyenin toplam yük taşıma kapasitesini artırırken, diğer yandan radye alanını da büyütmesinden kaynaklanmaktadır. Bu davranışın iki nedeni vardır. Birincisi, literatürde de görüleceği üzere kazık sayısı arttıkça kazıklı radye sisteminin rijitliğinin ve taşınabilen yükün artma eğilimidir (Deb ve Pal, 2020; Jamil ve diğ., 2022). İkincisi, N_k artışı aynı zamanda radye alanını da büyütmüştür.

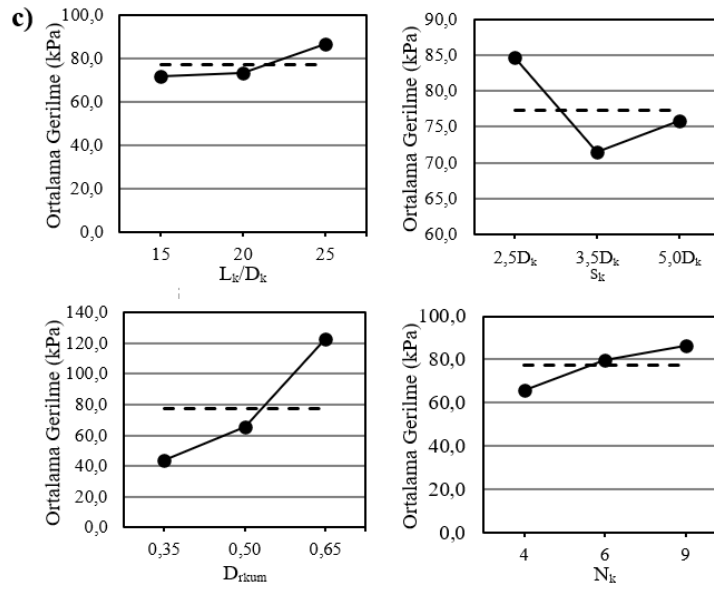


Şekil 4.59. Kazıklı radyelerin taşıdığı gerilmelerin oturma seviyelerine bağlı olarak değişimi

Çizelge 4.30. Kazıklı radyelerde gerilme-oturma davranışının istatistiksel analizinde dikkate alınan değişkenler ve taşıyan gerilmeler

Tasarım	L_k/D_k	S_k	D_{rkum}	N_k	$u_v/L_{er}(\%) = 0,05$ Gerilme (kPa)	$u_v/L_{er}(\%) = 0,50$ Gerilme (kPa)	$u_v/L_{er}(\%) = 2,00$ Gerilme (kPa)
T1	15	2,5D _k	0,35	4	4,480	15,842	34,152
T2	15	3,5D _k	0,50	6	4,912	21,319	56,373
T3	15	5,0D _k	0,65	9	5,724	37,453	124,559
T4	20	2,5D _k	0,50	9	8,566	32,525	78,276
T5	20	3,5D _k	0,65	4	10,431	39,962	101,225
T6	20	5,0D _k	0,35	6	4,273	16,135	41,055
T7	25	2,5D _k	0,65	6	18,119	59,888	141,570
T8	25	3,5D _k	0,35	9	7,308	25,922	56,895
T9	25	5,0D _k	0,50	4	8,487	26,215	61,733





Şekil 4.60. Kazıklı radyelerin taşıdığı gerilmelere etki eden değişkenlerin farklı oturma seviyeleri için ana etki grafikleri: a) u_v/L_{er} (%) = 0,05, b) u_v/L_{er} (%) = 0,50, c) u_v/L_{er} (%) = 2,00

Çizelge 4.31. Kazıklı radyelerde u_v/L_{er} (%) = 0,05 seviyesinde taşınan gerilmeler için ANOVA sonuçları

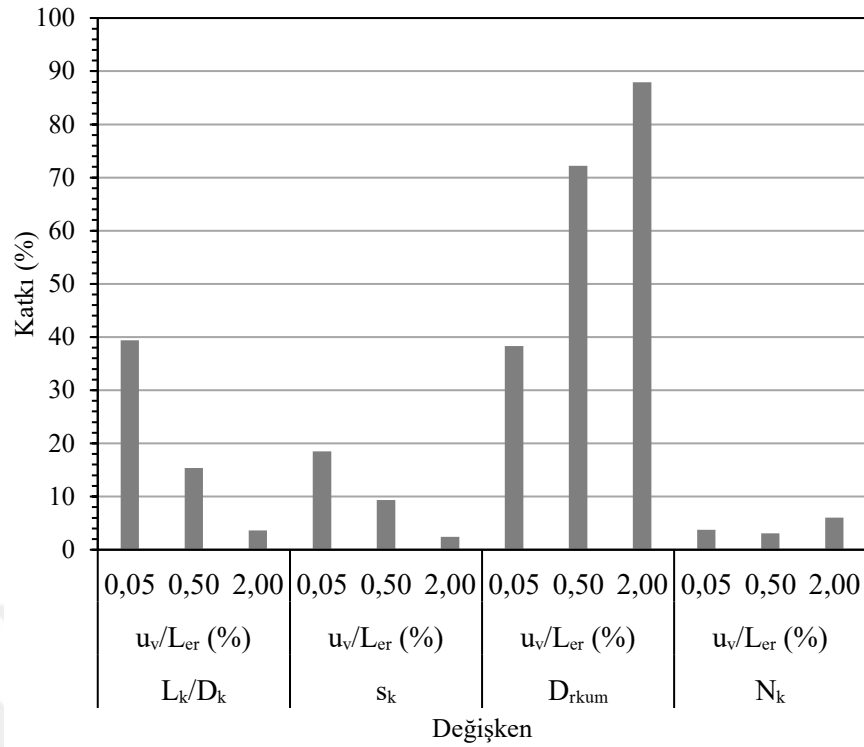
Kaynak	Serbestlik Derecesi	Kareler Toplamı	Katkı (%)	Ortalama Kare
Model	8	150,328		
L_k/D_k	2	59,236	39,404	29,618
S_k	2	27,851	18,527	13,925
D_{rkum}	2	57,570	38,296	28,785
N_k	2	5,671	3,773	2,836

Çizelge 4.32. Kazıklı radyelerde u_v/L_{er} (%) = 0,50 seviyesinde taşınan gerilmeler için ANOVA sonuçları

Kaynak	Serbestlik Derecesi	Kareler Toplamı	Katkı (%)	Ortalama Kare
Model	8	1550,378		
L_k/D_k	2	238,160	15,361	119,080
S_k	2	145,278	9,370	72,639
D_{rkum}	2	1119,210	72,190	559,605
N_k	2	47,730	3,079	23,865

Çizelge 4.33. Kazıklı radyelerde u_v/L_{er} (%) = 2,00 seviyesinde taşınan gerilmeler için ANOVA sonuçları

Kaynak	Serbestlik Derecesi	Kareler Toplamı	Katkı (%)	Ortalama Kare
Model	8	11209,368		
L_k/D_k	2	404,075	3,605	202,038
S_k	2	270,683	2,415	135,342
D_{rkum}	2	9856,180	87,928	4928,090
N_k	2	678,429	6,052	339,214



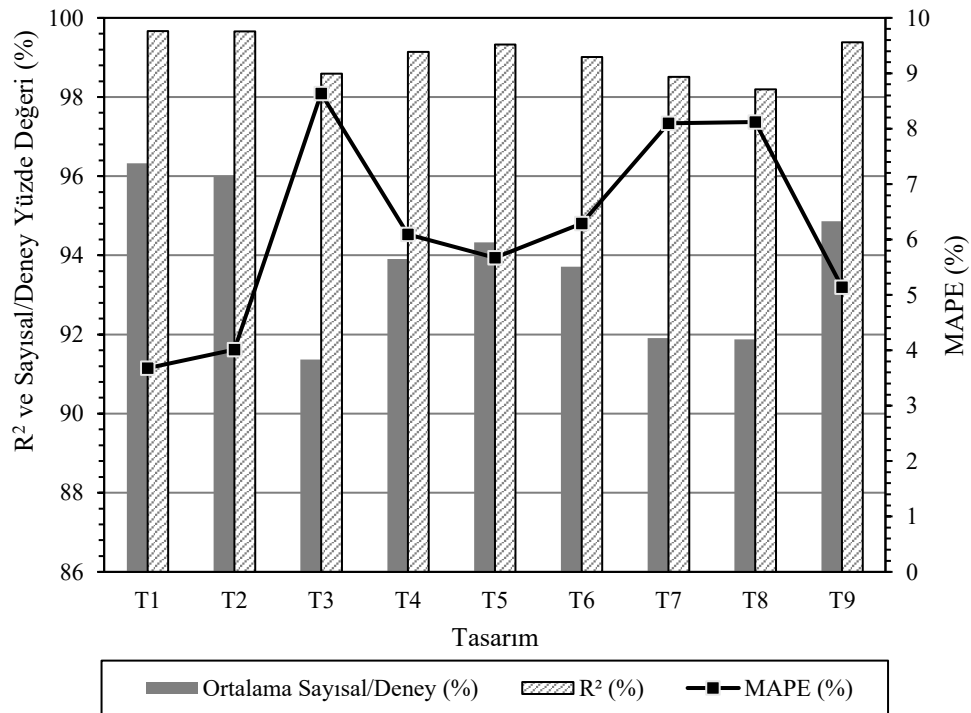
Şekil 4.61. Kazıklı radyelerde oturma seviyelerinin değişimleri ile değişkenlerin taşınan gerilmelerin değişimine katkı dereceleri

Sayısal analizlerden ve deney verilerinden elde edilen taşınan gerilmelerin değerlendirilebilmesi Çizelge 4.34 ve Şekil 4.62 oluşturulmuştur. Ortalama MAPE'nin %6,19 ve sayısal/deney verilerinin ortalamasının %93,81 olması deney verileri ile sayısal analiz verilerinin oldukça küçük bir varyasyon ile birbiri ile uyumlu olduğunu göstermiştir. Sayısal/deney verisi oranlarının tüm tasarımlarda %100'den az olması da deney sonuçlarının sayısal analiz sonuçlarına göre daha büyük olduğuna işaret etmiştir. Ortalama R^2 değerinin 0,991 olması ise deney ve sayısal analiz verileri arasındaki ilişkinin tutarlı olduğunu ortaya koymuştur. Sayısal analizlerde daha düşük gerilme seviyelerinin elde edilmiş olması, kum zeminde kazık yerleştirilmesiyle oluşan sıkılaşma/gerilme yeniden dağılımı ve temas koşullarının idealize edilmesinden kaynaklanmış olabilir. Ayrıca D_{rkum} 'un yüksek olduğu veya daha yüksek taşıma seviyelerine ulaşan tasarımlarda deneysel eğrilerin sayısal eğrilerden sistematik biçimde yukarıda kalması, gerçek sistemdeki ilave sıkılaşma ve etkileşim kazançlarının sayısal modelde tam karşılık bulmamasıyla açıklanabilir. Özellikle T3, T7 ve T8 tasarımlarında MAPE yaklaşık %8 dolaylarına olmuştur. Bu üç tasarımın ortak özelliği, ya yüksek taşınan gerilme seviyelerine ulaşmaları ya da daha sıkı kum-daha fazla kazık-daha büyük L_k/D_k oranı kombinasyonlarını içermeleridir. Bu tasarımlarda kazık çevre sürtünmesinin

harekete geçmesi, zemin rijitliği ve dilatans etkileri daha belirleyici hale gelmiş, Dolayısıyla malzeme modelindeki parametrelerin sapmaları bile mutlak gerilme seviyesinde daha görünür duruma gelmiş olabilir.

Çizelge 4.34. Kazıklı radyelerde deney ve sayısal analizler ile elde edilen taşınan gerilmelerin karşılaştırılmasında kullanılan göstergeler

Tasarım	MAPE (%)	En Küçük Sayısal/Deney (%)	En Büyük Sayısal/Deney (%)	Ortalama Sayısal/Deney (%)	R ²
T1	3,68	94,31	97,99	96,32	0,997
T2	4,01	94,98	96,96	95,99	0,997
T3	8,64	90,10	92,28	91,36	0,986
T4	6,09	92,70	95,19	93,91	0,991
T5	5,67	93,02	96,39	94,33	0,993
T6	6,29	92,37	95,87	93,71	0,990
T7	8,10	89,90	93,14	91,90	0,985
T8	8,12	90,20	93,75	91,88	0,982
T9	5,14	93,09	96,54	94,86	0,994
Ortalama	6,19	92,30	95,34	93,81	0,991



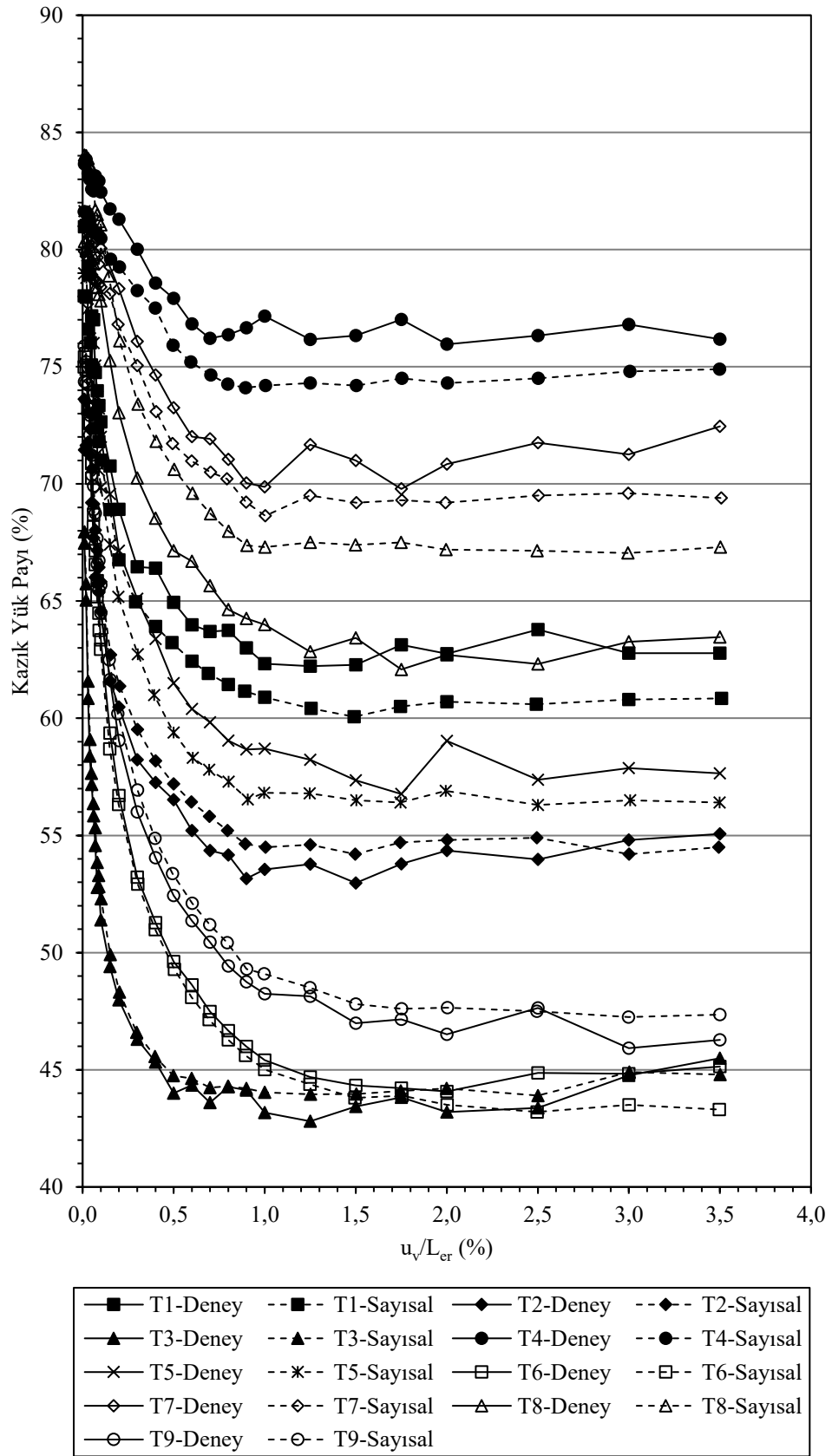
Şekil 4.62. Kazıklı radyelerde taşınan gerilmelerin sayısal analiz ve deney verilerinin kıyaslanmasında kullanılan göstergelerin tasarımlara göre değişimi

4.8.2. Kazık-radye yük paylaşımı

Kazık başlarına bağlanmış ve aynı zamanda kazık ile radyeyi birleştirmeye yarayan mini yük hücreleri yardımıyla her kazığa radyeden aktarılan yük ölçülmüştür. Taguchi L9 tasarımındaki her durum için oturma seviyelerine göre kazık-radye yük paylaşımının nasıl değiştiği belirlenmiştir. Farklı oturma seviyelerine göre kazığın taşıdığı yük payının değişkenler tarafından etkilenme derecesinin Taguchi yöntemiyle belirlenebilmesi için u_v/L_{er} oranının %0,05, %0,5 ve %2 olduğu durumlarda kazık payları ile Taguchi analizi yapılmıştır.

Kazıklı radye sistemlerinde deney esnasında kazıklar tarafından paylaşılan yük oranları ve sayısal analizlerden elde edilen kazık yük paylaşım oranları Şekil 4.63'te verilmiştir. Buna göre u_v/L_{er} oranının %0,05, %0,5 ve %2 olduğu oturma seviyelerinde en yüksek kazık payları T4 tasarımında sırasıyla %82,573, 77,920 ve 75,957 olarak elde edilmiştir. Buna karşın, u_v/L_{er} oranı %0,05, %0,5 ve %2 seviyelerinde olduğunda en küçük kazık payları T3 tasarımında sırasıyla %57,174, 43,996 ve 43,200 olmuştur. Oturma seviyelerinde her tasarım için kazık paylarının eklendiği Taguchi tablosu oluşturulmuş ve istatistiksel analiz yapılmıştır (Çizelge 4.35). Deneylerden elde edilen kazık paylarının ortalamaları ile değişkenlerin üç farklı oturma seviyesindeki kazık payları üzerindeki etkisi incelenmiş (Şekil 4.64) ve ANOVA ile değişkenlerin kazık payının değişimini etkileme seviyeleri katkı dereceleri ile değerlendirilmiştir (Çizelge 4.36, Çizelge 4.37, Çizelge 4.38 ve Şekil 4.65). Tüm oturma seviyelerinde ortalama kazık paylarında L_k/D_k oranının 15'ten 20'ye geçişi belirgin bir artış meydana getirmişken, 20'den 25'e geçişte artışın çok sınırlı kaldığı belirlenmiştir. Kazık boyu uzadıkça çevre sürtünmesi ve uç direnç kapasitesi artmış; ancak belirli bir uzunluktan sonra oturmaların da artmasıyla radyenin de davranışa katkısının başlamasıyla ve grup etkileşimleri nedeniyle L_k/D_k etkisi sınırlanmıştır. L_k/D_k 'nin katkı derecesinin u_v/L_{er} arttıkça %32,554'ten %7,565'e düşmesi bu davranışı desteklemektedir. Oturma seviyelerinde u_v/L_{er} 'nin %0,05'ten %2'ye artmasıyla s_k değişkeninin katkı derecesinin %60,427'den %88,124'e kadar artmasıyla s_k en etkili değişken olarak belirlenmiştir. Kazık aralığı büyüdükçe kazıkların toplam yük içindeki payı doğrudan azalmıştır. Kazık aralığının $2,5D_k$ 'den $5D_k$ 'ye artması durumunda, u_v/L_{er} oranının %0,05'ten %2'ye çıkmasıyla beraber ortalama kazık payında yaklaşık %13,8'den %25,3'e kadar azalma meydana gelmiştir. Tez çalışmasında s_k artışı aynı anda B_r ve L_r alanını da büyütmüş, böylece kazık paylarında meydana gelen düşüş, daha geniş radyenin zeminden daha fazla yük

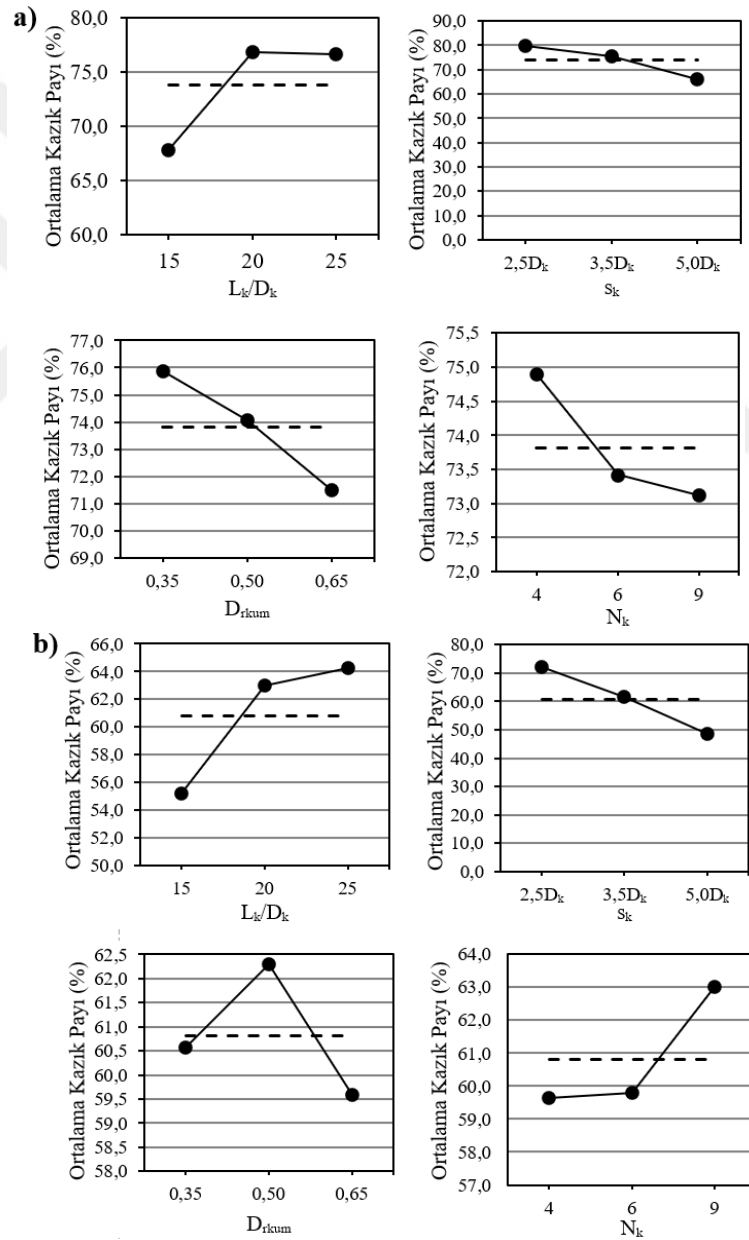
alabilmesiyle de ilgili olmuştur. Geniş kazık aralıklı tasarımlarda kazık payındaki düşüşün çok daha büyük ölçekte olması, bu tasarımlarda radyenin artan oturma ile birlikte çok daha hızlı bir şekilde sistem davranışına etki ettiğini göstermiştir. Bunu yanında literatürde kazık aralığı arttıkça kazık payının azaldığı gösteren çalışmalar da mevcuttur (Omer ve Haroglu, 2021; Yirsaw ve Asha, 2023). Bu nedenle, tez çalışmasındaki tasarımın doğası gereği s_k , yalnız başına kazıklar arası boşluk olarak değil, aynı zamanda radye plan alanını ve dolayısıyla radye-zemin temasını yöneten bir değişken olarak değerlendirilebilir. D_{rkum} etkisi, u_v/L_{er} 'nin %0,05'ten %2'ye artışıyla beraber katkı derecesinin %5,913'ten %0,810'a kadar azalmasıyla diğer değişkenlere kıyasla çok zayıf kalmıştır. D_{rkum} hem radyenin hem de kazıkların rijitlik ve dayanımını değiştirebilir, fakat oran bu iki bileşenin göreceli harekete geçmesine bağlı olarak doğrusal bir şekilde artan veya azalan şekilde olmayabilir. Bu nedenle D_{rkum} 'un sınırlı olan ve ortalama kazık payını önce artıran sonra azaltan etkisi, fiziksel olarak tutarsız değildir. Kazık payı bir oran olduğu için, özellikle u_v/L_{er} 'nin %0,50 ve %2 olduğu durumda artık radye katkısının da devreye girmesiyle beraber beklenen bir davranış olarak görülebilir. Sonuç olarak mutlak taşıma gücü artsa bile kazık payı aynı yönde ve aynı büyüklükte artmamış olabilir. N_k değişkeninin etkisi tüm oturma seviyelerinde oldukça küçük olmasına rağmen artan oturmayla beraber katkı derecesi %1,105'ten %3,501'e doğru artmıştır. Ayrıca N_k 'nin artmasıyla düşük oturma seviyesinde kazık payı azalırken oturma seviyesi arttıkça kazık payında artış meydana gelmiştir. Kazık sayısı artışının kazık yanal alanını ve yük aktarım yüzeyini artırmasına rağmen, mevcut tasarımda yerleşim düzeni ile radye geometrisinin de birlikte değişmesi nedeniyle saf N_k etkisinin kısmen maskelendiğini göstermektedir. Bu nedenle burada ulaşılan sonuç, kazık sayısının önemsiz olduğu değil; mevcut deney planında saf N_k etkisinin geometri değişimine de neden olan değişimlerle beraber zayıflatıldığı şeklinde yorumlanabilir.

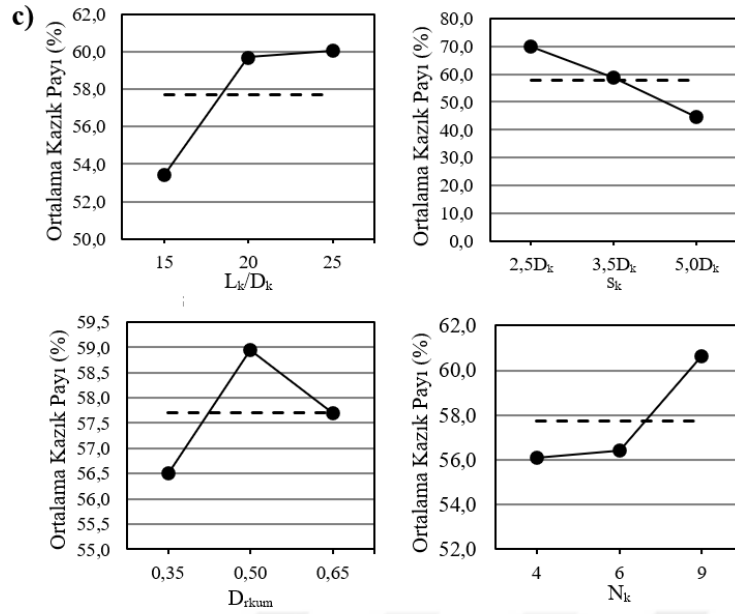


Şekil 4.63. Kazıklı radyelerde kazık payının oturma seviyelerine bağlı olarak değişimi

Çizelge 4.35. Kazıklı radyelerde kazık payı değişiminin istatistiksel analizinde dikkate alınan değişkenler ve kazık payları

Tasarım	L_k/D_k	S_k	D_{rkum}	N_k	$u_v/L_{er} (\%) = 0,05$ Kazık Payı (%)	$u_v/L_{er} (\%) = 0,50$ Kazık Payı (%)	$u_v/L_{er} (\%) = 2,00$ Kazık Payı (%)
T1	15	$2,5D_k$	0,35	4	77,165	64,944	62,756
T2	15	$3,5D_k$	0,50	6	69,197	56,517	54,358
T3	15	$5,0D_k$	0,65	9	57,174	43,996	43,200
T4	20	$2,5D_k$	0,50	9	82,573	77,920	75,957
T5	20	$3,5D_k$	0,65	4	77,136	61,500	59,028
T6	20	$5,0D_k$	0,35	6	70,874	49,611	44,076
T7	25	$2,5D_k$	0,65	6	80,180	73,251	70,846
T8	25	$3,5D_k$	0,35	9	79,598	67,143	62,712
T9	25	$5,0D_k$	0,50	4	70,379	52,433	46,510





Şekil 4.64. Kazıklı radyelerde kazık paylarına etki eden değişkenlerin farklı oturma seviyeleri için ana etki grafikleri: a) u_v/L_{er} (%) = 0,05, b) u_v/L_{er} (%) = 0,50, c) u_v/L_{er} (%) = 2,00

Çizelge 4.36. Kazıklı radyelerde u_v/L_{er} (%) = 0,05 seviyesinde kazık payları için ANOVA sonuçları

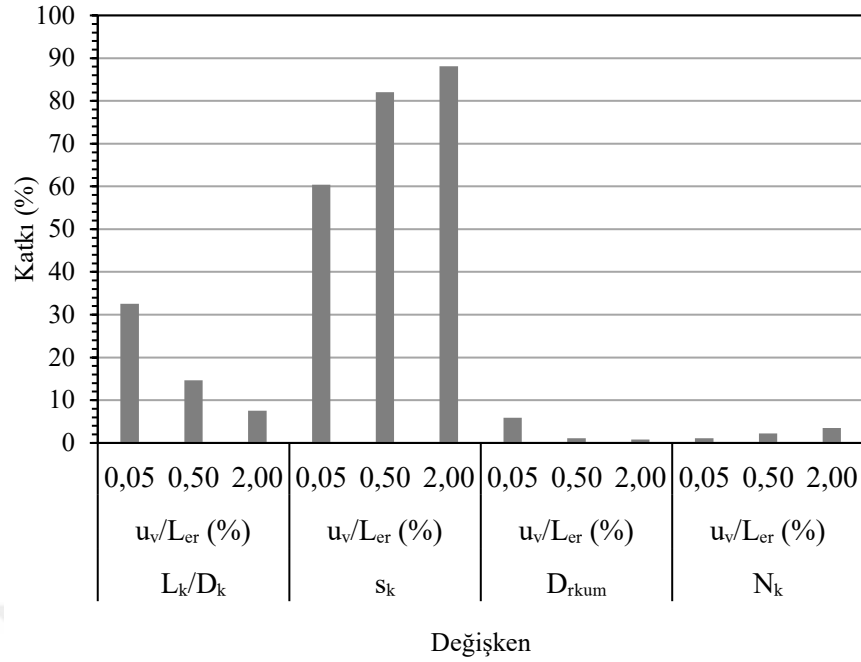
Kaynak	Serbestlik Derecesi	Kareler Toplamı	Katkı (%)	Ortalama Kare
Model	8	491,604		
L_k/D_k	2	160,037	32,554	80,018
S_k	2	297,063	60,427	148,532
D_{rkum}	2	29,071	5,913	14,535
N_k	2	5,433	1,105	2,717

Çizelge 4.37. Kazıklı radyelerde u_v/L_{er} (%) = 0,50 seviyesinde kazık payları için ANOVA sonuçları

Kaynak	Serbestlik Derecesi	Kareler Toplamı	Katkı (%)	Ortalama Kare
Model	8	1001,901		
L_k/D_k	2	146,582	14,630	73,291
S_k	2	822,084	82,052	411,042
D_{rkum}	2	11,272	1,125	5,636
N_k	2	21,963	2,192	10,982

Çizelge 4.38. Kazıklı radyelerde u_v/L_{er} (%) = 2,00 seviyesinde kazık payları için ANOVA sonuçları

Kaynak	Serbestlik Derecesi	Kareler Toplamı	Katkı (%)	Ortalama Kare
Model	8	1090,833		
L_k/D_k	2	82,520	7,565	41,260
S_k	2	961,287	88,124	480,644
D_{rkum}	2	8,836	0,810	4,418
N_k	2	38,190	3,501	19,095

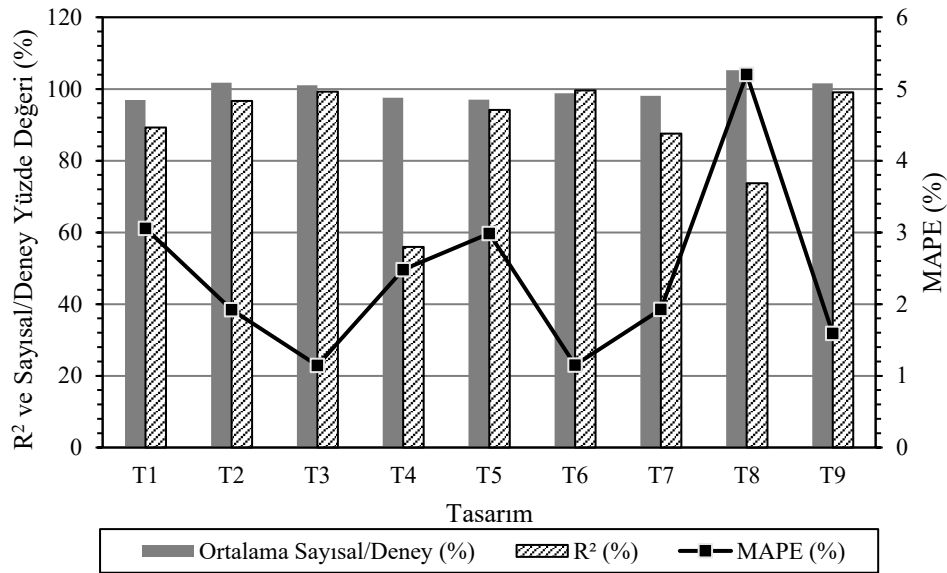


Şekil 4.65. Kazıklı radyelerde oturma seviyelerinin değişimleri ile değişkenlerin kazık paylarının değişimine katkı dereceleri

Sayısal analizlerden ve deneylerden elde edilen kazık payları arasındaki ilişki Çizelge 4.39’da verilen göstergeler tablosu ve Şekil 4.66’daki grafik ile incelenmiştir. Ortalama MAPE %2,38 ve sayısal/deney verilerinin ortalaması %99,77 olmuş; fakat T2, T3, T8 ve T9 tasarımlarında sayısal/deney kazık payları %100’ü geçmiştir (%108,73’e kadar). MAPE’nin oldukça düşük olması sayısal analiz ve deney verilerinin uyumunu gösterirken sayısal/deney verilerinde %100’ü geçme durumları sayısal analiz sonuçlarının deney sonuçlarından daha fazla olabildiğini de ortaya koymuştur. Ortalama R^2 değerinin 0,883 olması ise deney ve sayısal analiz verileri arasındaki ilişkinin tutarlı olduğunu gösterirken, T4 tasarımında 0,559 R^2 değeri ile T8 tasarımındaki 0,737 R^2 değeri kazık payları için sayısal analiz ve deney verilerinin her zaman yüksek tutarlılıkta bir doğrulukta uyumlu olamayabileceğini göstermiştir. Literatür bağlamında bu bulgular beklenmeyen bir sonuç değildir. Lee ve diğ. (2014) kazıklı radyelerde yük paylaşımının oturmayaya bağlı olarak doğrusal olmayan biçimde değiştiğini ve kazık-radye etkileşimlerinin bu davranışın belirlenmesinde temel rol oynadığını belirtmiştir. Bu çerçevede, sayısal model ile deney arasındaki küçük farkların bile özellikle orta ve büyük oturma seviyelerinde kazık payı üzerinde görünür hale gelmesi doğaldır; çünkü burada yalnızca tekil kazık rijitliği değil, radye-zemin-kazık sisteminin birleşik tepki davranışı ile karşılaştırılmaktadır.

Çizelge 4.39. Kazıklı radyelerde deney ve sayısal analizler ile elde edilen kazık paylarının karşılaştırılmasında kullanılan göstergeler

Tasarım	MAPE (%)	En Küçük Sayısal/Deney (%)	En Büyük Sayısal/Deney (%)	Ortalama Sayısal/Deney (%)	R ²
T1	3,06	95,00	97,90	96,94	0,892
T2	1,92	98,89	103,05	101,76	0,966
T3	1,14	98,48	102,68	101,03	0,992
T4	2,48	96,16	98,64	97,52	0,559
T5	2,99	96,24	99,35	97,01	0,941
T6	1,15	95,92	99,44	98,85	0,996
T7	1,93	95,78	99,31	98,07	0,875
T8	5,20	103,99	108,73	105,20	0,737
T9	1,59	99,70	102,89	101,57	0,991
Ortalama	2,38	97,79	101,33	99,77	0,883



Şekil 4.66. Kazıklı radyelerde kazık paylarının sayısal analiz ve deney verilerinin kıyaslanmasında kullanılan göstergelerin tasarımlara göre değişimi

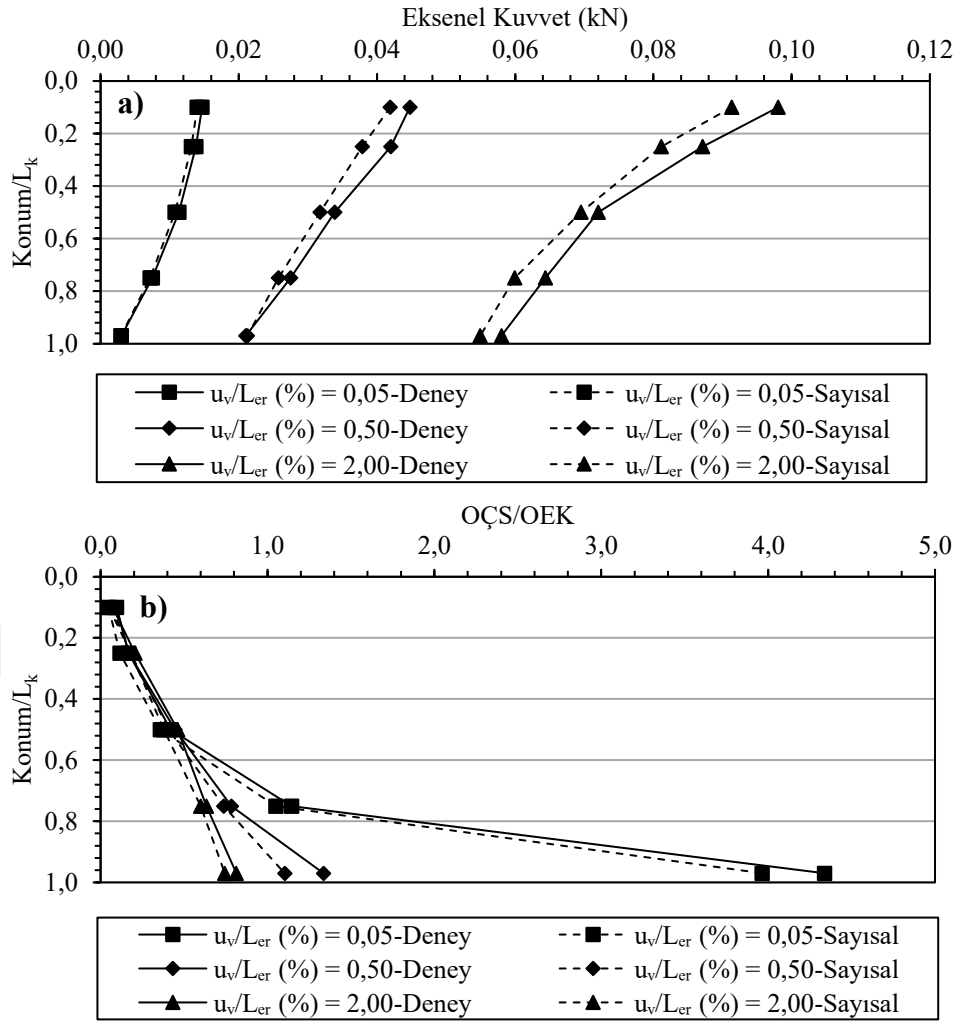
4.8.3. Kazıklarda ortalama eksenel kuvvet ve çevre sürtünmesi

Kazık başlarındaki mini yük hücreleri ve kazık uzunluğu boyunca 5 farklı bölgeye yerleştirilmiş gerinim ölçer pullar yardımıyla kazıklarda meydana gelen eksenel kuvvetler ve çevre sürtünmeleri belirlenmiştir. Her tasarım için eksenel kuvvet-konum/ L_k ve OÇS'nin OEK'ye oranının kazık boyunca değişimi konum/ L_k oranlarıyla grafik olarak çizilmiştir. Farklı oturma seviyelerine göre kazıklarda meydana gelen çevre sürtünmelerinin değişkenler tarafından etkilenme derecesinin Taguchi yöntemiyle

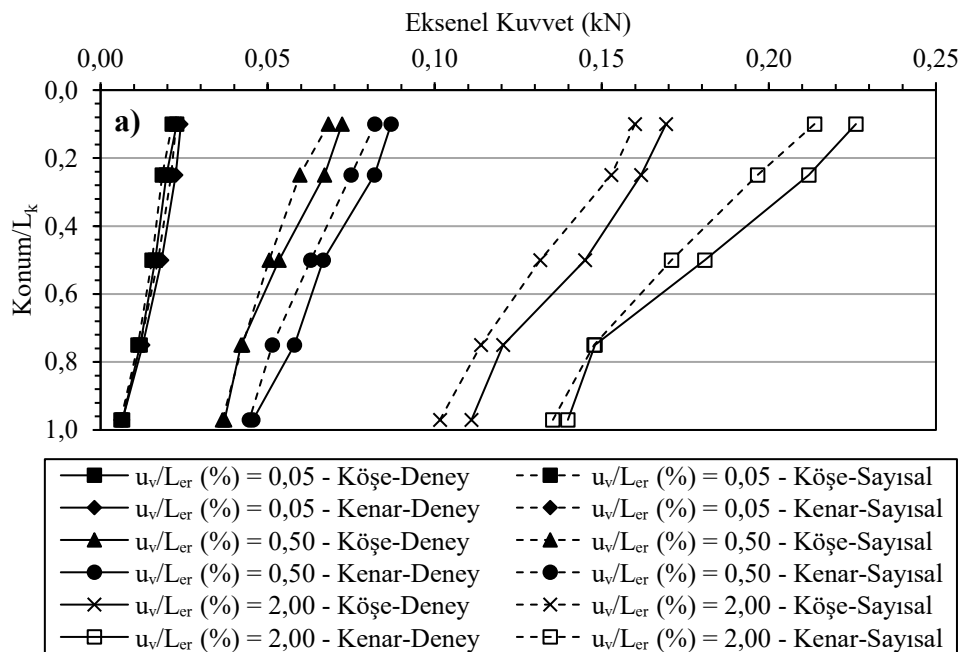
belirlenebilmesi için u_v/L_{er} oranının %0,05, %0,5 ve %2 olduğu durumlarda OÇS/OEK değerleri ile Taguchi analizi yapılmıştır.

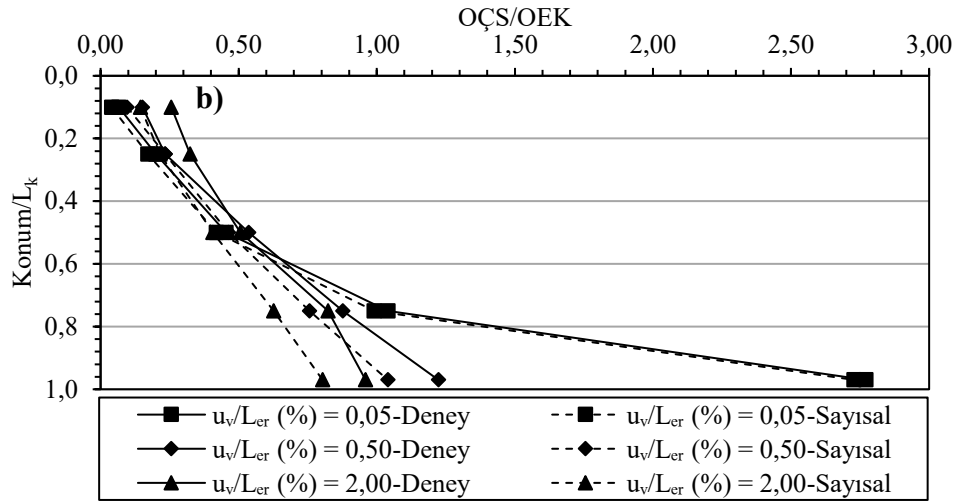
Kazıklı radye sistemlerinde deney ve sayısal analizler sonucunda elde edilen kazık boyunca ortalama eksenel yük değişimi ve buna bağlı olarak OÇS/OEK'nin kazık boyunca değişimi Şekil 4.67-4.75 arasında verilmiştir. Genel olarak OEK'ler tüm tasarımlarda oturmanın artmasıyla beraber artarken, OÇS/OEK oranları oturma artarken azalmıştır. Böylece çevre sürtünmelerinin düşük oturma seviyelerinde harekete geçmiş olduğu ve uç direncinin sürekli harekete geçme durumunda olduğu söylenebilir. Oturma seviyeleri (u_v/L_{er} oranı) %0,05 ve %0,5 olduğunda en yüksek OÇS/OEK T8 tasarımında sırasıyla 6,236 ve 1,630 olarak elde edilmiştir. Ancak, u_v/L_{er} oranı %2 olduğunda en yüksek OÇS/OEK oranı T7 tasarımında 1,273 olmuştur. Oturma seviyeleri arttıkça en küçük OÇS/OEK oranı T3 tasarımında 1,767, 0,911 ve 0,701 olarak belirlenmiştir. Her tasarım için üç oturma seviyesinde OÇS/OEK oranlarını da içeren Taguchi tablosu oluşturulmuş ve istatistiksel analiz yapılmıştır (Çizelge 4.40). Deney verisi olarak elde edilen OÇS/OEK oranlarının ortalamaları ile değişkenlerin oturma seviyelerindeki OÇS/OEK oranına etkisi incelenmiş (Şekil 4.76) ve değişkenlerin OÇS/OEK oranlarının değişimini etkileme oranları ANOVA ile hesaplanan katkı dereceleri kullanılarak değerlendirilmiştir (Çizelge 4.41, Çizelge 4.42, Çizelge 4.43 ve Şekil 4.77). L_k/D_k , üç oturma seviyesinin tamamında en istikrarlı ve u_v/L_{er} oranı %0,05'ten ve %2'ye artarken katkı derecesinin %51,03'ten %32,852'ye azalmasıyla çoğu durumda en etkili değişken olarak ortaya çıkmıştır. Ayrıca L_k/D_k 'nin 15'ten 25'e çıkması durumlarında, u_v/L_{er} 'nin %0,05'ten %2'ye artmasıyla ortalama OÇS/OEK oranı sırasıyla yaklaşık olarak %73,4, %26,2 ve %29,1 oranında artırmıştır. Granüler zeminlerde kazıklı radye davranışı üzerinde kazık uzunluğu etkisinin bazı durumlarda rölatif sıkılıktan daha etkili olabildiği bilinmektedir (Ateş ve Şadoğlu, 2022). Dolayısıyla kazık boyu, çevre sürtünmesi ile kazık ucuna iletilen eksenel kuvvet arasındaki dengeyi belirleyen temel tasarım değişkenlerindendir. L_k/D_k artışıyla çevre sürtünmesi doğrudan arttığından, OÇS/OEK oranının da artmıştır. Özellikle düşük oturma seviyesinde, kazıkların sistemin davranışında daha etkili olması ve çevre sürtünmesinin de hızlı bir şekilde harekete geçmeye devam etmesi, uzun kazıkların çevre sürtünmesini daha erken ve daha yüksek oranda harekete geçirmesine, bu durum da OÇS/OEK oranındaki artışın bu seviyede en belirgin olmasına neden olmaktadır. OÇS/OEK oranı üzerinde s_k 'nin diğer değişkenlere kıyasla daha düşük bir etkiye sahip olduğu gözlenmiştir. Ayrıca, kazık aralığının OÇS/OEK üzerindeki etkisinin doğrusal olmayan bir davranış sergilediği belirlenmiştir.

u_v/L_{er} %0,05 seviyesinde s_k 'nin $3,5D_k$ olması en yüksek OÇS/OEK değerini verirken, s_k 'nin $5D_k$ ve $2,5D_k$ olması durumlarında OÇS/OEK değerleri birbirine yakın olmuştur. Ancak u_v/L_{er} %0,50 ve %2,00 seviyelerinde, s_k arttıkça OÇS/OEK oranının genel olarak azaldığı görülmüştür. $2,5D_k$ durumunda kazık-kazık etkileşimi güçlü olmuş ve kazıklar arası zemin sıkışması çevre sürtünmesini etkilemiştir. $5D_k$ durumunda ise kazıklar arası etkileşim azalmakla birlikte, radye-zemin temas alanının büyümesi nedeniyle radye yoluyla zemine aktarılan yükün artması, kazıklara düşen yük payını azaltmakta ve dolaylı olarak OÇS/OEK oranını etkileyebilmektedir. Ayrıca s_k etkisi tek yönlü olmayıp aynı zamanda B_r ve L_r ile radye temas alanını da değiştirmiştir. D_{rkum} 'un OÇS/OEK oranı üzerindeki etkisi, özellikle küçük oturma seviyesinde son derece belirgin ve beklenmedik bir davranış sergilemiştir. Bu durum çevre sürtünmesinin ve uç direncinin harekete geçme hızlarındaki farklılıkla ilgili olmuştur. Sıkı kumlarda, kazık ucu direnci gevşek kumlara kıyasla daha düşük oturma seviyelerinde harekete geçmeye başlamaktadır; çünkü sıkı kumun daha yüksek rijitliği, düşük oturma seviyelerinde bile uç direncinin önemli bir bölümünün oluşmasına olanak tanımaktadır. Bu durum, D_{rkum} 'daki artışla beraber paydadaki OEK'nin (uç direnci dahil) görece hızlı artmasına ve dolayısıyla OÇS/OEK oranının düşmesine neden olmuştur. u_v/L_{er} oranının %0,05'ten %0,5 ve %2,00 seviyelerine çıkmasıyla D_{rkum} katkı derecesi sırasıyla %40,771, 15,108 ve 11,347 olmuş ve etkisi belirgin biçimde azalmıştır. Bu durum, orta ve büyük oturma seviyelerinde hem çevre sürtünmesinin hem de uç direncinin büyük ölçüde harekete geçmesiyle, D_{rkum} değerinin OÇS/OEK oranı üzerindeki etkisinin zayıflamasıyla ilgilidir. N_k etkisi oturma seviyesi artarken sırasıyla %6,777, %2,786 ve %29,914 katkı dereceleriyle orta düzeyde kalmıştır. OÇS/OEK oranı üzerindeki etkisi incelendiğinde az sayıda kazığın bulunduğu tasarımlarda her bir kazığın görece daha büyük bir etki alanına sahip olması ve kazık-kazık etkileşiminin en az seviyede olması nedeniyle çevre sürtünmesinin daha etkin bir şekilde harekete geçtiği söylenebilir. Daha fazla kazık bulunduğu, kazıklar arası etkileşim nedeniyle her bir kazığın çevre sürtünme kapasitesi azalabilmektedir. Ancak u_v/L_{er} %2,00 seviyesinde farklı bir durum ortaya çıkmıştır. N_k 6 iken en yüksek OÇS/OEK değeri, N_k 4 olduğunda en düşük değeri OÇS/OEK elde edilmiştir. Bu durum, 6 kazıklı yerleşim düzeninin büyük oturma seviyelerinde çevre sürtünmesinin korunmasında daha elverişli bir geometri oluşturduğuna işaret edebilir. Ayrıca bu sonuç; 4 kazıklı sistemlerde uçtaki artık eksenel yükün daha baskın kaldığını, 9 kazıklı sistemlerde ise grup içi yeniden dağılımın ortalama oranı yeniden düşürebildiğini gösterebilir.

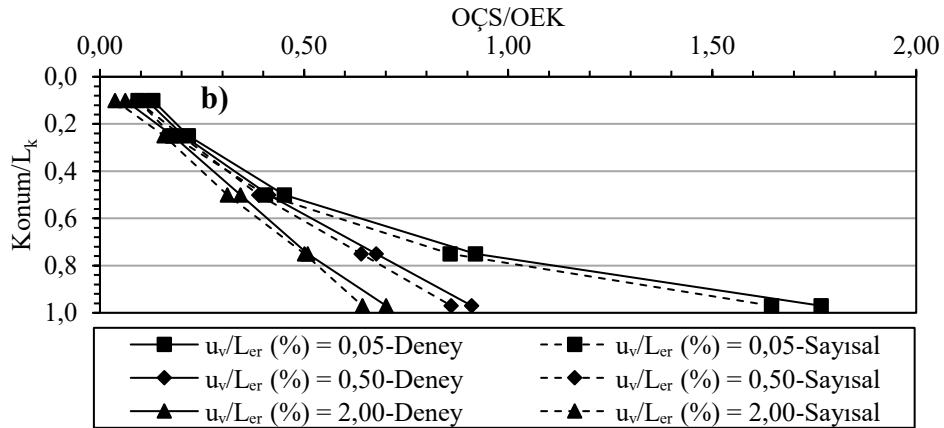
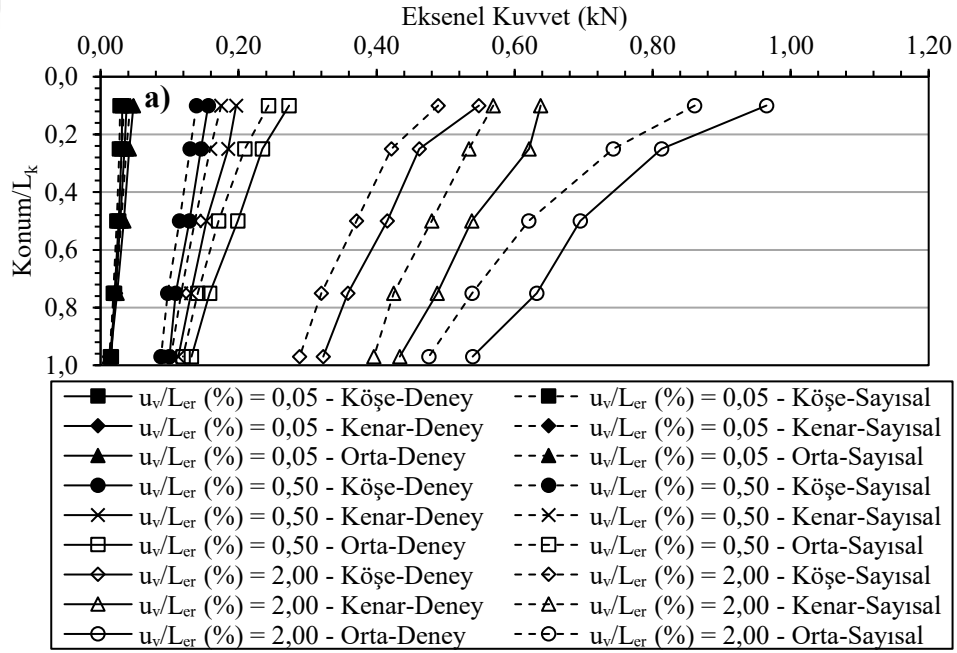


Şekil 4.67. T1 tasarımı için deney ve sayısal analizler ile elde edilen: a) Eksenal kuvvetin kazık boyunca değişimi, b) OCS/OEK oranının kazık boyunca değişimi

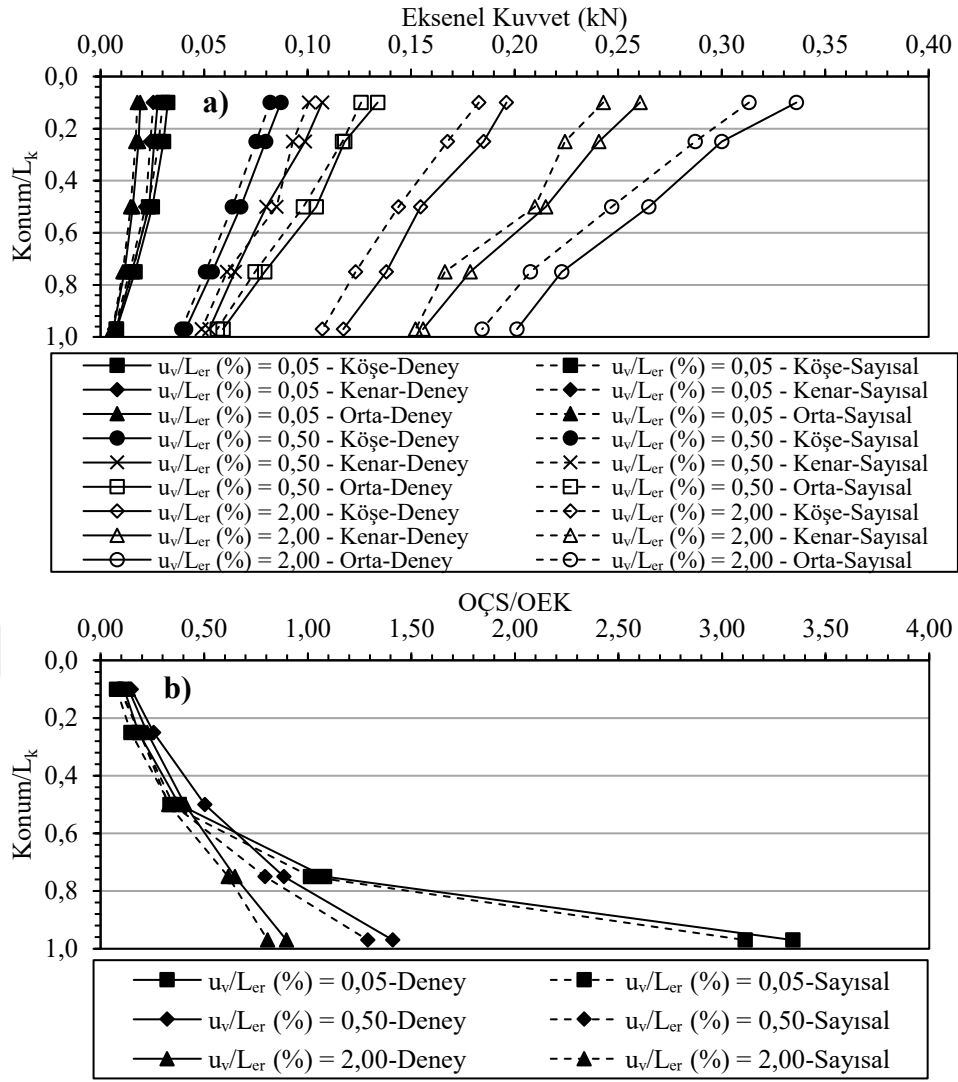




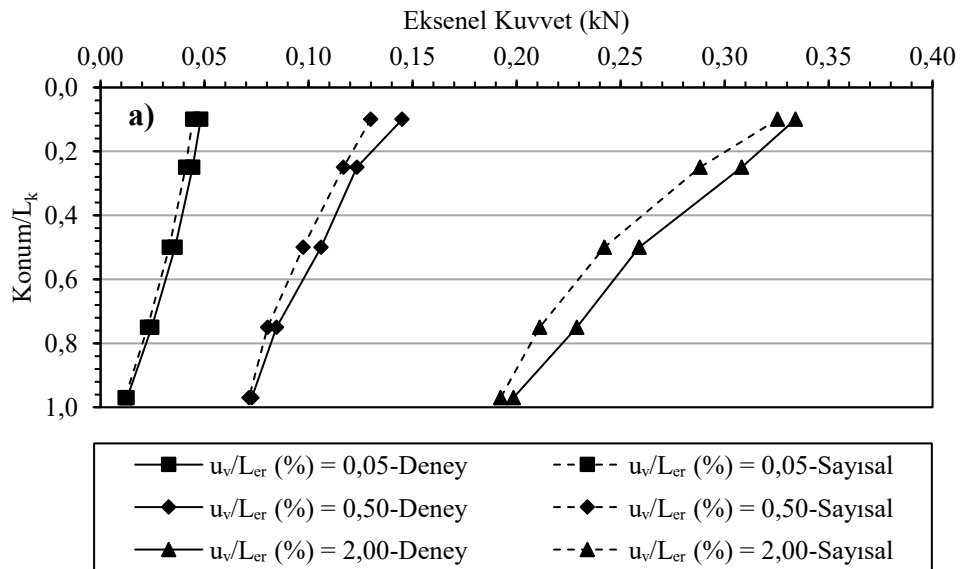
Şekil 4.68. T2 tasarımı için deney ve sayısal analizler ile elde edilen: a) Eksenel kuvvetin kazık boyunca değişimi, b) OCS/OEK oranının kazık boyunca değişimi

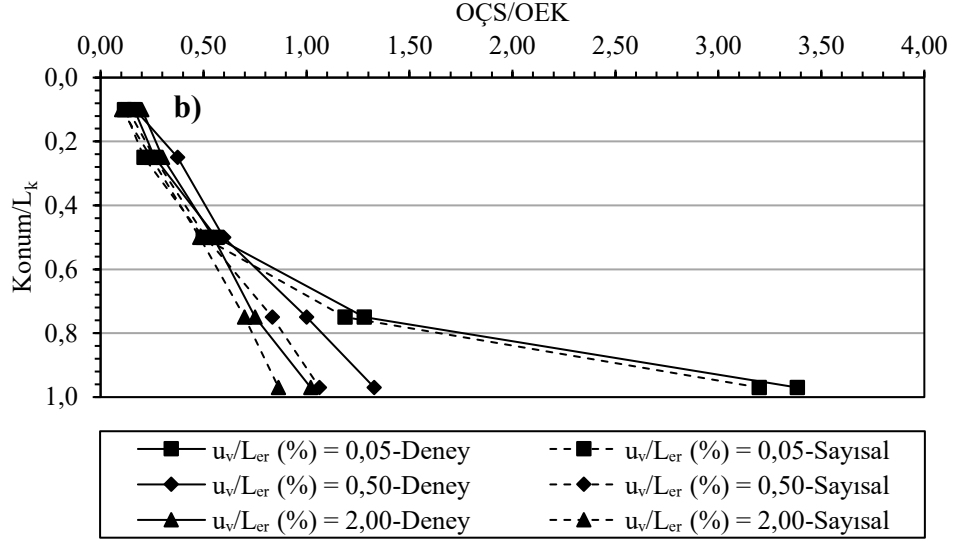


Şekil 4.69. T3 tasarımı için deney ve sayısal analizler ile elde edilen: a) Eksenel kuvvetin kazık boyunca değişimi, b) OCS/OEK oranının kazık boyunca değişimi

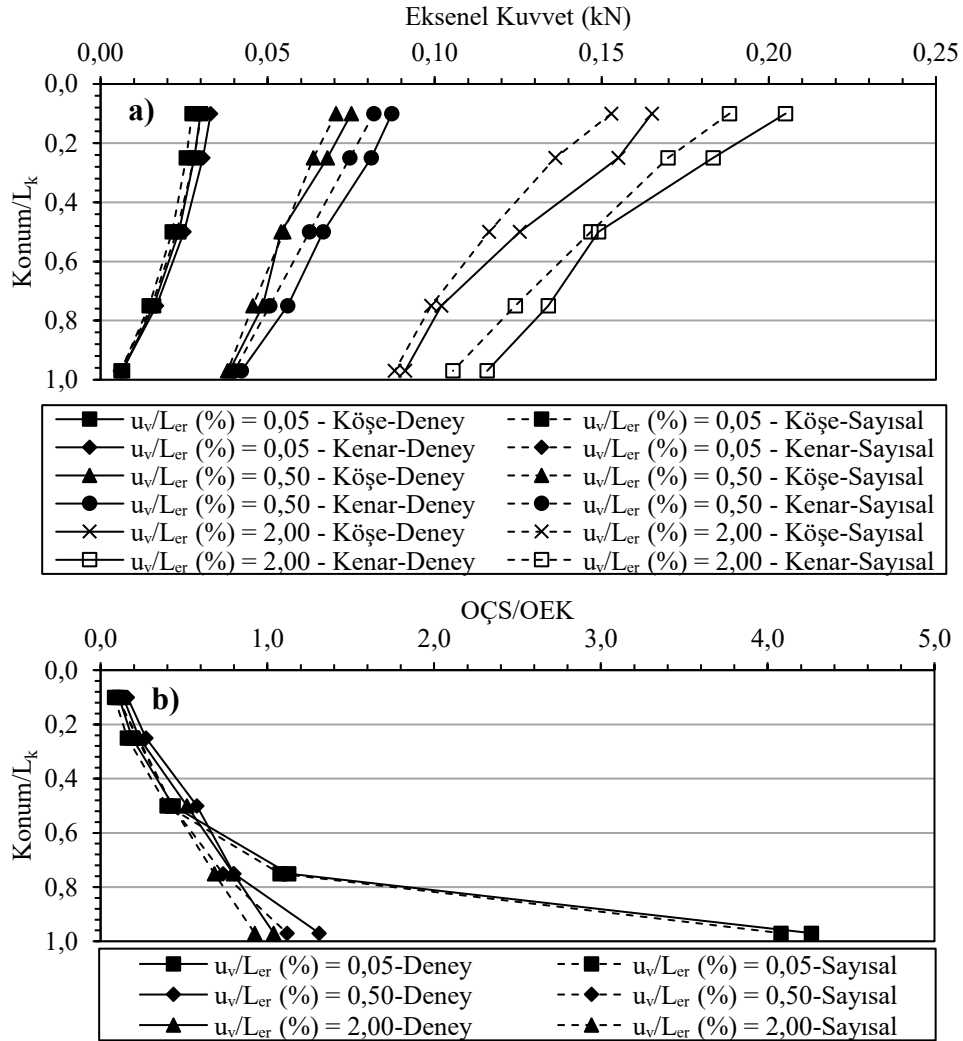


Şekil 4.70. T4 tasarımı için deney ve sayısal analizler ile elde edilen: a) Eksenal kuvvetin kazık boyunca değişimi, b) OCS/OEK oranının kazık boyunca değişimi

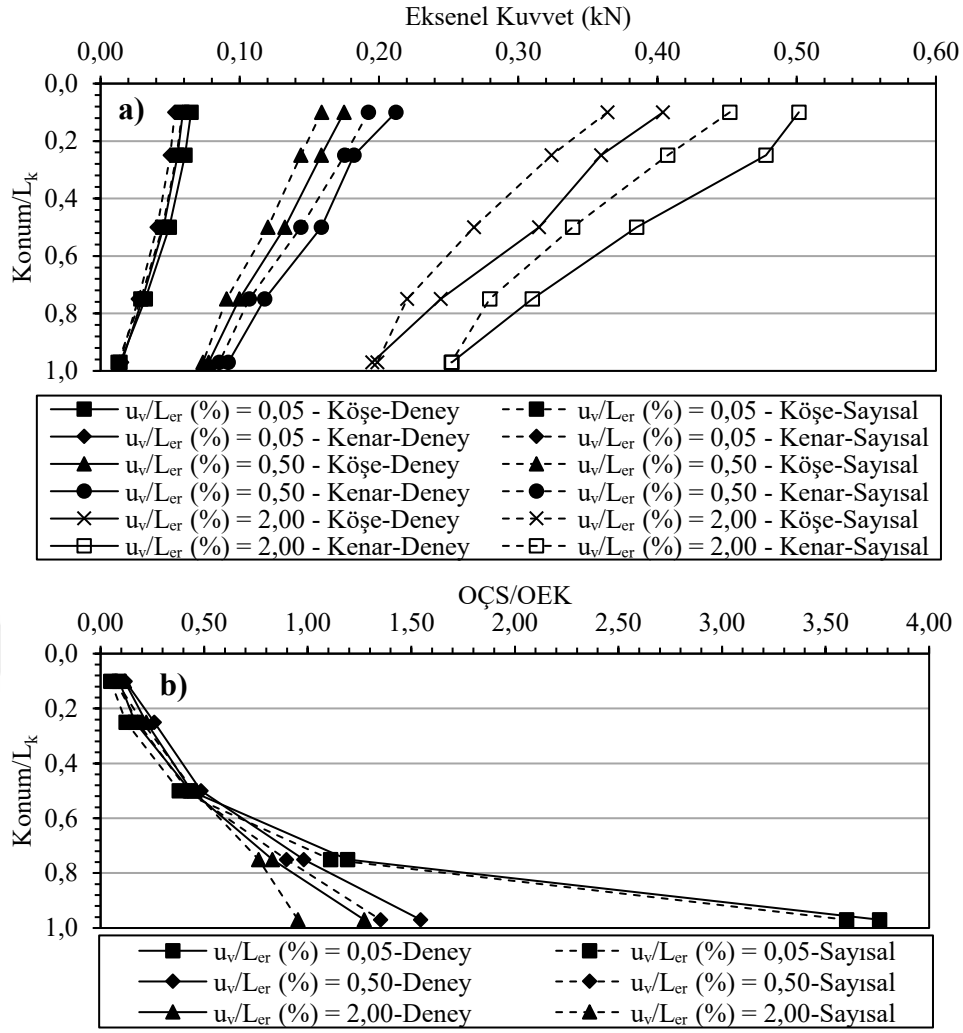




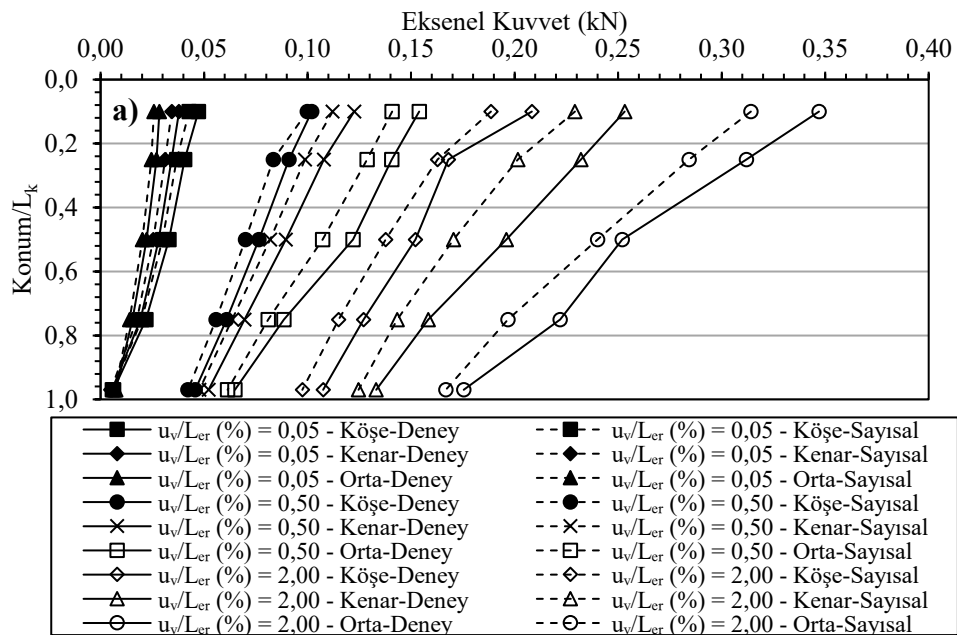
Şekil 4.71. T5 tasarımı için deney ve sayısal analizler ile elde edilen: a) Eksenel kuvvetin kazık boyunca değişimi, b) OCS/OEK oranının kazık boyunca değişimi

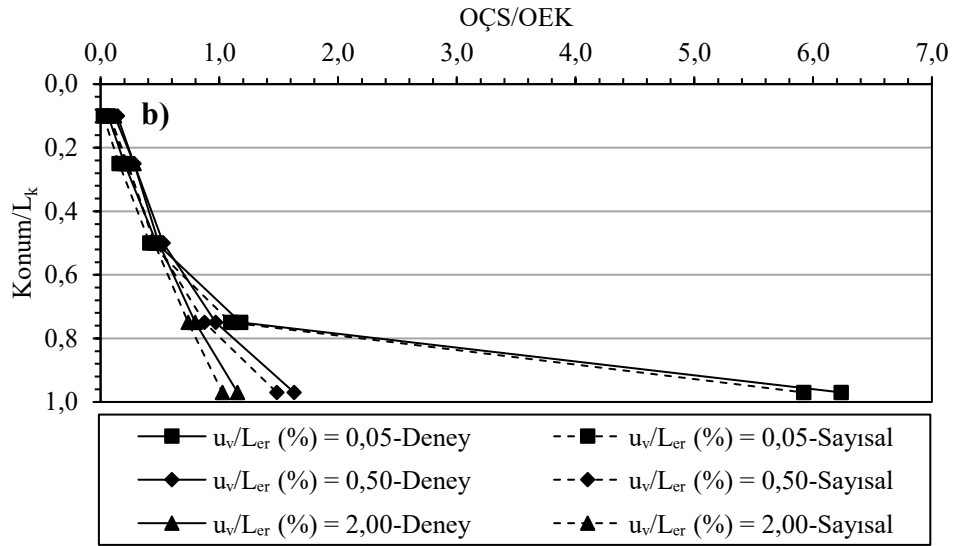


Şekil 4.72. T6 tasarımı için deney ve sayısal analizler ile elde edilen: a) Eksenel kuvvetin kazık boyunca değişimi, b) OCS/OEK oranının kazık boyunca değişimi

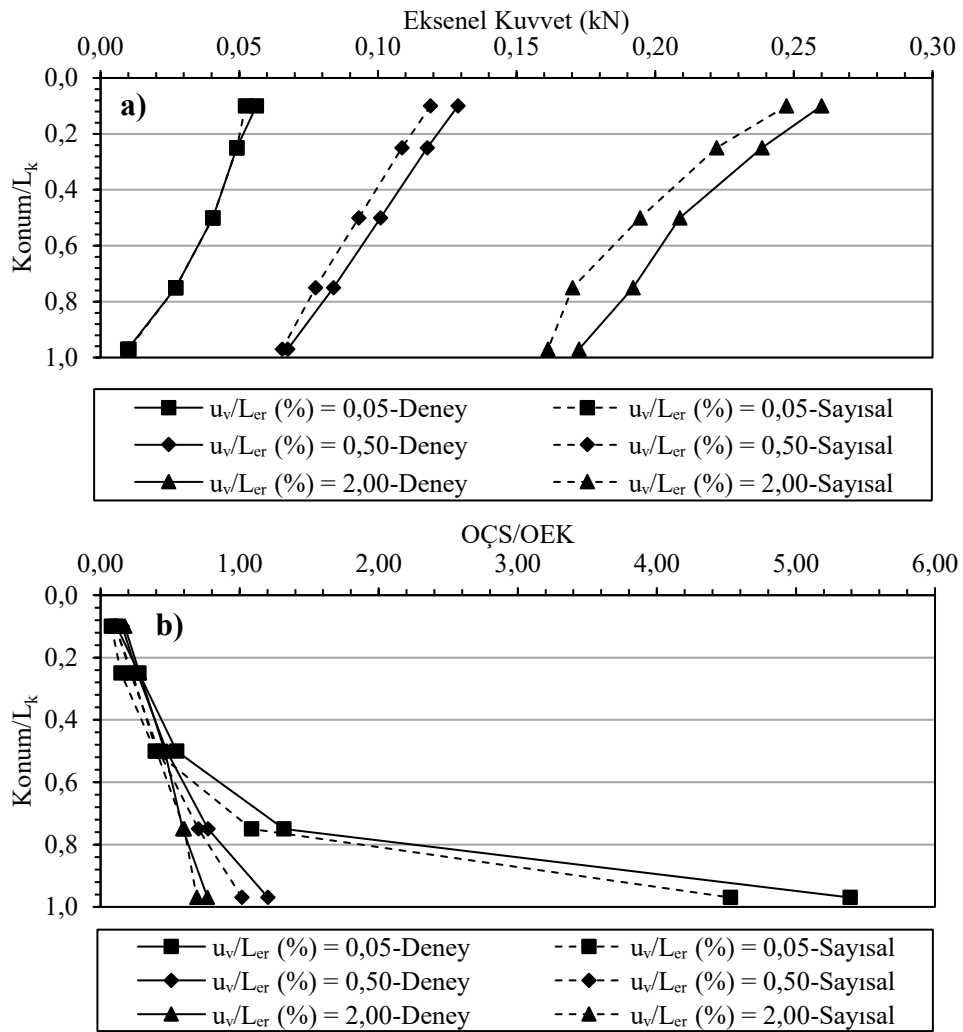


Şekil 4.73. T7 tasarımı için deney ve sayısal analizler ile elde edilen: a) Eksenal kuvvetin kazık boyunca değişimi, b) OCS/OEK oranının kazık boyunca değişimi





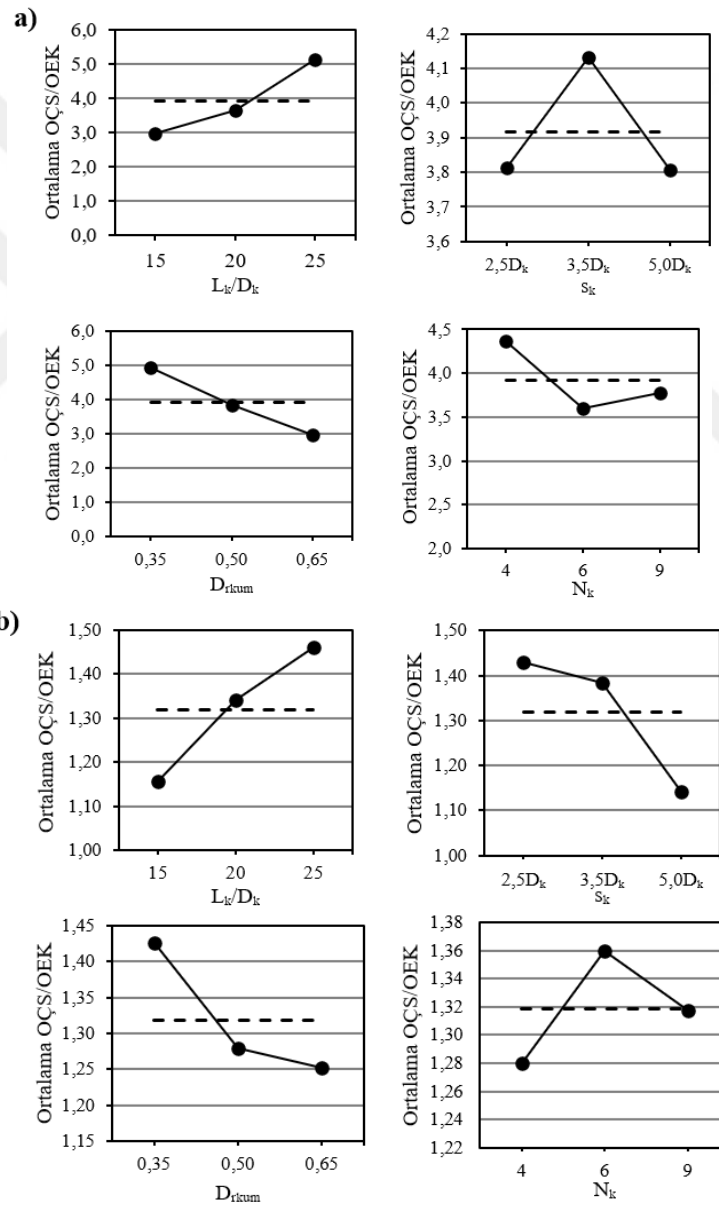
Şekil 4.74. T8 tasarımı için deney ve sayısal analizler ile elde edilen: a) Eksenel kuvvetin kazık boyunca değişimi, b) OCS/OEK oranının kazık boyunca değişimi

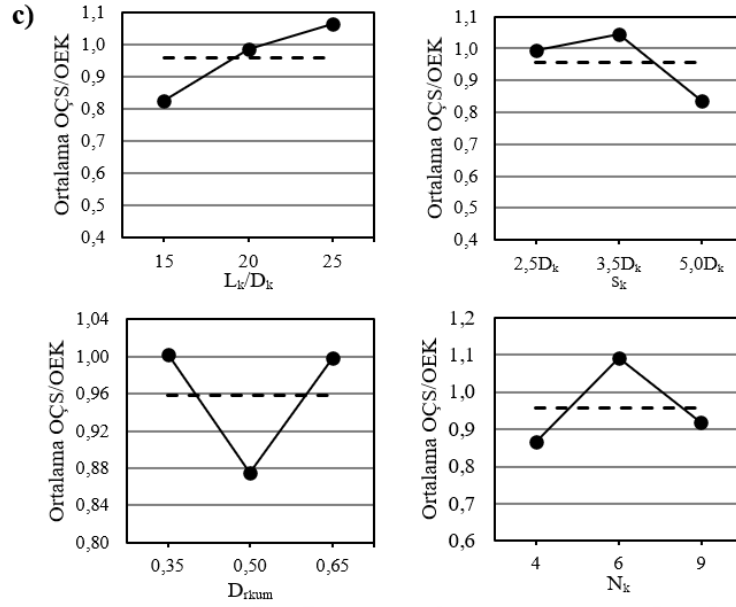


Şekil 4.75. T9 tasarımı için deney ve sayısal analizler ile elde edilen: a) Eksenel kuvvetin kazık boyunca değişimi, b) OCS/OEK oranının kazık boyunca değişimi

Çizelge 4.40. Kazıklı radyelerde OÇS/OEK oranı değişiminin istatistiksel analizinde dikkate alınan değişkenler ve OÇS/OEK oranları

Tasarım	L_k/D_k	S_k	D_{rkum}	N_k	$u_v/L_{er}(\%) = 0,05$ OÇS/OEK	$u_v/L_{er}(\%) = 0,50$ OÇS/OEK	$u_v/L_{er}(\%) = 2,00$ OÇS/OEK
T1	15	$2,5D_k$	0,35	4	4,338	1,336	0,813
T2	15	$3,5D_k$	0,50	6	2,771	1,223	0,959
T3	15	$5,0D_k$	0,65	9	1,767	0,911	0,701
T4	20	$2,5D_k$	0,50	9	3,342	1,411	0,897
T5	20	$3,5D_k$	0,65	4	3,384	1,299	1,020
T6	20	$5,0D_k$	0,35	6	4,263	1,311	1,038
T7	25	$2,5D_k$	0,65	6	3,762	1,545	1,273
T8	25	$3,5D_k$	0,35	9	6,236	1,630	1,154
T9	25	$5,0D_k$	0,50	4	5,391	1,204	0,769





Şekil 4.76. Kazıklı radyelerde OCS/OEK oranına etki eden değişkenlerin farklı oturma seviyeleri için ana etki grafikleri: a) $u_v/L_{er} (%) = 0,05$, b) $u_v/L_{er} (%) = 0,50$, c) $u_v/L_{er} (%) = 2,00$

Çizelge 4.41. Kazıklı radyelerde $u_v/L_{er} (%) = 0,05$ seviyesinde OCS/OEK için ANOVA sonuçları

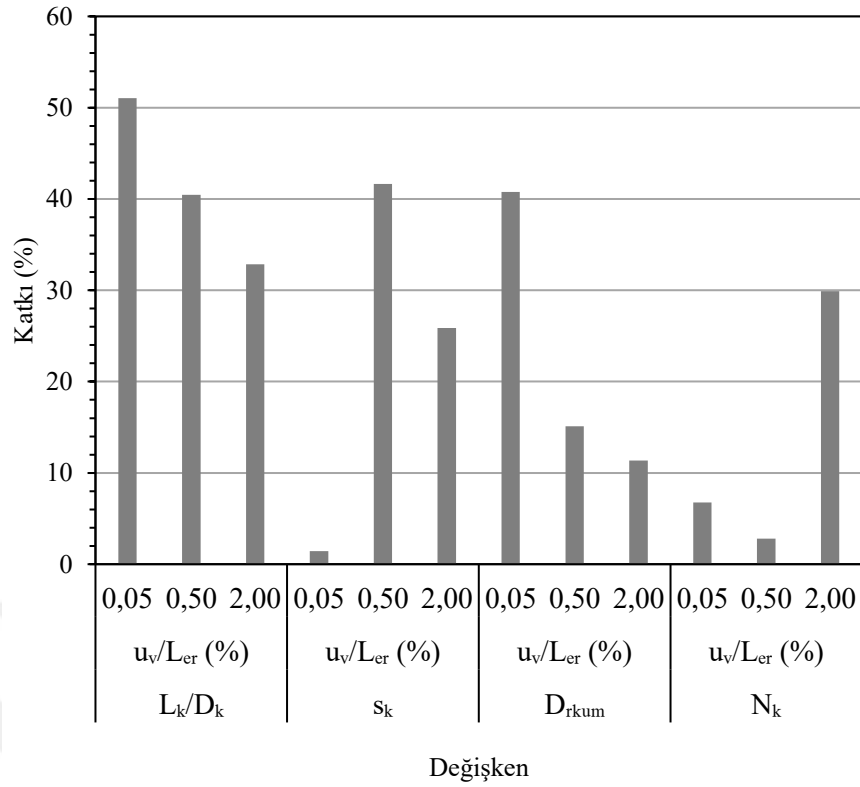
Kaynak	Serbestlik Derecesi	Kareler Toplamı	Katkı (%)	Ortalama Kare
Model	8	14,423		
L_k/D_k	2	7,360	51,030	3,680
S_k	2	0,205	1,422	0,103
D_{rkum}	2	5,880	40,771	2,940
N_k	2	0,978	6,777	0,489

Çizelge 4.42. Kazıklı radyelerde $u_v/L_{er} (%) = 0,50$ seviyesinde OCS/OEK için ANOVA sonuçları

Kaynak	Serbestlik Derecesi	Kareler Toplamı	Katkı (%)	Ortalama Kare
Model	8	0,346		
L_k/D_k	2	0,140	40,455	0,070
S_k	2	0,144	41,650	0,072
D_{rkum}	2	0,052	15,108	0,026
N_k	2	0,010	2,786	0,005

Çizelge 4.43. Kazıklı radyelerde $u_v/L_{er} (%) = 2,00$ seviyesinde OCS/OEK için ANOVA sonuçları

Kaynak	Serbestlik Derecesi	Kareler Toplamı	Katkı (%)	Ortalama Kare
Model	8	0,274		
L_k/D_k	2	0,090	32,852	0,045
S_k	2	0,071	25,887	0,035
D_{rkum}	2	0,031	11,347	0,016
N_k	2	0,082	29,914	0,041

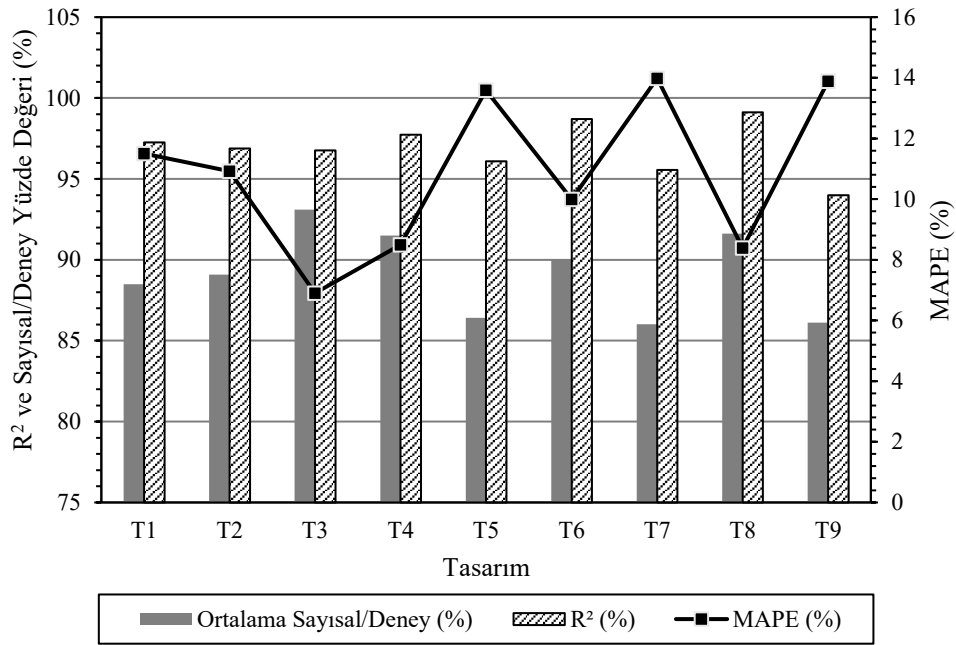


Şekil 4.77. Kazıklı radyelerde oturma seviyelerinin değişimleri ile değişkenlerin OÇS/OEK değişimine katkı dereceleri

Sayısal analizlerden ve deneylerden elde edilen OÇS/OEK arasındaki ilişki Çizelge 4.44 ve Şekil 4.78 ile incelenmiştir. Ortalama MAPE %10,85 ve sayısal/deney verilerinin ortalaması %89,15 olmuş; tüm tasarımlarda sayısal analiz OÇS/OEK oranlarının deneye göre daha düşük olduğu görülmüştür (%74,89'a kadar azalabilen). MAPE'nin %10,85 olması deney ve sayısal analiz verileri arasında önemli bir sapmanın olabileceğini ortaya koymuştur. Ortalama R^2 değerinin 0,969 olması ise deney ve sayısal analiz verileri arasındaki ilişkinin tutarlı olabileceğini; fakat yüksek MAPE değeri bu konuda temkinli davranılması gerektiğini göstermiştir. Bu durumda, uzun kazıklarda uzunluk boyunca gelişen gerilme yeniden dağılımı ve arayüz davranışı model belirsizliğine etki etmiş olabilir. Buna göre sayısal analizlerin sistematik olarak düşük OÇS/OEK tahmininde bulunmasının olası nedenlerinden biri, kazık-zemin arayüzünün ve uzunluk çevresindeki yerel gerilme durumunun tam temsil edilememesidir.

Çizelge 4.44. Kazıklı radyelerde deney ve sayısal analizler ile elde edilen OÇS/OEK oranlarının karşılaştırılmasında kullanılan göstergeler

Tasarım	MAPE (%)	En Küçük Sayısal/Deney (%)	En Büyük Sayısal/Deney (%)	Ortalama Sayısal/Deney (%)	R ²
T1	11,50	82,60	91,52	88,50	0,973
T2	10,92	83,75	98,46	89,08	0,969
T3	6,90	91,68	94,50	93,10	0,968
T4	8,50	89,91	93,13	91,50	0,977
T5	13,59	79,99	94,53	86,41	0,961
T6	9,99	85,35	95,72	90,01	0,987
T7	13,98	74,89	95,74	86,02	0,956
T8	8,39	88,88	94,92	91,61	0,991
T9	13,88	84,04	89,85	86,12	0,940
Ortalama	10,85	84,56	94,26	89,15	0,969



Şekil 4.78. Kazıklı radyelerde OÇS/OEK oranlarının sayısal analiz ve deney verilerinin kıyaslanmasında kullanılan göstergelerin tasarımlara göre değişimi

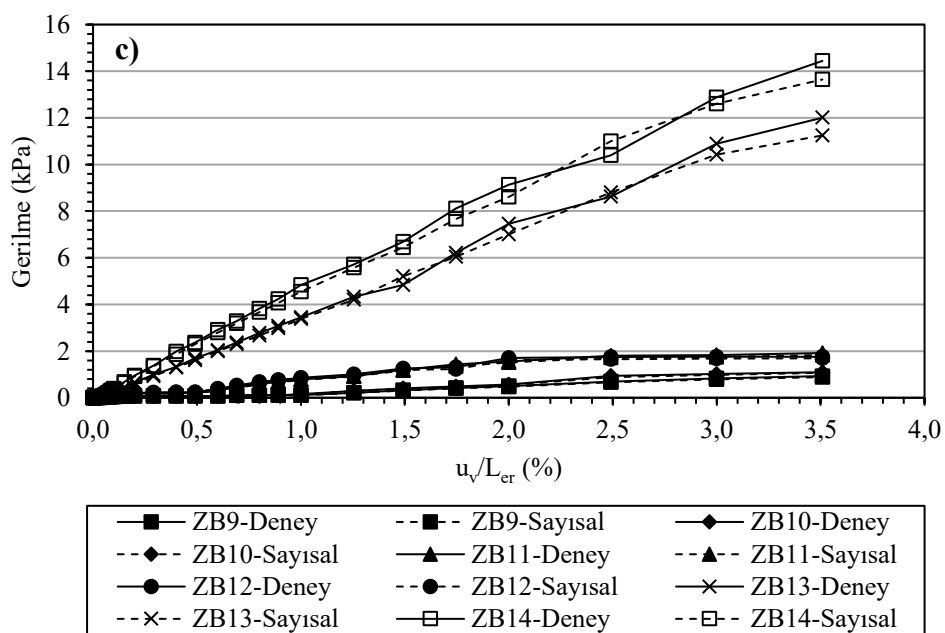
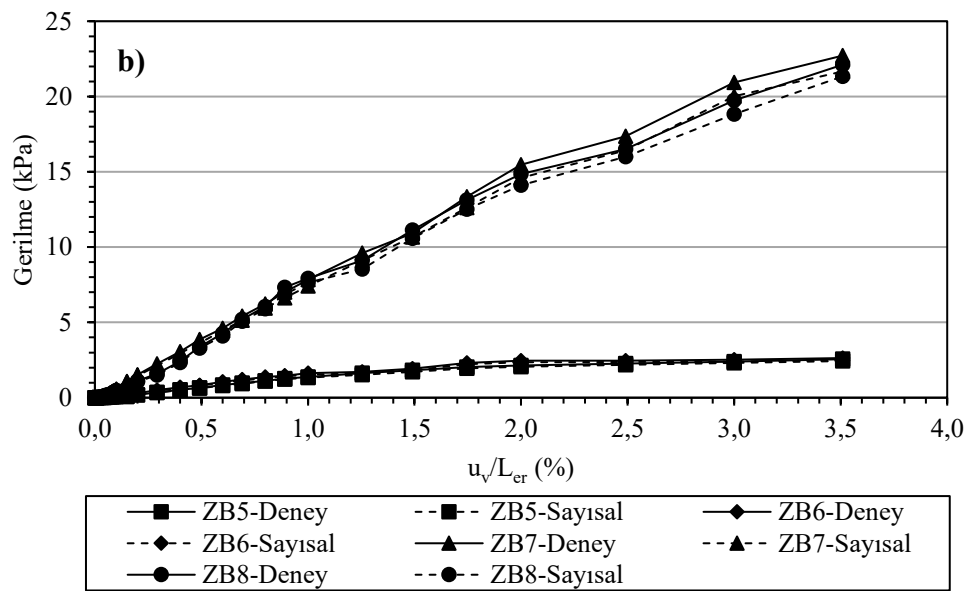
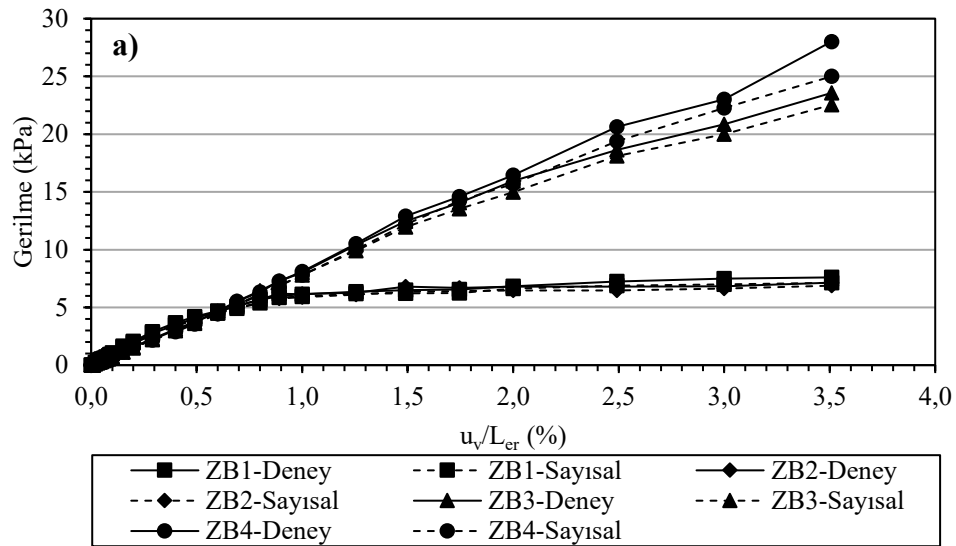
4.8.4. Zeminde meydana gelen gerilmeler

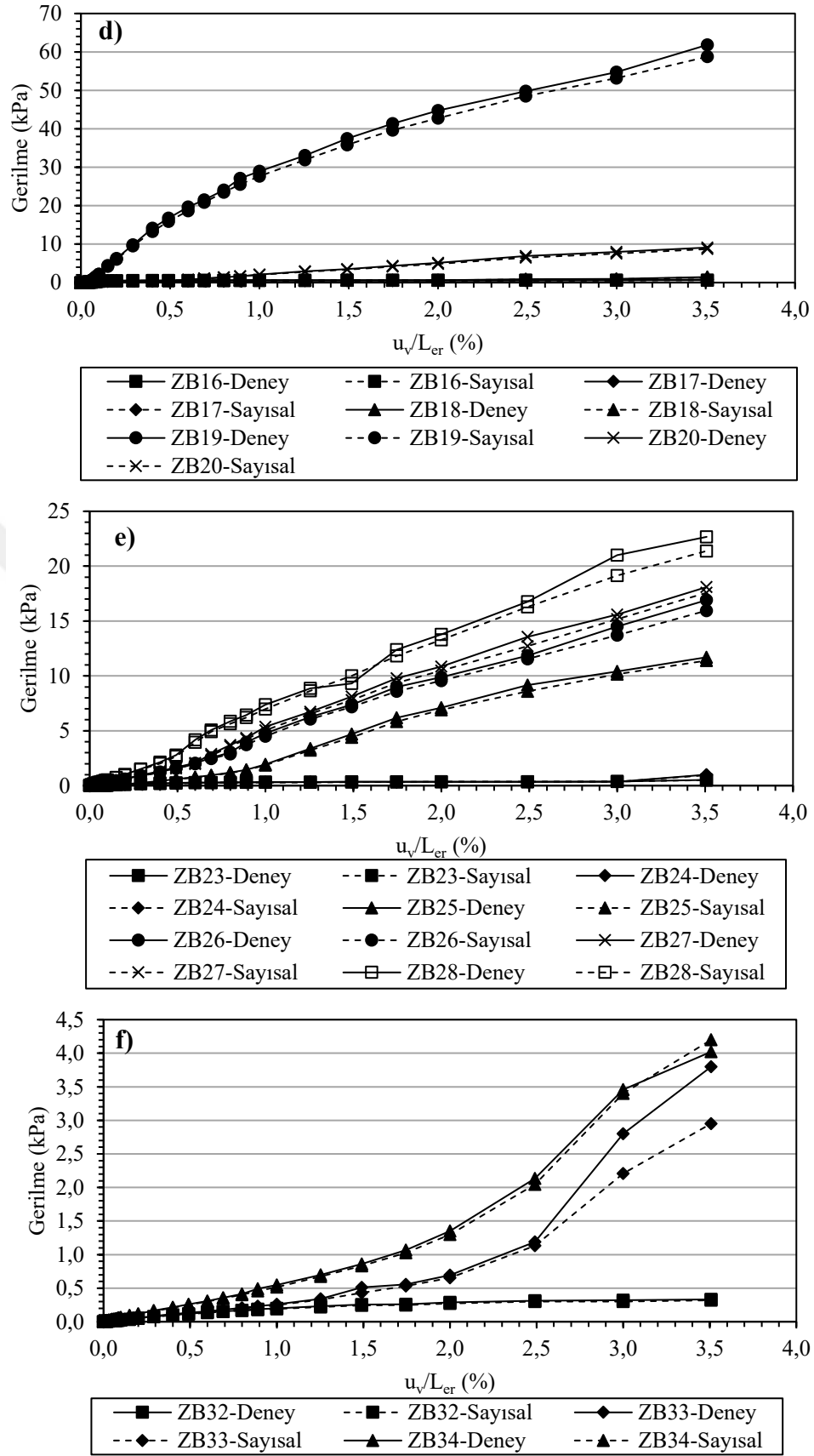
Zemine yerleştirilmiş tüm zemin basınç ölçer sensörlerin Taguchi L9 tasarımında analizi uygulanabilir olmayacağından ZB4, ZB19 ve ZB28 sensörlerinin kaydettiği düşey gerilmeler Taguchi tasarımına göre analizde kullanılmak üzere seçilmiştir. Farklı oturma seviyelerine göre kazıklı radyeler için ZB4, ZB19 ve ZB28 gerilmelerinin değişkenler tarafından etkilenme derecesinin Taguchi yöntemiyle belirlenebilmesi amacıyla u_v/L_{er}

oranının %0,05, %0,5 ve %2 olduğu durumlarda gerilmeler ile Taguchi analizi yapılmıştır.

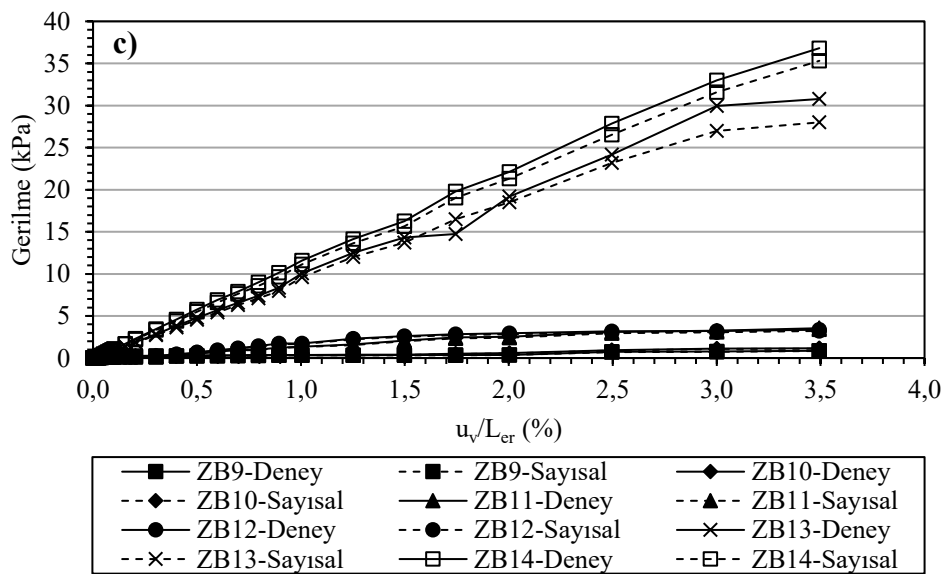
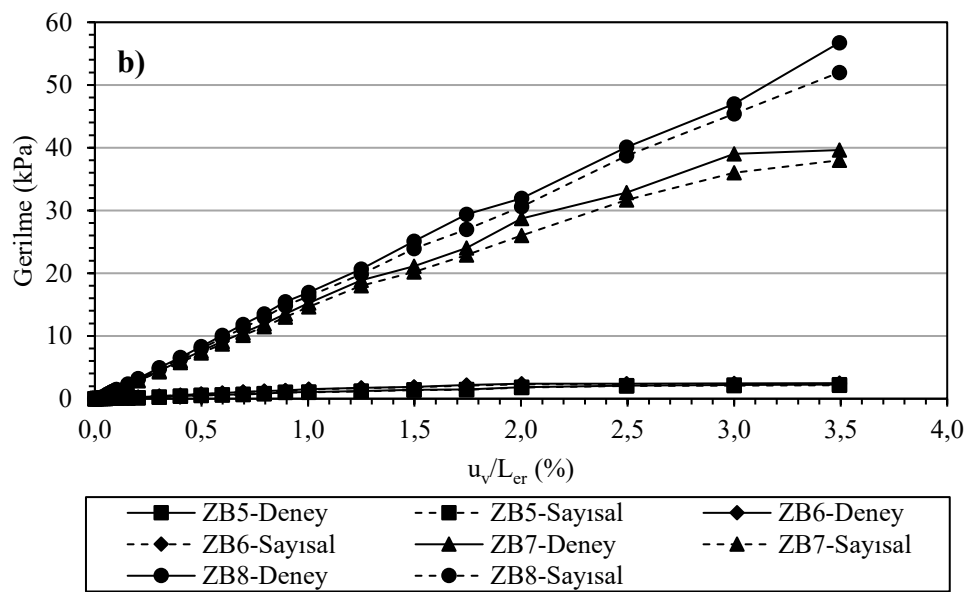
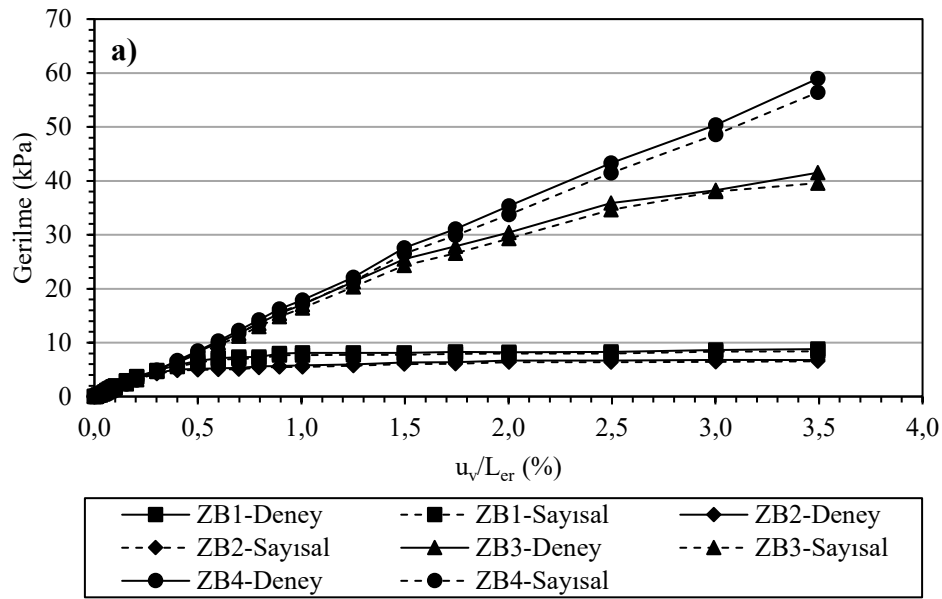
Tüm ZB'ler için deneylerden ve sayısal analizlerden elde edilen gerilmeler ve Şekil 4.79-4.87'de verilmiştir. Genel olarak kazıklı radye etrafındaki ZB'lerin gerilmeleri oldukça düşük olmasına rağmen kazıkların ucundaki gerilmeler yüksek olmuştur. Ayrıca oturmaların seviyesinin artmasıyla beraber radye altındaki ve kazık altında düşey mesafe olarak kazıklara yakın olan kazıklar arasındaki bölgede ZB gerilmelerinin arttığı görülmüştür. Oturma seviyesinin artmasıyla doğal olarak tüm ZB gerilmeleri de artmıştır. Çizelge 4.45'te verilen, her tasarıma ait üç oturma seviyesi için ZB4, ZB19 ve ZB28 gerilmelerinin de yazıldığı Taguchi tablosu oluşturulmuş ve istatistiksel analiz yapılmıştır. Deney sonuçlarının ortalamaları ile her değişkenin üç farklı oturma seviyesinde gerilmeler üzerindeki etkisi incelenmiş (Şekil 4.88, Şekil 4.89 ve Şekil 4.90) ve ANOVA ile değişkenlerin etki derecesi katkı dereceleri ile yorumlanmıştır (Çizelge 4.46, Çizelge 4.47, Çizelge 4.48 ve Şekil 4.91). Üç ZB'de de gerilmeler u_v/L_{er} arttıkça belirgin ve doğrusal olmayan biçimde artmıştır. ZB19 gerilmesi oturma seviyeleri arttıkça ortalama 3,126 kPa'dan 145,794 kPa'ya kadar çıkmışken, ZB4 ve ZB28 gerilmeleri ise daha düşük bir aralıkta kalmakla birlikte u_v/L_{er} %2 olduğu durumda sırasıyla ortalama 41,714 kPa ve 35,998 kPa olarak birbirine yaklaşmıştır. Bu durum, kazık ucu hizasında yerel gerilme yoğunlaşmasının hem sığ bölgelerden (ZB4) hem de daha derindeki ara bölgeden (ZB28) daha etkili olduğunu göstermiştir. L_k/D_k oranının zeminde meydana gelen gerilmeler üzerindeki etkisi ZB'lerin konumuna göre farklılık göstermiştir. ZB4'te (radye altı) L_k/D_k katkı derecesi u_v/L_{er} oranının %0,05'ten %2'ye artışıyla %14,482'den %3,881'e azalmıştır. Ayrıca düşük oturma seviyesinde L_k/D_k artışı ortalama gerilmeleri artırmıştır. Bu artış, daha uzun kazıkların daha yüksek toplam taşıma kapasitesi sağlaması ve dolayısıyla aynı oturma seviyesinde daha büyük toplam yük altında radye-zemin temas gerilmesinin artmasıyla açıklanabilir. ZB19'da (kazık ucu seviyesi) L_k/D_k katkı değerleri oturma seviyeleri arttıkça %5,393'ten %0,443'e kadar azalmış ZB4'teki etkisine göre L_k/D_k daha etkisiz hale gelmiştir. Bu durum, ZB19'un kazık ucunda olması ve L_k/D_k 'nin uç direncinden çok çevre sürtünmelerini etkilemesi ile ilgili olabilir. ZB28'de (kazık altı) L_k/D_k oranının etkisi yine zayıf seviyelerdedir. Bu bölgede gerilmelerin oluşması ve yayılması daha çok D_{rkum} tarafından etkilenmektedir. ZB konumuna göre s_k etkisi L_k/D_k için olduğu gibi değişmiştir. ZB4 için (radye altı) s_k arttıkça gerilme artışı belirgin biçimde yükselmiştir. ZB4'te u_v/L_{er} %2 olduğunda s_k 'nin $5D_k$ olması durumundaki ortalama gerilme 57,458 kPa olup, $2,5D_k$ olduğu durumdaki 25,781 kPa ortalama

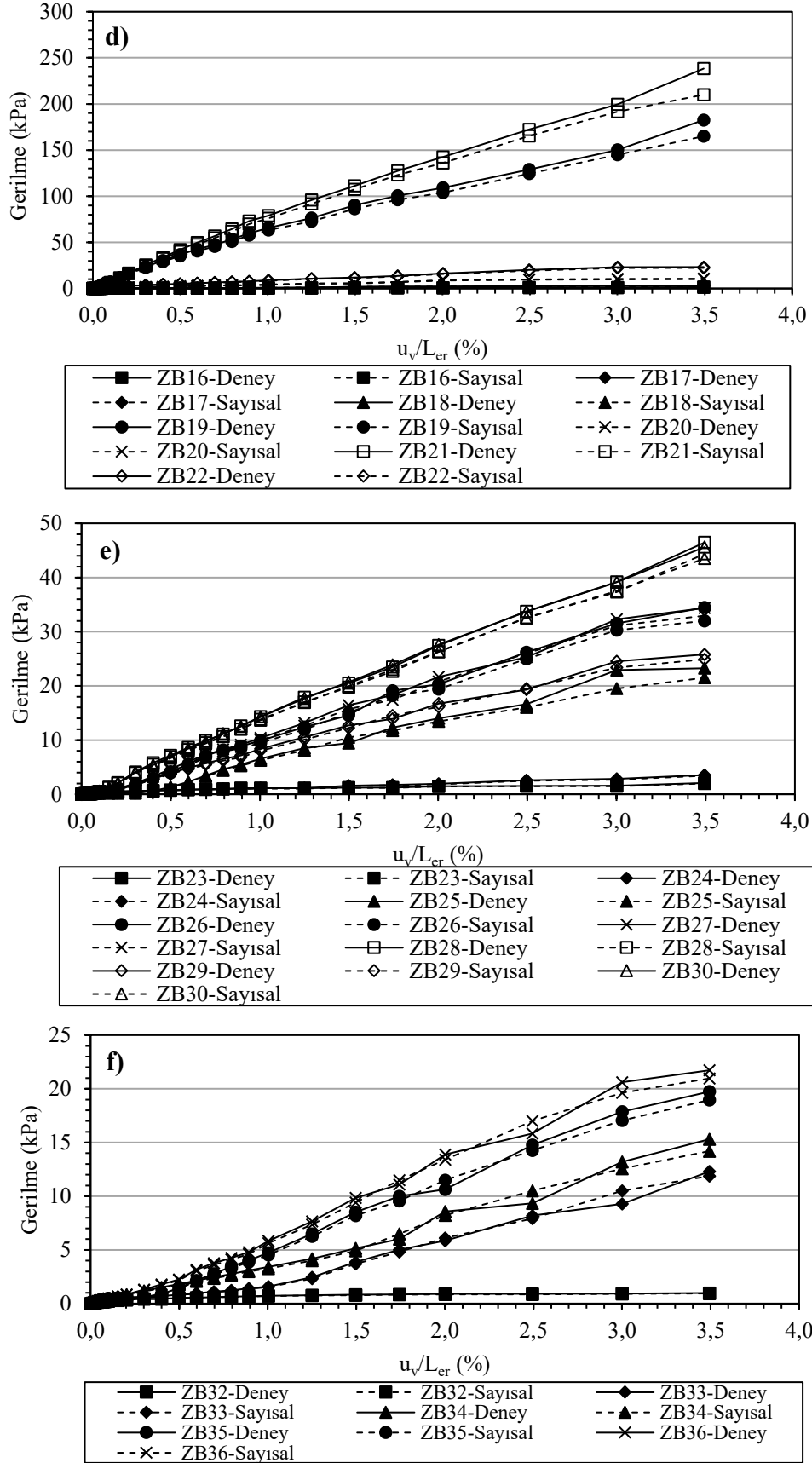
gerilmeden 2,2 kat daha büyüktür. Buna göre s_k arttığında radye alanının da büyümesi ve doğal olarak radye-zemin temasıyla aktarılan yükün artmış olduğu söylenebilir. ZB19'da (kazık ucu seviyesi) s_k etkisi katkı derecesi en fazla %7,787 olarak daha zayıf ve doğrusal olmayan bir davranış göstermiştir. ZB28'de (kazık altı ara bölge) ise s_k 'nin en büyük katkı derecesi değeri %5,943 olup yine zayıf etkiye sahip olmuştur. Kazık aralığının farklı ölçüm noktalarında farklı etki büyüklüklerine sahip olması, bu değişkenin gerilme dağılımını ağırlıklı olarak radye-zemin etkileşimi üzerinden etkilediğini ve bu etkinin derinlikle zayıfladığını göstermektedir. D_{rkum} gerilme artışı üzerinde en baskın etkiye sahip değişken olmuştur. Bu baskınlık özellikle ZB19'da etkili bir şekilde gözlenmiştir. ZB19 için D_{rkum} 'un katkı derecesi u_v/L_{er} 'nin %0,05'ten %2'ye yükselmesi durumunda sırasıyla %73,759, 77,466 ve 75,798 olmuştur. Bu da D_{rkum} 'un diğer değişkenlerden daha etkili olduğu göstermiştir. D_{rkum} 'un 0,35'ten 0,65'e artması, u_v/L_{er} %2,00 seviyesindeyken ZB19'daki ortalama gerilmeyi 90,650 kPa'dan 261,707 kPa'ya (%189 artış) yükseltmiştir. ZB4'te bu artış %196 (23,318'den 69,069 kPa'ya), ZB28'de ise %265 (17,299'dan 63,205 kPa'ya) olmuştur. ZB28'deki yüzdesel artışın en yüksek olması, kazıkların altındaki bölgede rölatif sıklığın zemin rijitliği ve gerilme dağılımı/yayılımı üzerindeki etkisinin daha önemli olduğunu göstermiştir. Buna göre D_{rkum} artışıyla hem kazık ucu direnci hem de radye-zemin temas gerilmesi artmış ve daha yüksek gerilmeler daha geniş bir alana yayılmıştır. Ayrıca, D_{rkum} artışıyla rijitlik ve kayma mukavemeti parametreleri de artarak zemine aktarılan gerilmelerin büyüklüğü doğrudan artmaktadır. N_k etkisi, ZB derinliğine göre önemli biçimde değişmiştir. ZB4'te (radye altı) N_k 'nin etkisi %2,730'u geçmeyen katkı derecesiyle oldukça sınırlı olmuştur. ZB19'da (kazık ucu seviyesi) ise N_k etkisi büyük ölçüde artmış ve gerilmeleri artırıcı yönde olmuştur. N_k katkı derecesi oturma seviyeleri arttıkça %13,061'den %22,339'a kadar artmıştır. ZB28 için (kazık altı) %24,589'a kadar çıkabilen katkı dereceleri ile N_k etkili olmuştur. N_k 'nin ZB19'daki gerilmelerin değişimi üzerinde etkili olması, daha fazla kazığın kazık ucu seviyesinde daha yoğun bir gerilme alanı oluşturmasıyla ilişkili olabilir.



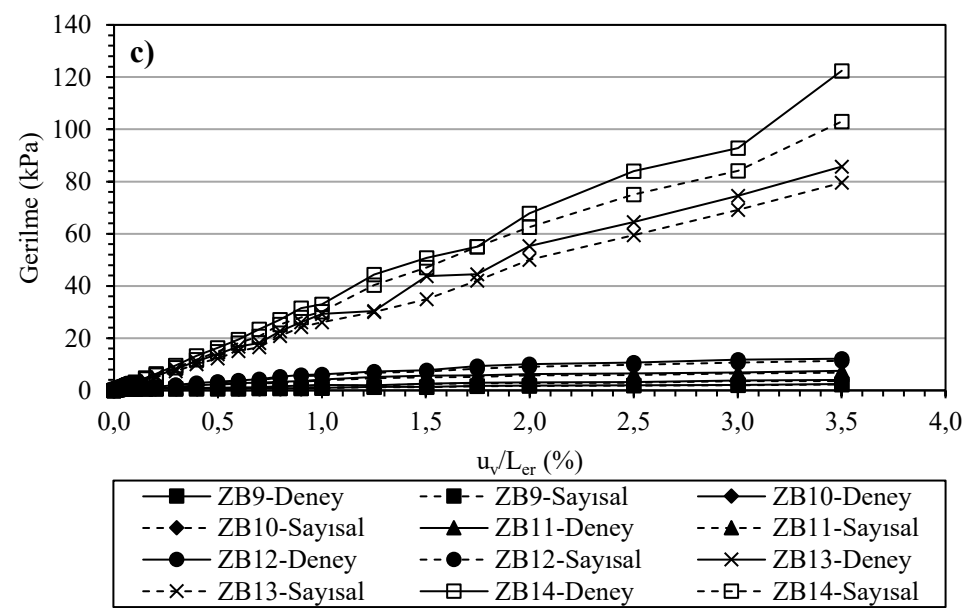
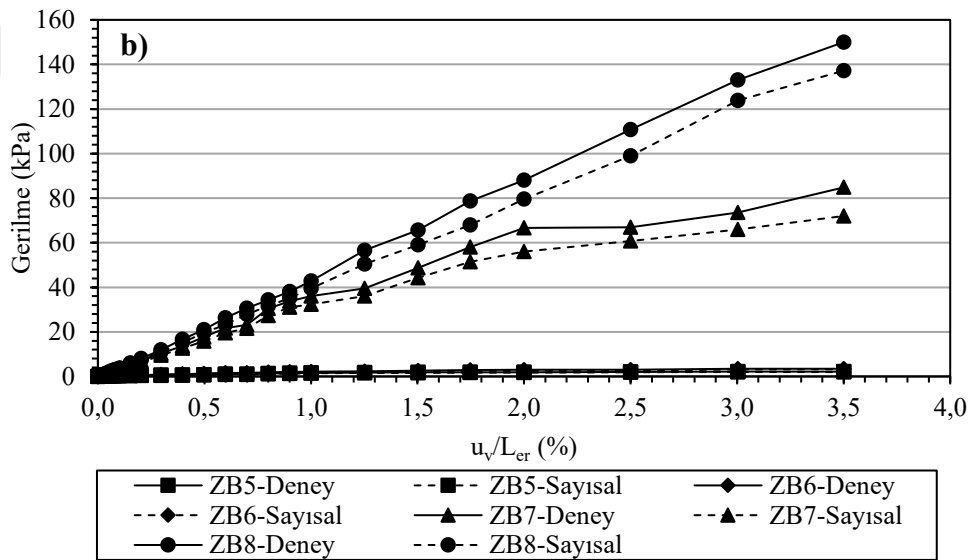
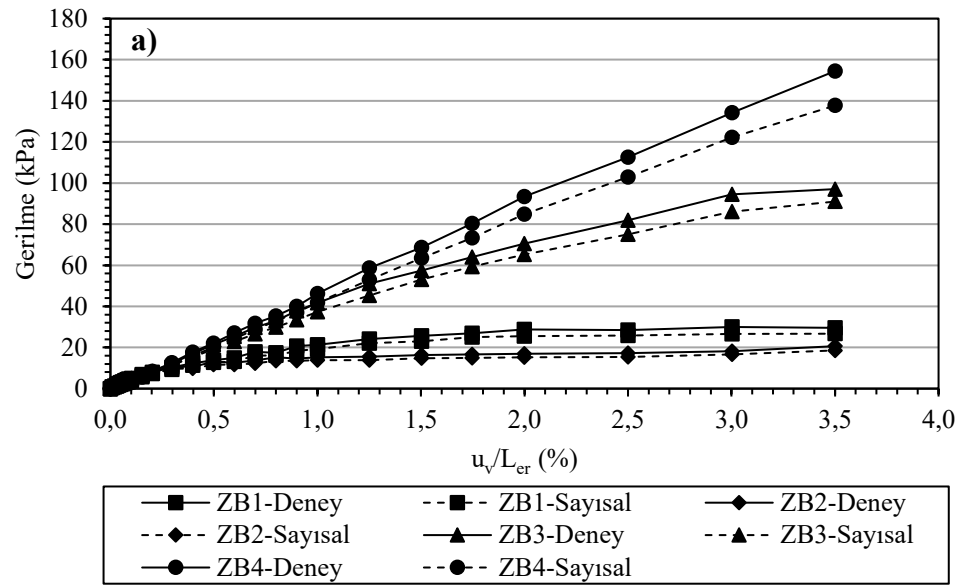


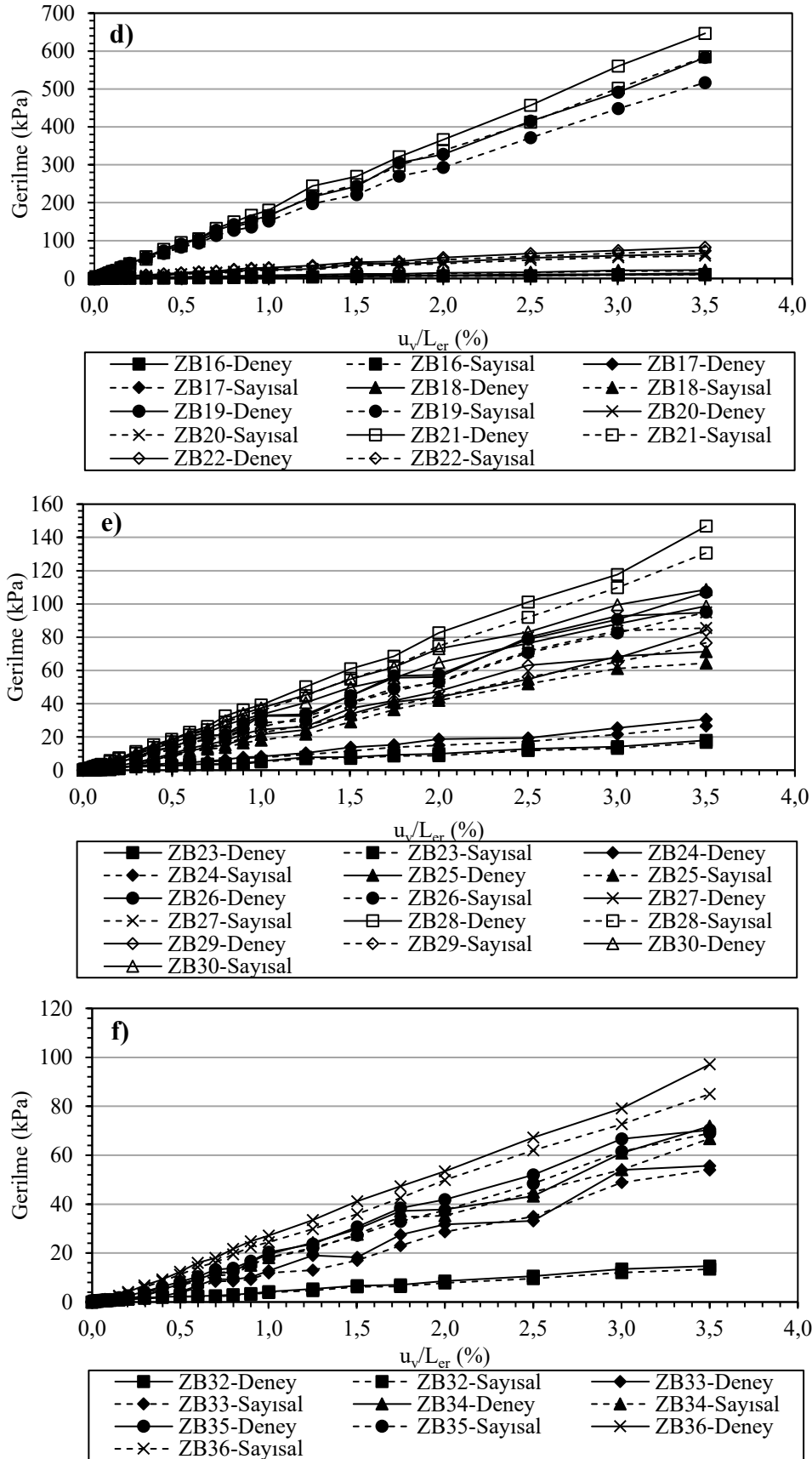
Şekil 4.79. T1 tasarımı için ZB noktalarında deney ve sayısal analizler ile elde edilen zeminde meydana gelen gerilmeler: a) ZB1-4 arası, b) ZB5-8 arası, c) ZB9-14 arası, d) ZB16-20 arası, e) ZB23-28 arası, f) ZB32-34 arası



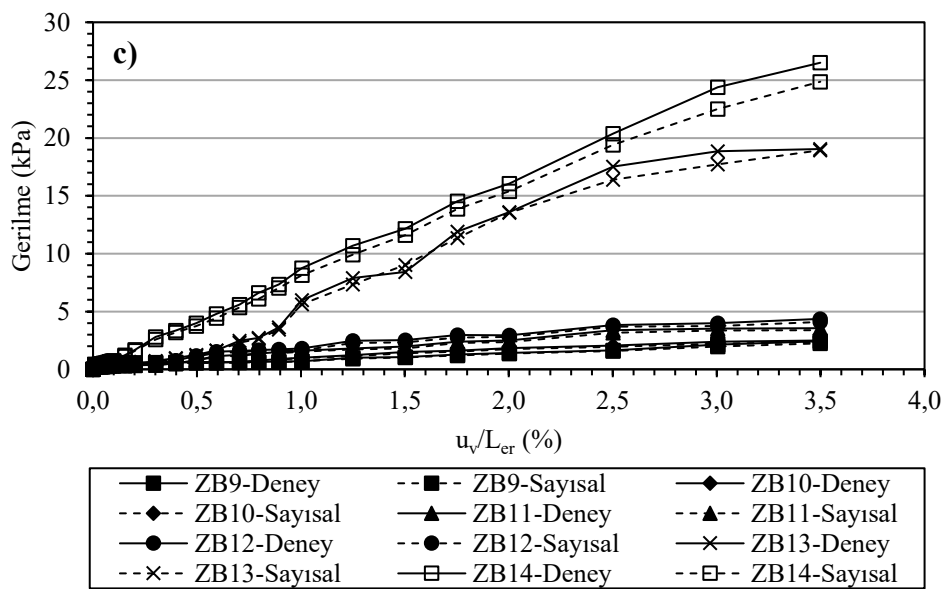
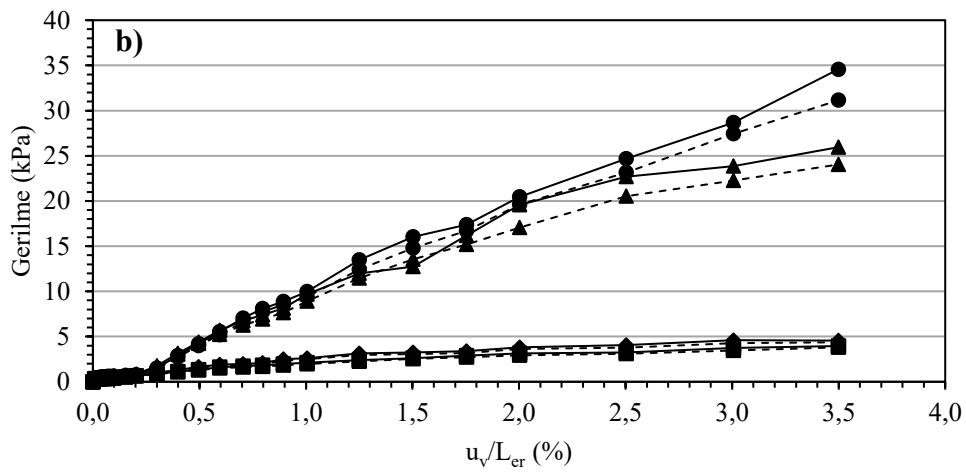
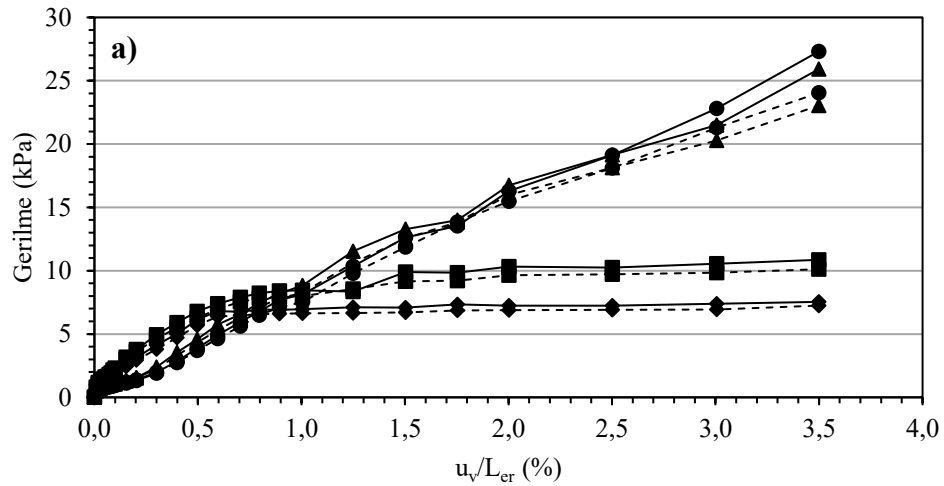


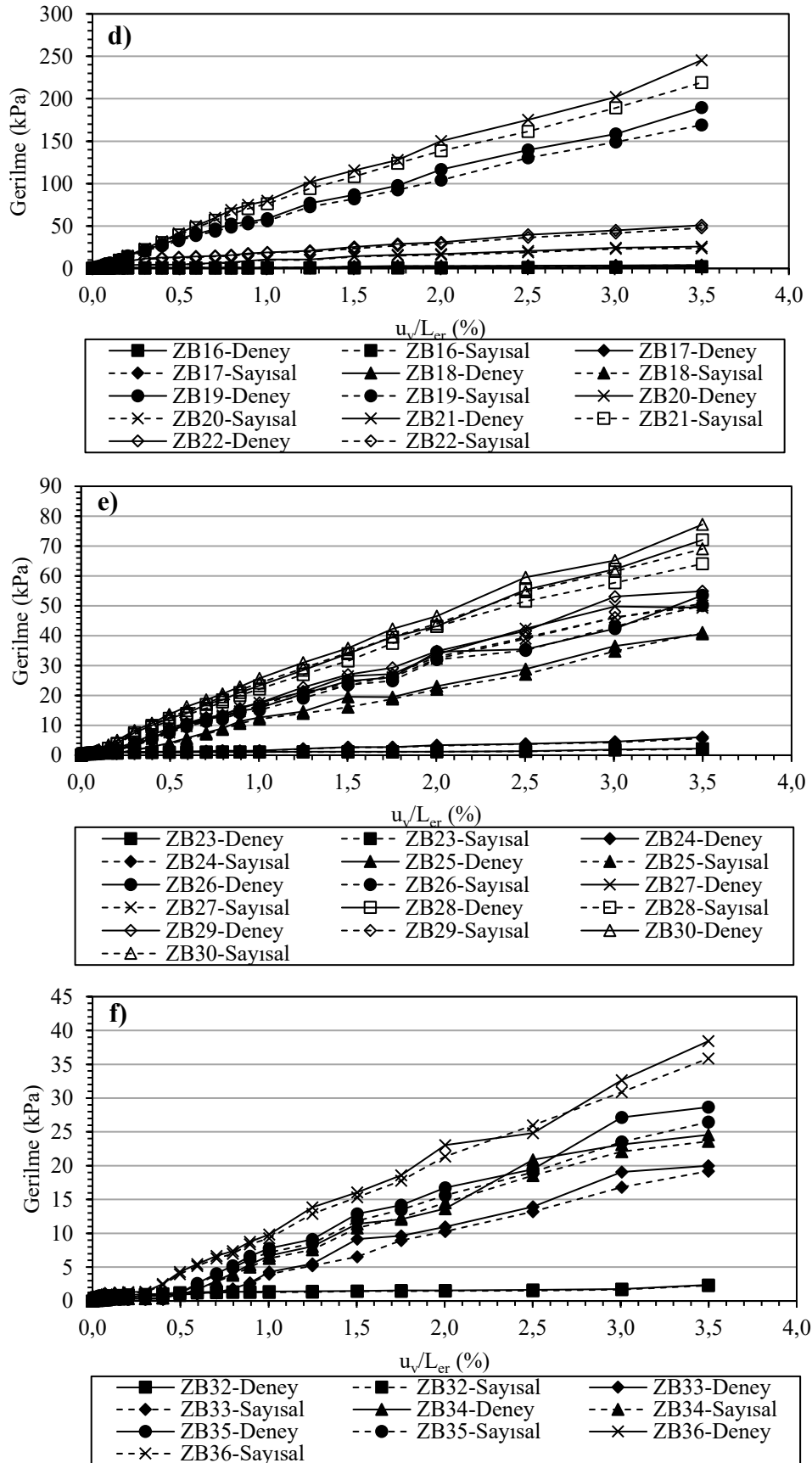
Şekil 4.80. T2 tasarımı için ZB noktalarında deney ve sayısal analizler ile elde edilen zeminde meydana gelen gerilmeler: a) ZB1-4 arası, b) ZB5-8 arası, c) ZB9-14 arası, d) ZB16-22 arası, e) ZB23-30 arası, f) ZB32-36 arası



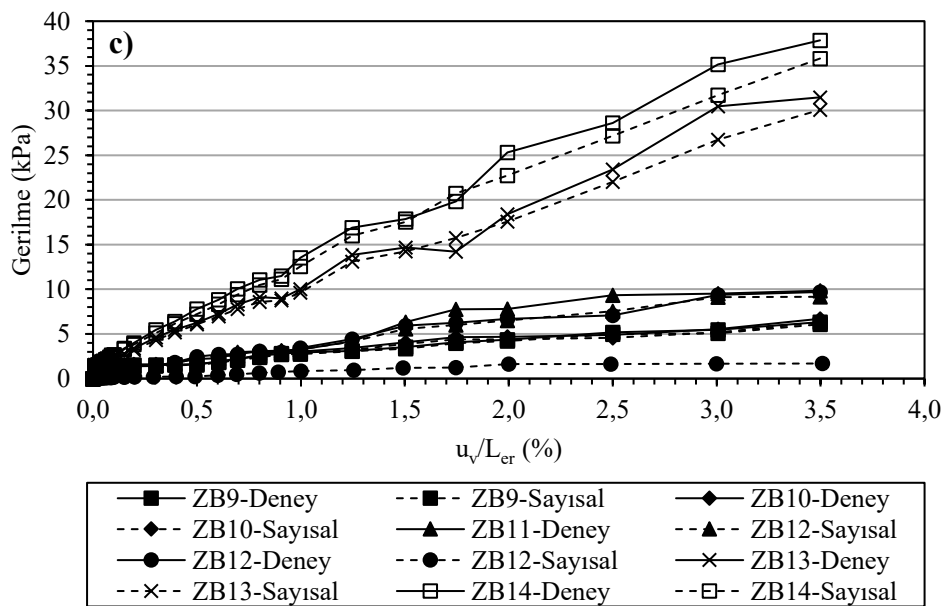
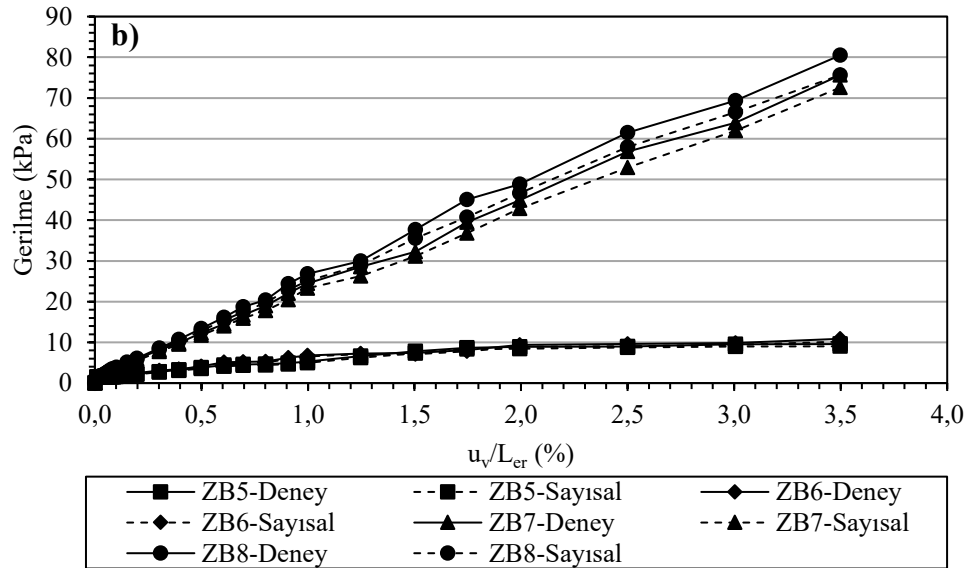
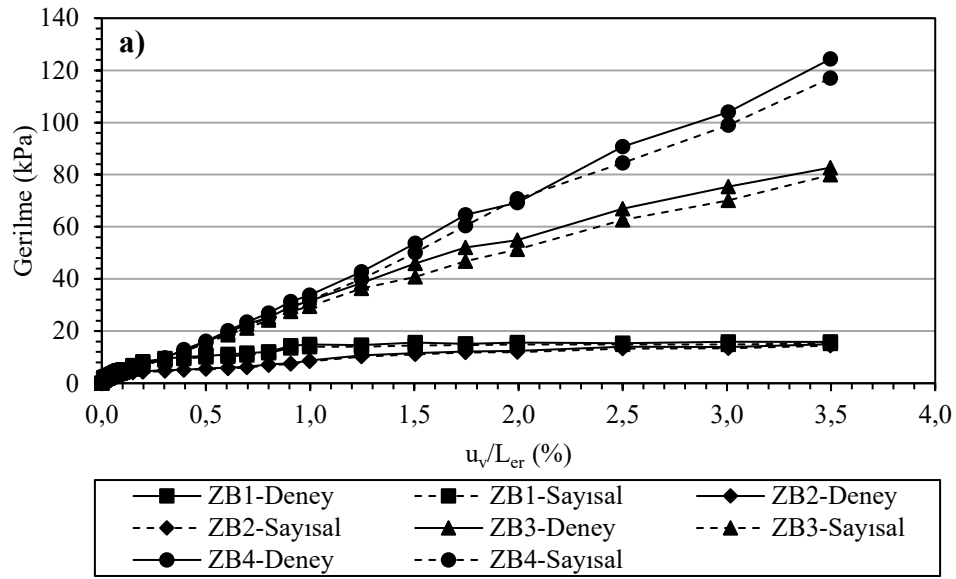


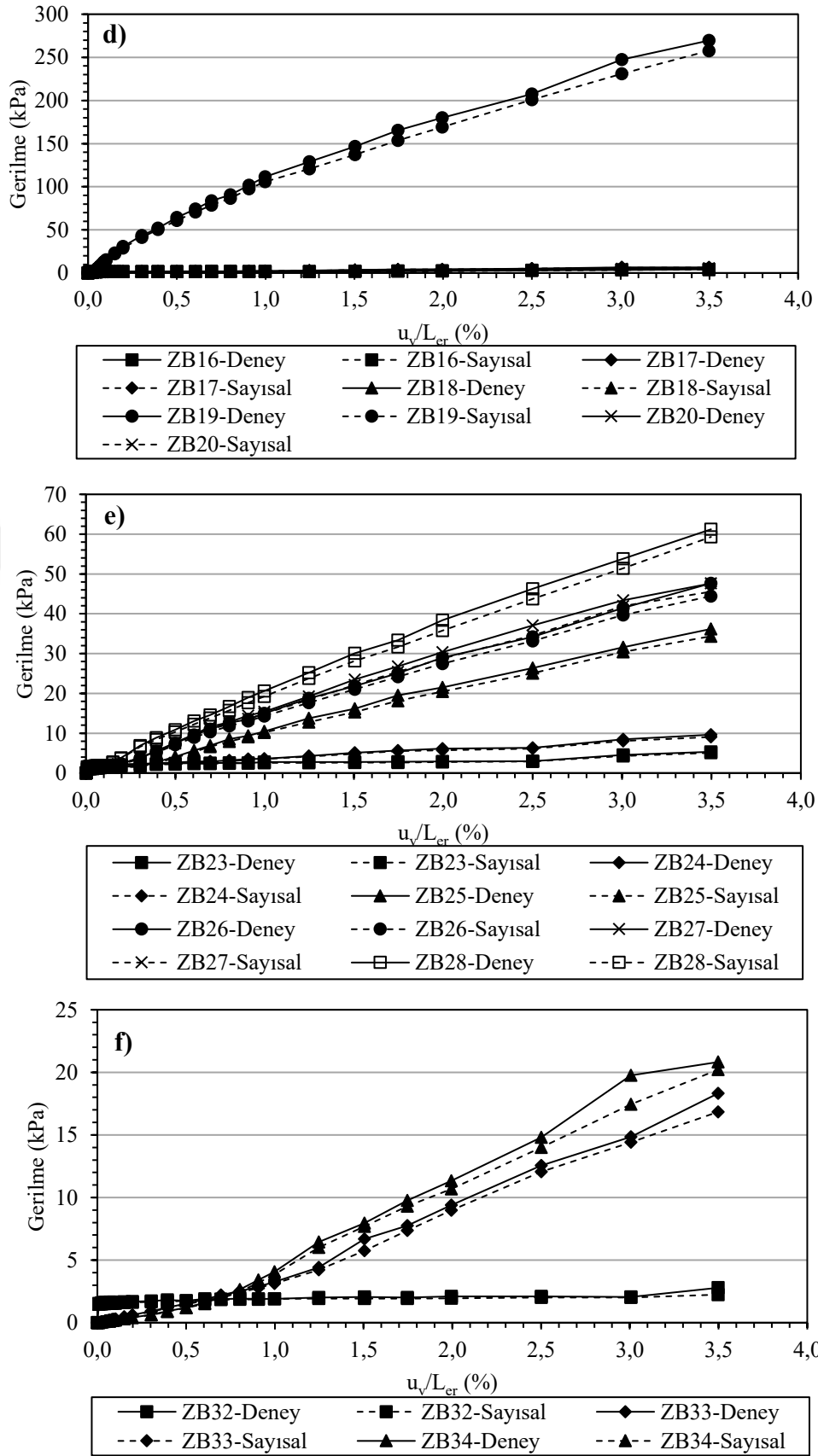
Şekil 4.81. T3 tasarımı için ZB noktalarında deney ve sayısal analizler ile elde edilen zeminde meydana gelen gerilmeler: a) ZB1-4 arası, b) ZB5-8 arası, c) ZB9-14 arası, d) ZB16-22 arası, e) ZB23-30 arası, f) ZB32-36 arası



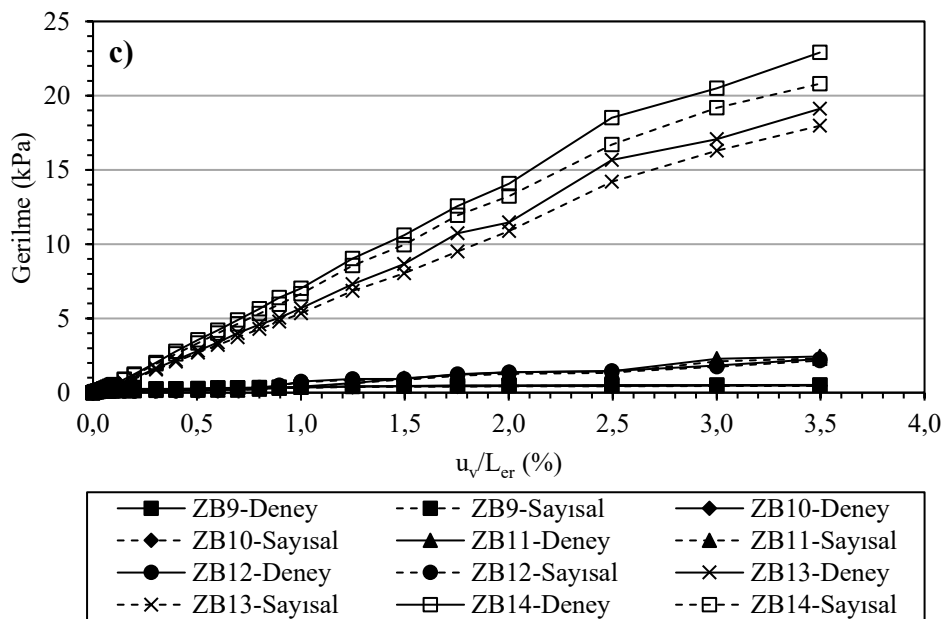
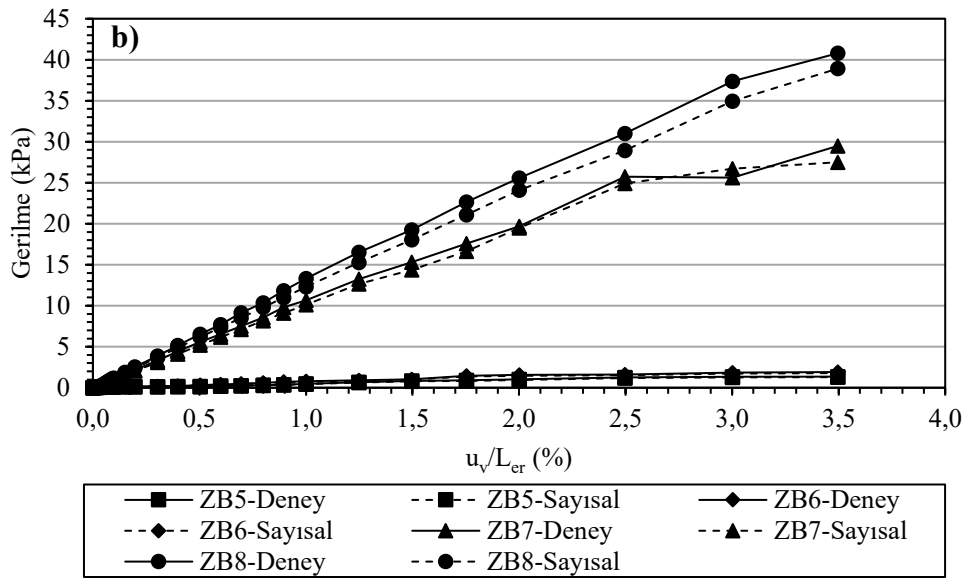
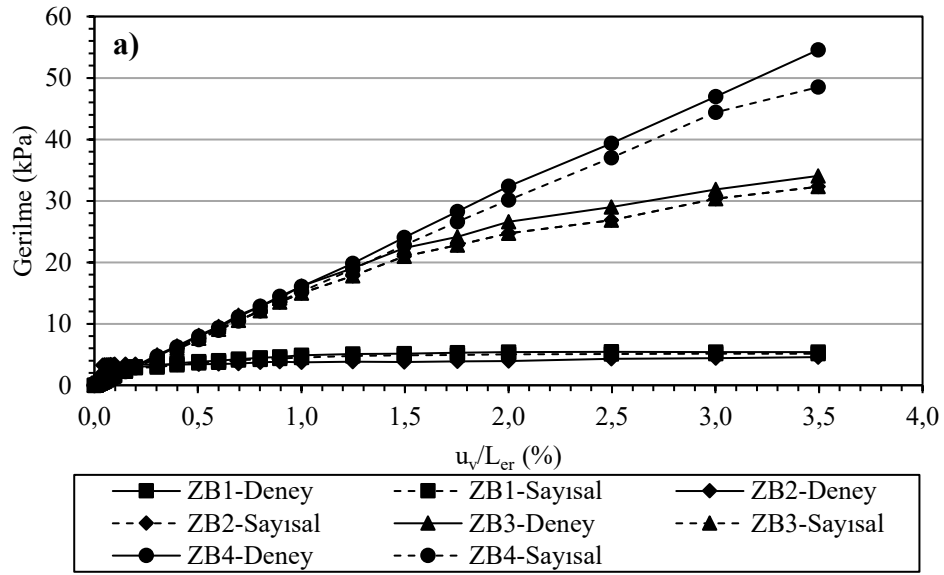


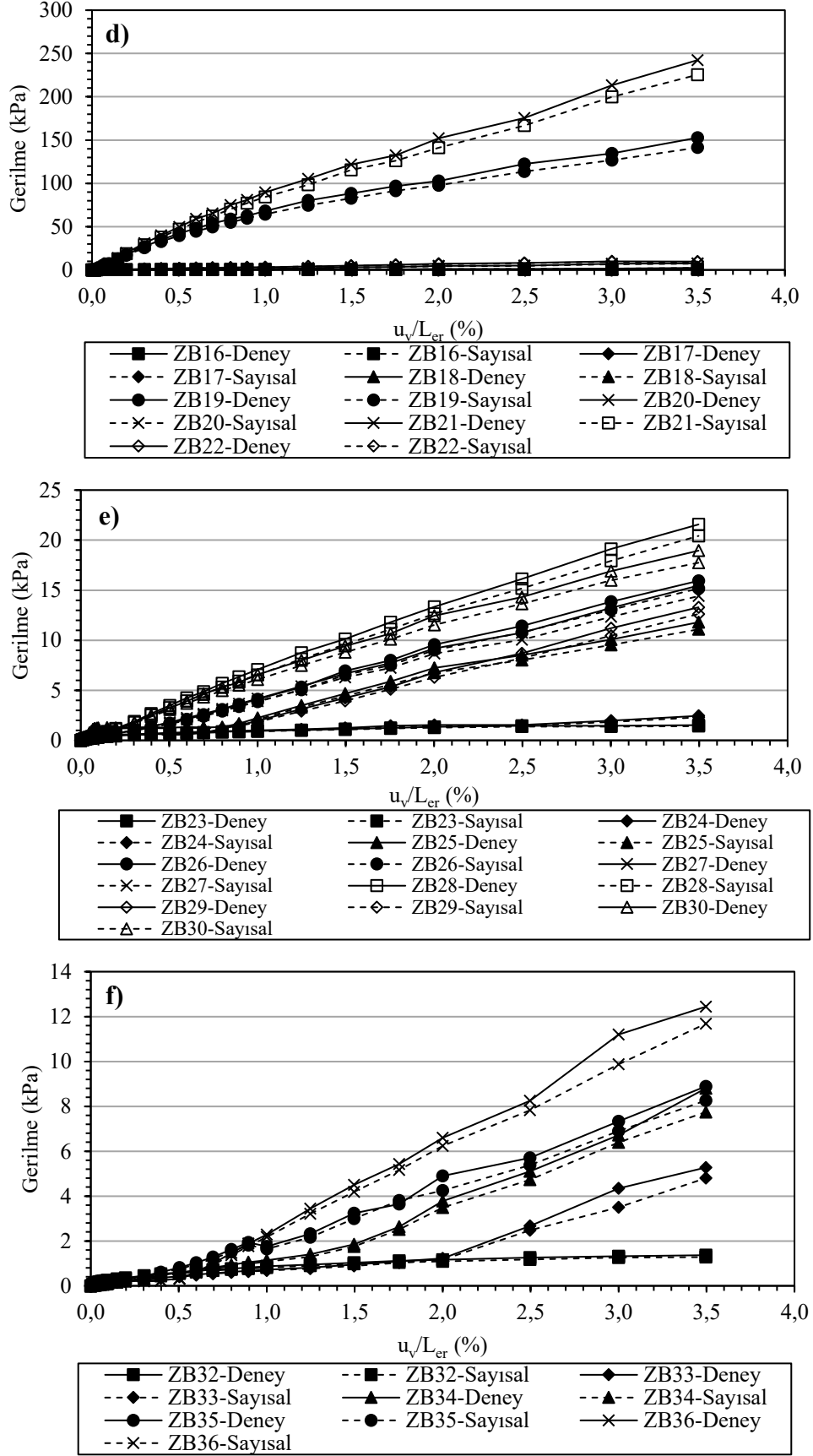
Şekil 4.82. T4 tasarımı için ZB noktalarında deney ve sayısal analizler ile elde edilen zeminde meydana gelen gerilmeler: a) ZB1-4 arası, b) ZB5-8 arası, c) ZB9-14 arası, d) ZB16-22 arası, e) ZB23-30 arası, f) ZB32-36 arası



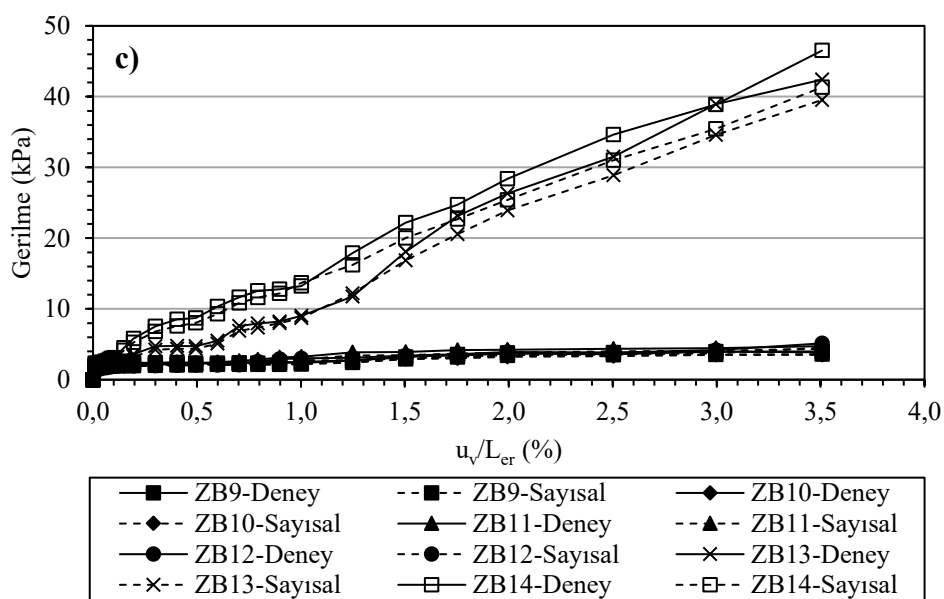
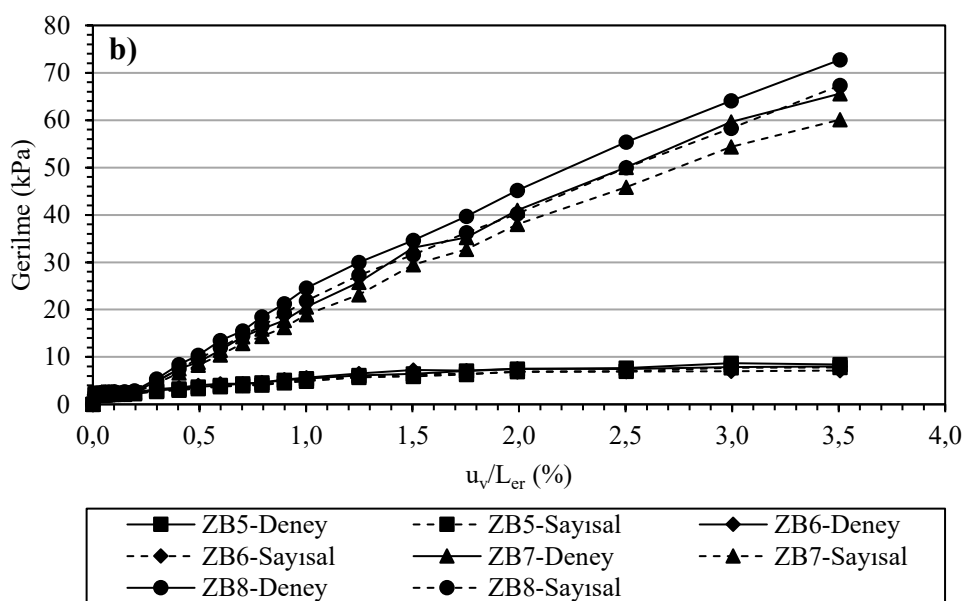
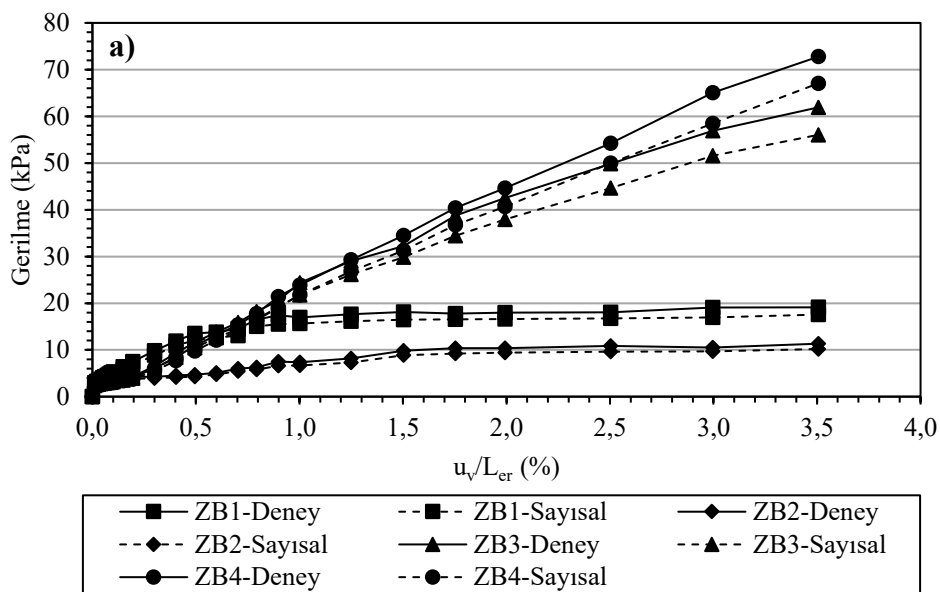


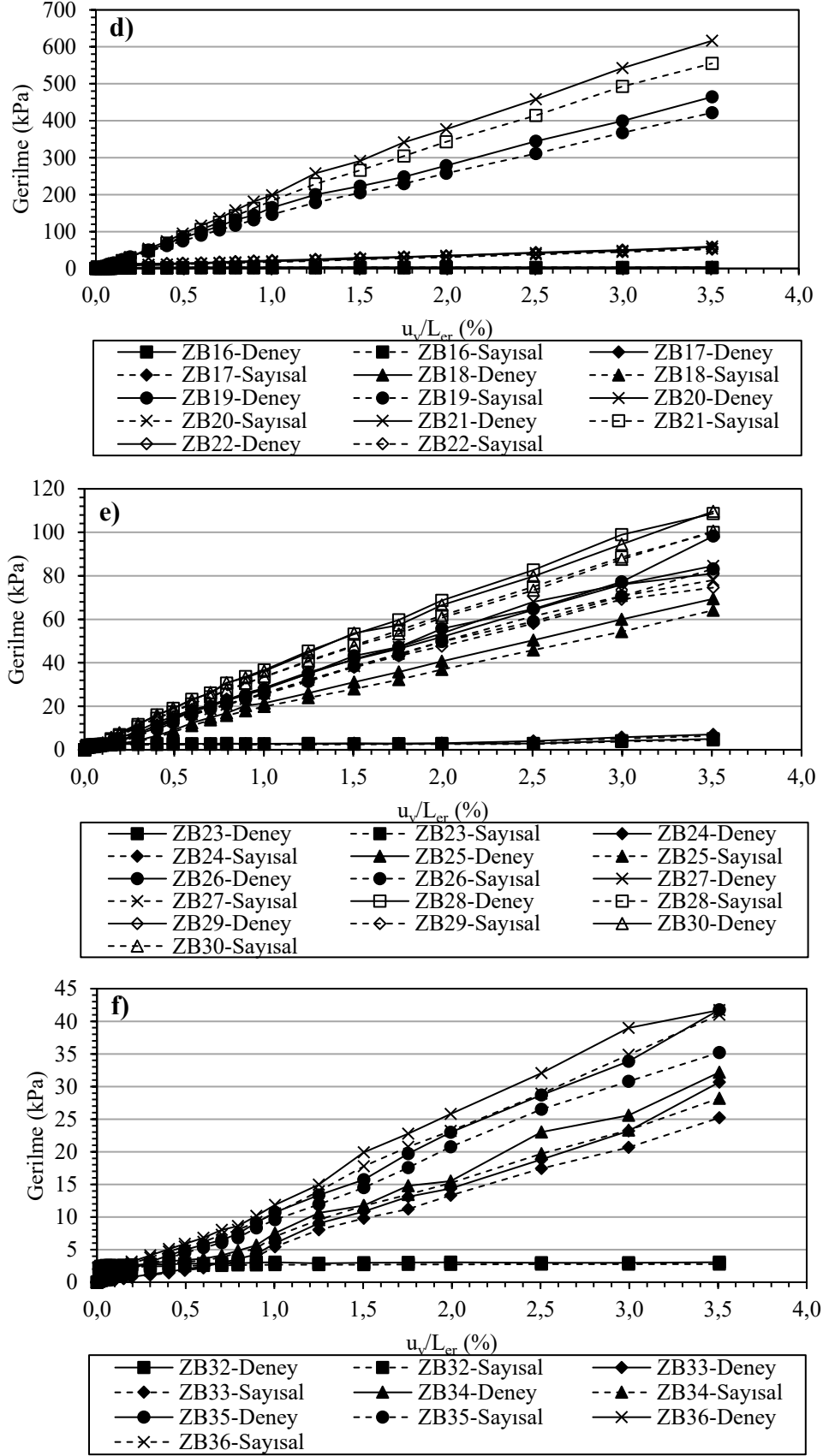
Şekil 4.83. T5 tasarımı için ZB noktalarında deney ve sayısal analizler ile elde edilen zeminde meydana gelen gerilmeler: a) ZB1-4 arası, b) ZB5-8 arası, c) ZB9-14 arası, d) ZB16-20 arası, e) ZB23-28 arası, f) ZB32-34 arası



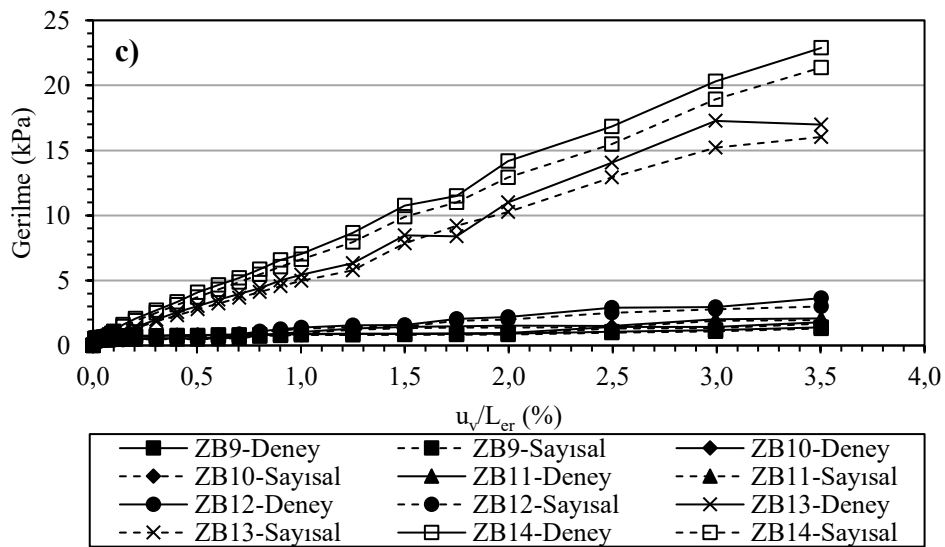
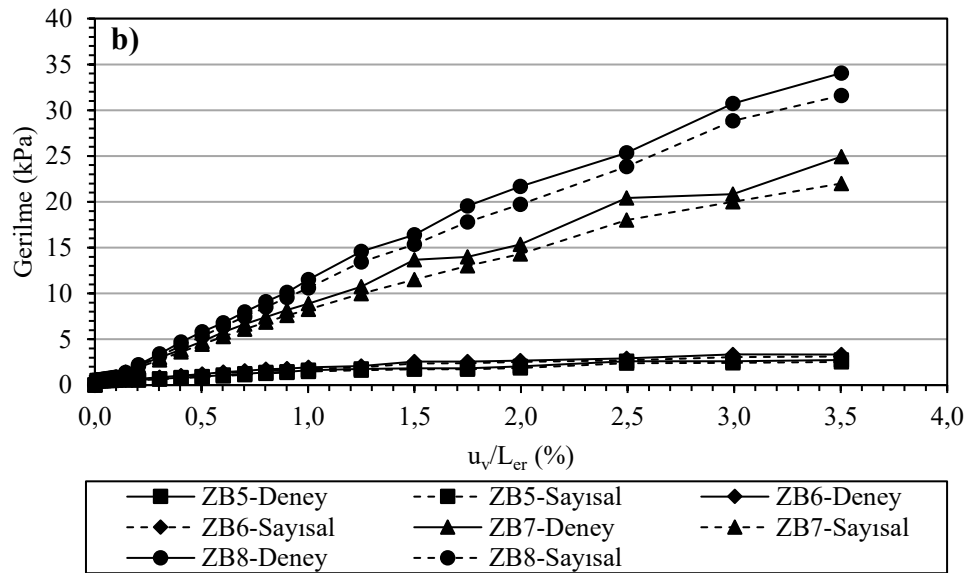
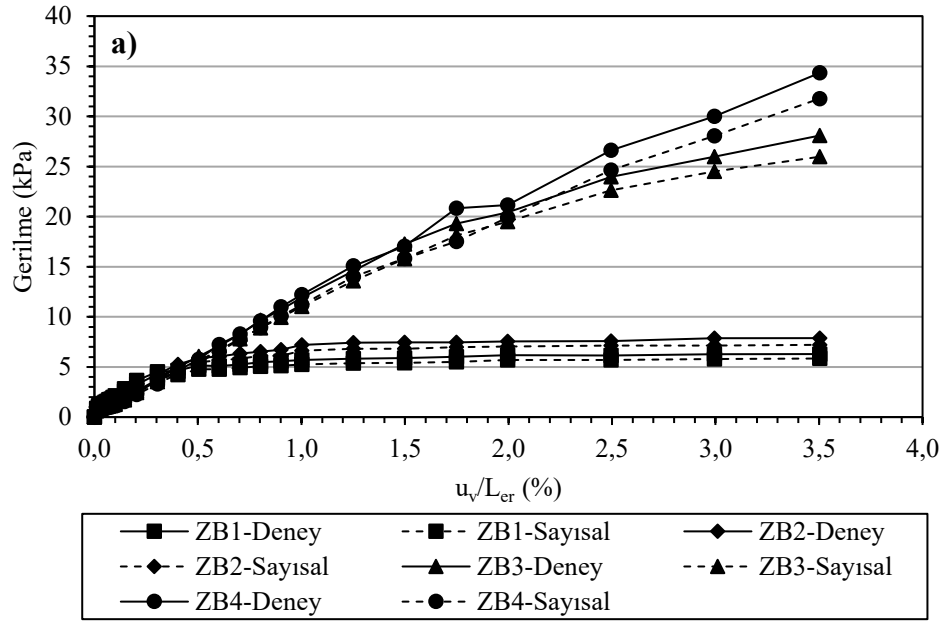


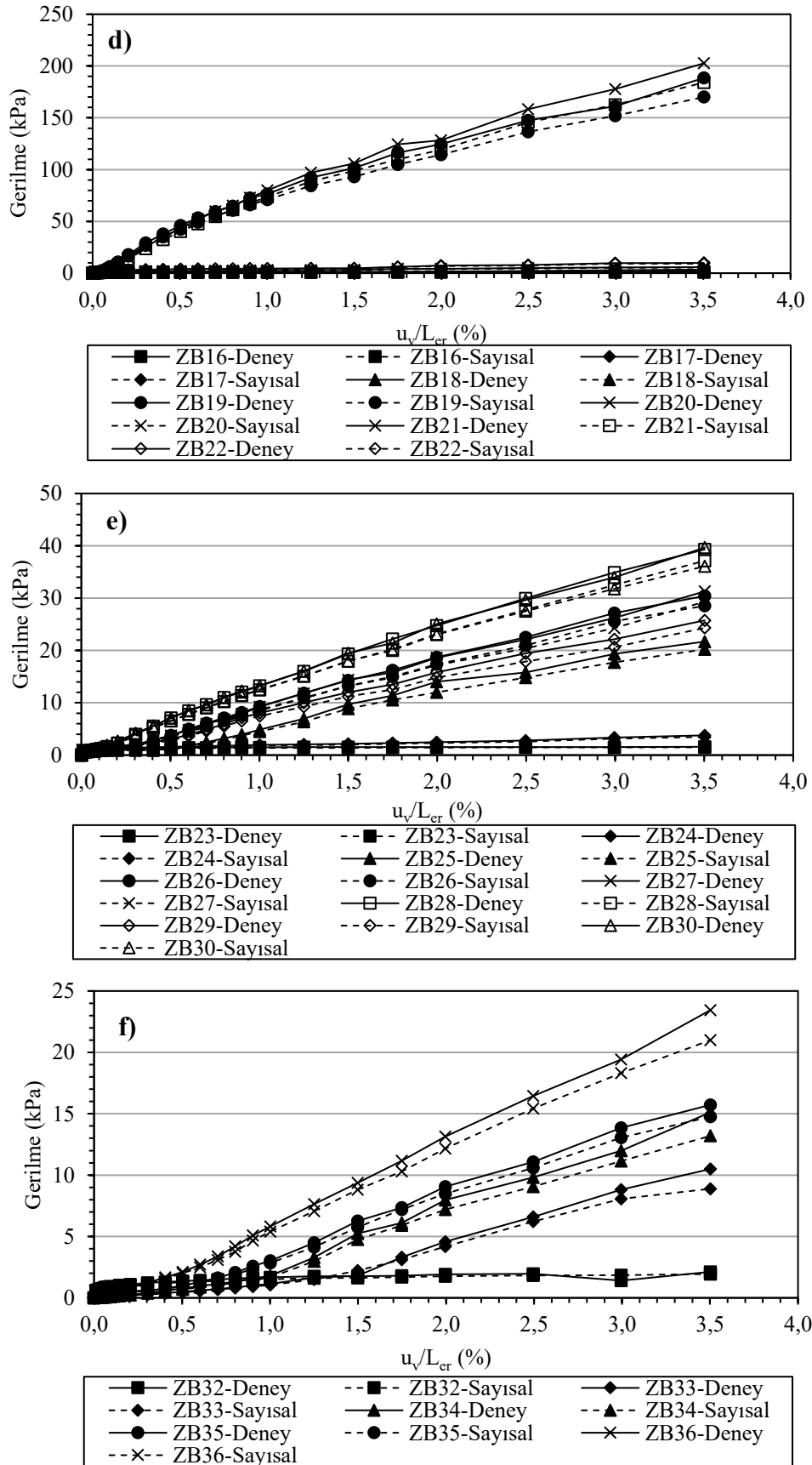
Şekil 4.84. T6 tasarımı için ZB noktalarında deney ve sayısal analizler ile elde edilen zeminde meydana gelen gerilmeler: a) ZB1-4 arası, b) ZB5-8 arası, c) ZB9-14 arası, d) ZB16-22 arası, e) ZB23-30 arası, f) ZB32-36 arası



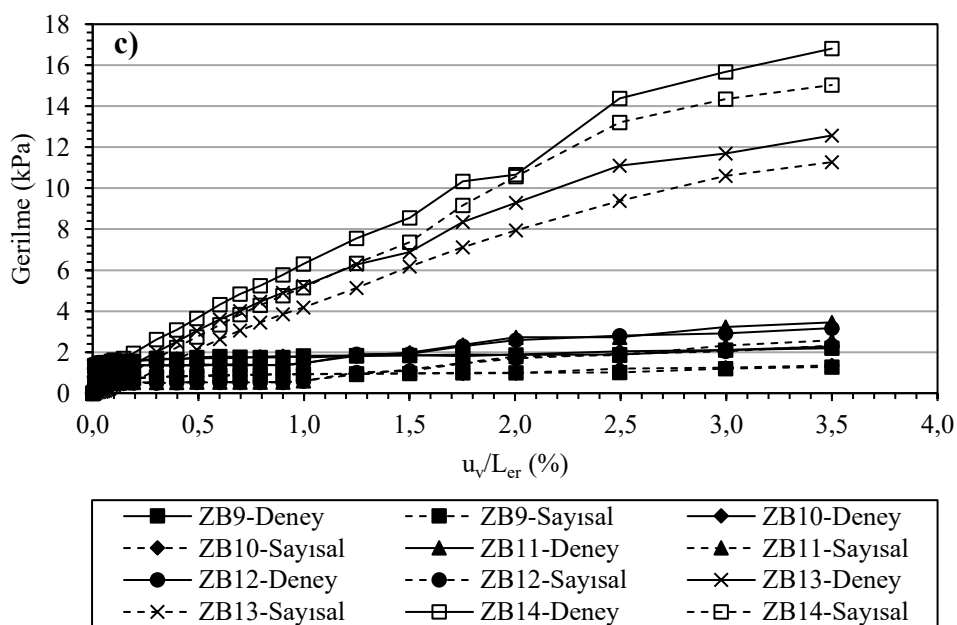
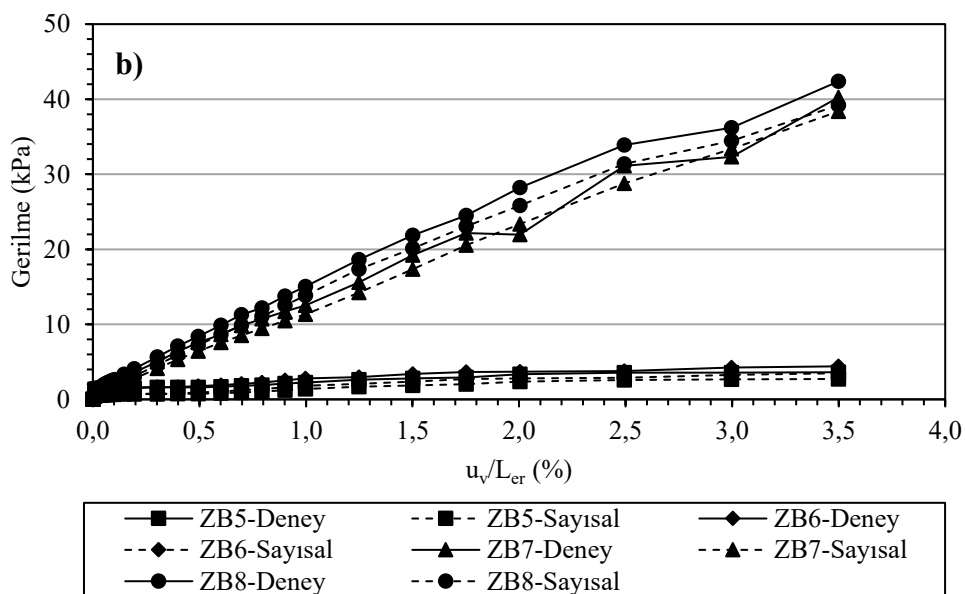
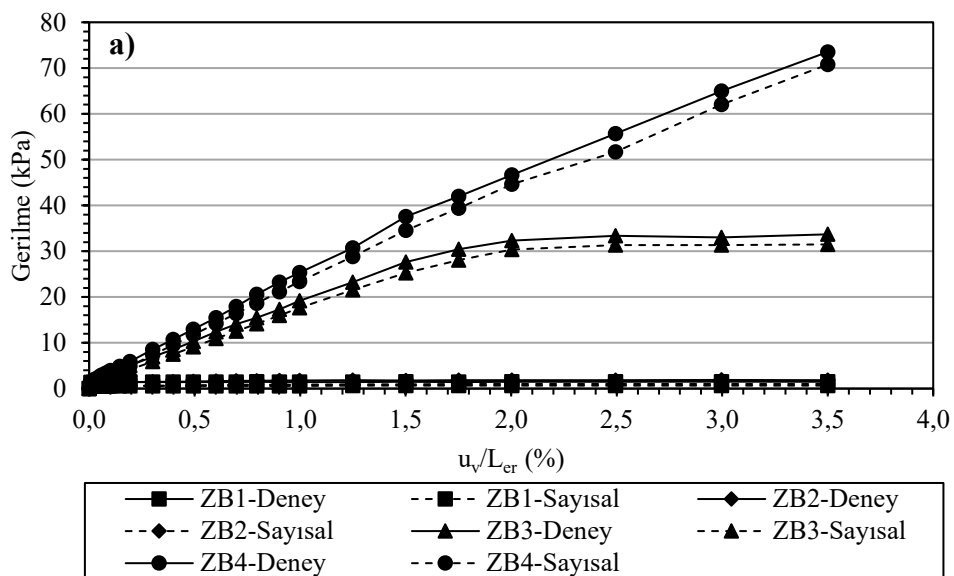


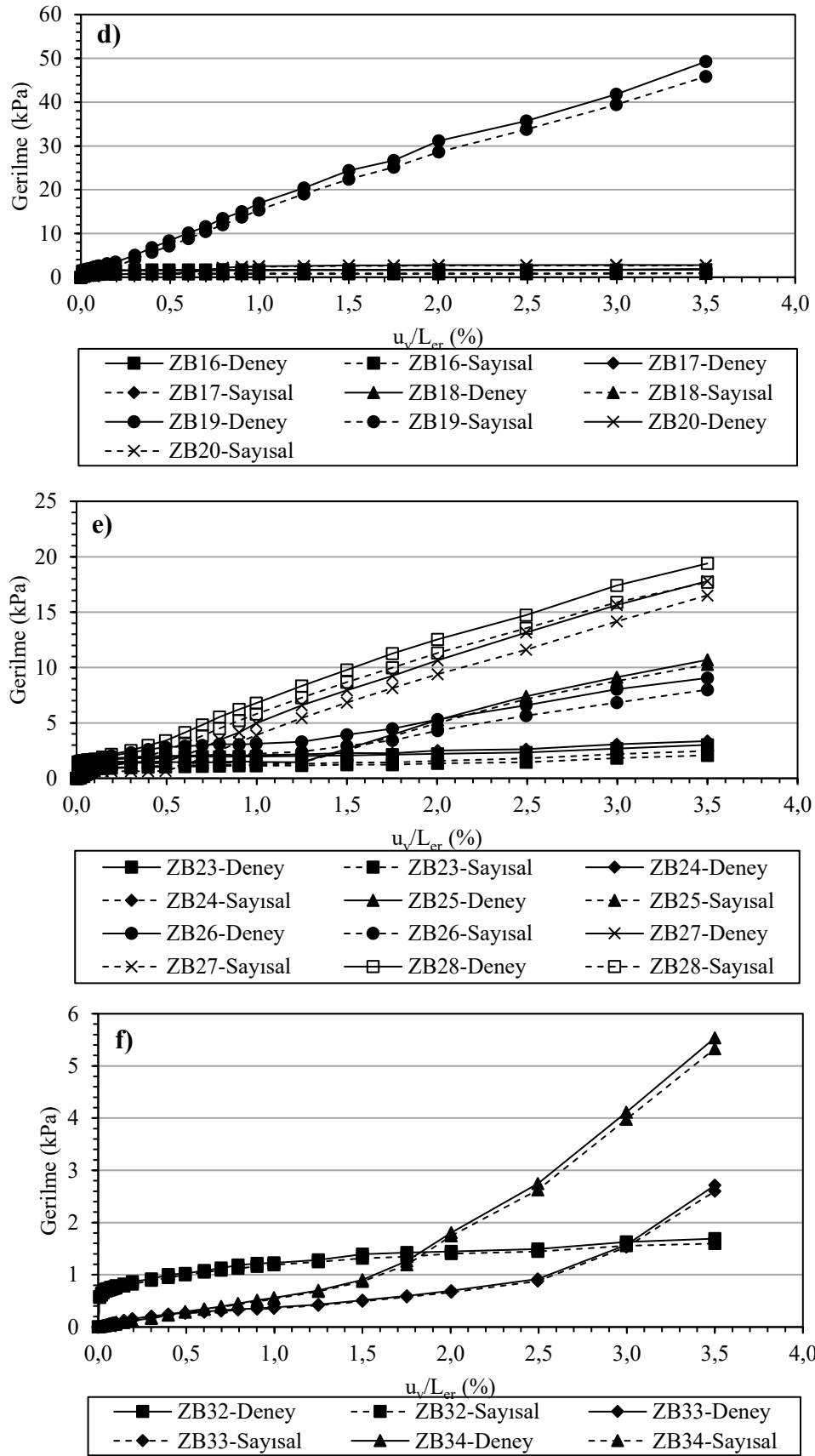
Şekil 4.85. T7 tasarımı için ZB noktalarında deney ve sayısal analizler ile elde edilen zeminde meydana gelen gerilmeler: a) ZB1-4 arası, b) ZB5-8 arası, c) ZB9-14 arası, d) ZB16-22 arası, e) ZB23-30 arası, f) ZB32-36 arası





Şekil 4.86. T8 tasarımı için ZB noktalarında deney ve sayısal analizler ile elde edilen zeminde meydana gelen gerilmeler: a) ZB1-4 arası, b) ZB5-8 arası, c) ZB9-14 arası, d) ZB16-22 arası, e) ZB23-30 arası, f) ZB32-36 arası





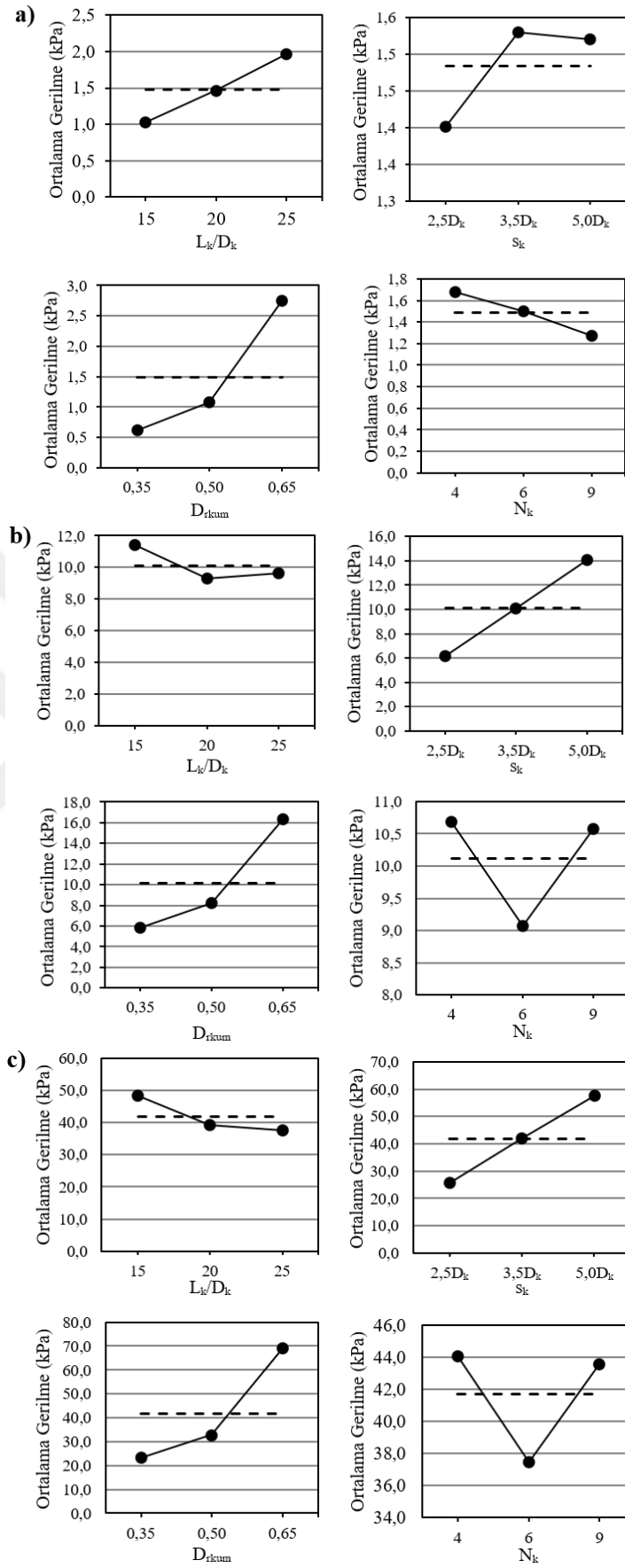
Şekil 4.87. T9 tasarımı için ZB noktalarında deney ve sayısal analizler ile elde edilen zeminde meydana gelen gerilmeler: a) ZB1-4 arası, b) ZB5-8 arası, c) ZB9-14 arası, d) ZB16-20 arası, e) ZB23-28 arası, f) ZB32-34 arası

Çizelge 4.45. Kazıklı radyelerde ZB4, ZB19 ve ZB28 gerilmelerinin istatistiksel analizinde dikkate alınan değişkenler ve gerilmeler

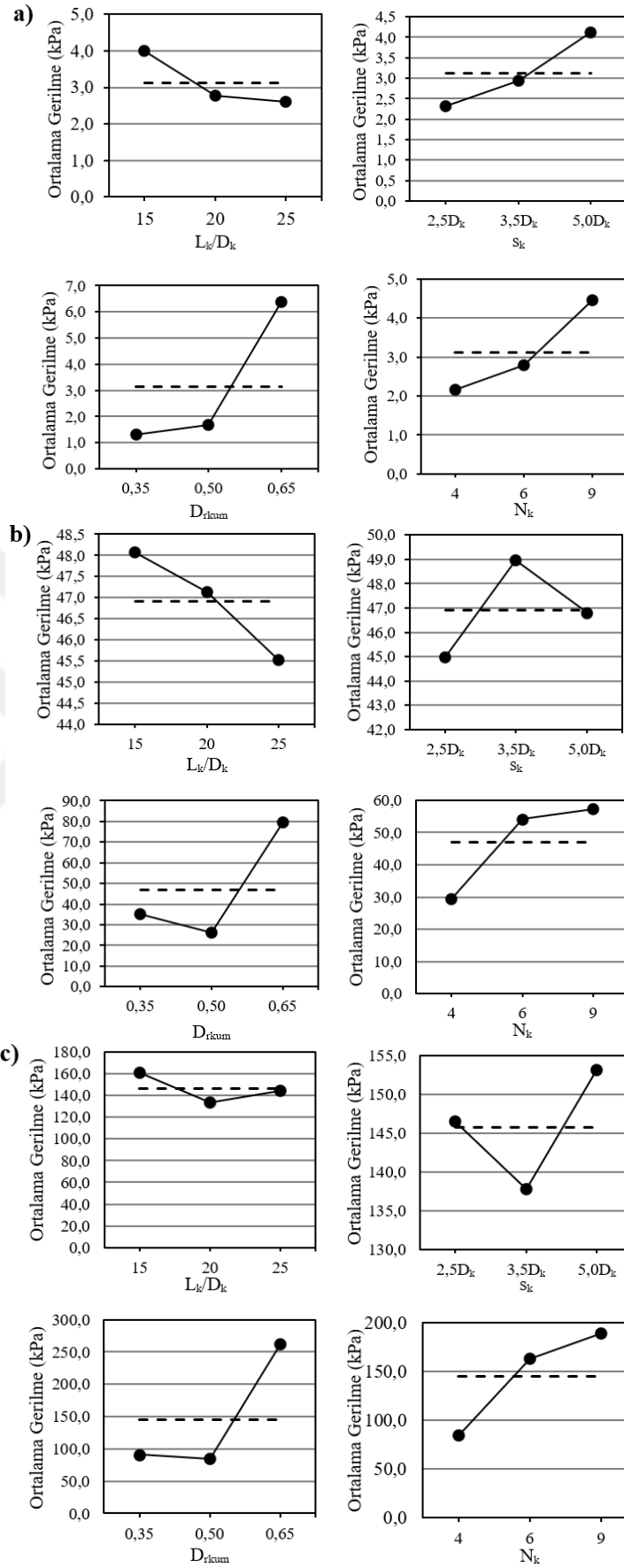
ZB4							
Tasarım	L_k/D_k	s_k	D_{rkum}	N_k	$u_v/L_{er} (\%) = 0,05$ Gerilme (kPa)	$u_v/L_{er} (\%) = 0,50$ Gerilme (kPa)	$u_v/L_{er} (\%) = 2,00$ Gerilme (kPa)
T1	15	2,5D _k	0,35	4	0,277	3,731	16,441
T2	15	3,5D _k	0,50	6	0,680	8,428	35,347
T3	15	5,0D _k	0,65	9	2,115	22,057	93,377
T4	20	2,5D _k	0,50	9	0,764	3,881	16,283
T5	20	3,5D _k	0,65	4	2,973	16,094	69,211
T6	20	5,0D _k	0,35	6	0,660	7,950	32,366
T7	25	2,5D _k	0,65	6	3,164	10,854	44,619
T8	25	3,5D _k	0,35	9	0,936	5,772	21,148
T9	25	5,0D _k	0,50	4	1,785	12,233	46,631

ZB19							
Tasarım	L_k/D_k	s_k	D_{rkum}	N_k	$u_v/L_{er} (\%) = 0,05$ Gerilme (kPa)	$u_v/L_{er} (\%) = 0,50$ Gerilme (kPa)	$u_v/L_{er} (\%) = 2,00$ Gerilme (kPa)
T1	15	2,5D _k	0,35	4	0,405	16,765	44,769
T2	15	3,5D _k	0,50	6	2,034	36,771	109,062
T3	15	5,0D _k	0,65	9	9,563	90,671	327,174
T4	20	2,5D _k	0,50	9	1,841	34,863	116,553
T5	20	3,5D _k	0,65	4	4,867	64,237	179,800
T6	20	5,0D _k	0,35	6	1,621	42,271	102,669
T7	25	2,5D _k	0,65	6	4,695	83,237	278,147
T8	25	3,5D _k	0,35	9	1,935	45,859	124,512
T9	25	5,0D _k	0,50	4	1,174	7,455	29,458

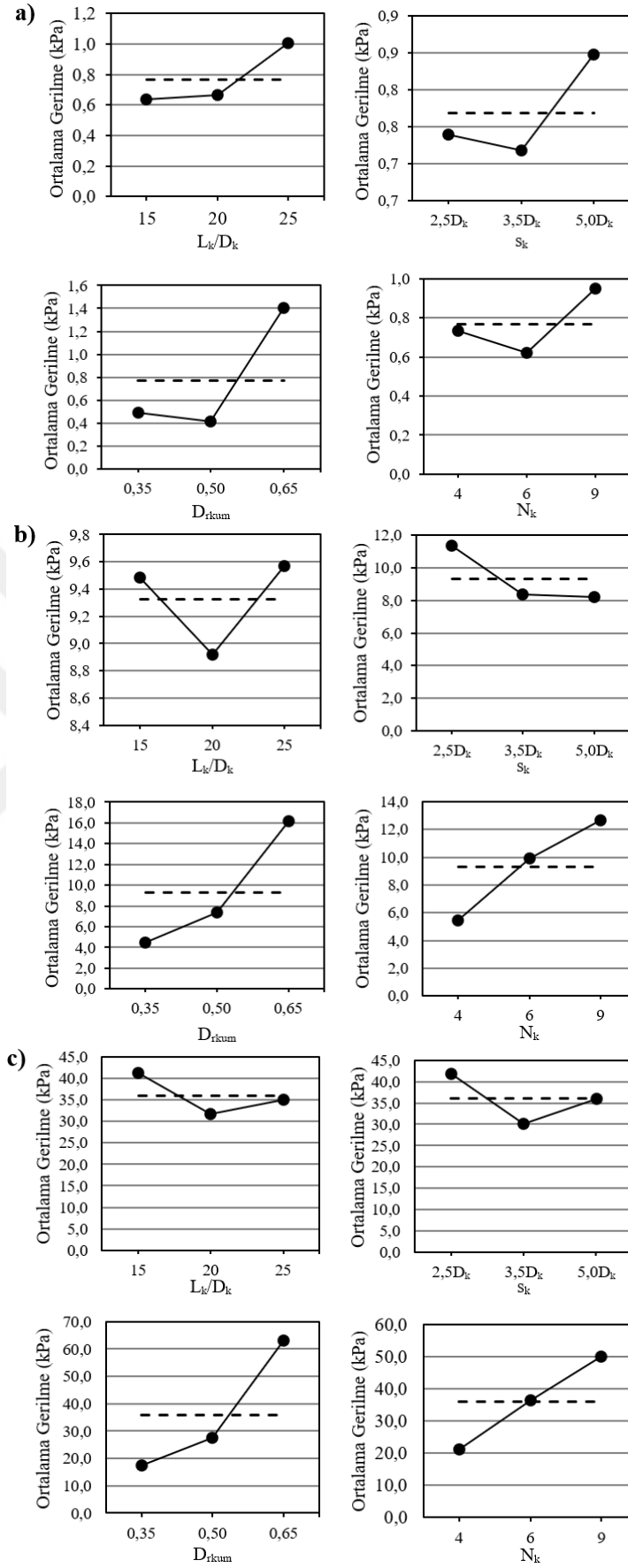
ZB28							
Tasarım	L_k/D_k	s_k	D_{rkum}	N_k	$u_v/L_{er} (\%) = 0,05$ Gerilme (kPa)	$u_v/L_{er} (\%) = 0,50$ Gerilme (kPa)	$u_v/L_{er} (\%) = 2,00$ Gerilme (kPa)
T1	15	2,5D _k	0,35	4	0,289	2,772	13,789
T2	15	3,5D _k	0,50	6	0,080	7,175	27,465
T3	15	5,0D _k	0,65	9	1,535	18,512	82,619
T4	20	2,5D _k	0,50	9	0,464	12,385	43,182
T5	20	3,5D _k	0,65	4	1,216	10,873	38,375
T6	20	5,0D _k	0,35	6	0,317	3,489	13,338
T7	25	2,5D _k	0,65	6	1,466	18,984	68,622
T8	25	3,5D _k	0,35	9	0,857	7,090	24,769
T9	25	5,0D _k	0,50	4	0,692	2,641	11,825



Şekil 4.88. Kazıklı radyelerde ZB4 gerilmelerine etki eden değişkenlerin farklı oturma seviyeleri için ana etki grafikleri: a) u_v/L_{er} (%) = 0,05, b) u_v/L_{er} (%) = 0,50, c) u_v/L_{er} (%) = 2,00



Şekil 4.89. Kazıklı radyelerde ZB19 gerilmelerine etki eden değişkenlerin farklı oturma seviyeleri için ana etki grafikleri: a) u_v/L_{er} (%) = 0,05, b) u_v/L_{er} (%) = 0,50, c) u_v/L_{er} (%) = 2,00



Şekil 4.90. Kazıklı radyelerde ZB28 gerilmelerine etki eden değişkenlerin farklı oturma seviyeleri için ana etki grafikleri: a) u_v/L_{er} (%) = 0,05, b) u_v/L_{er} (%) = 0,50, c) u_v/L_{er} (%) = 2,00

Çizelge 4.46. Kazıklı radyelerde ZB4 gerilmesi için ANOVA sonuçları

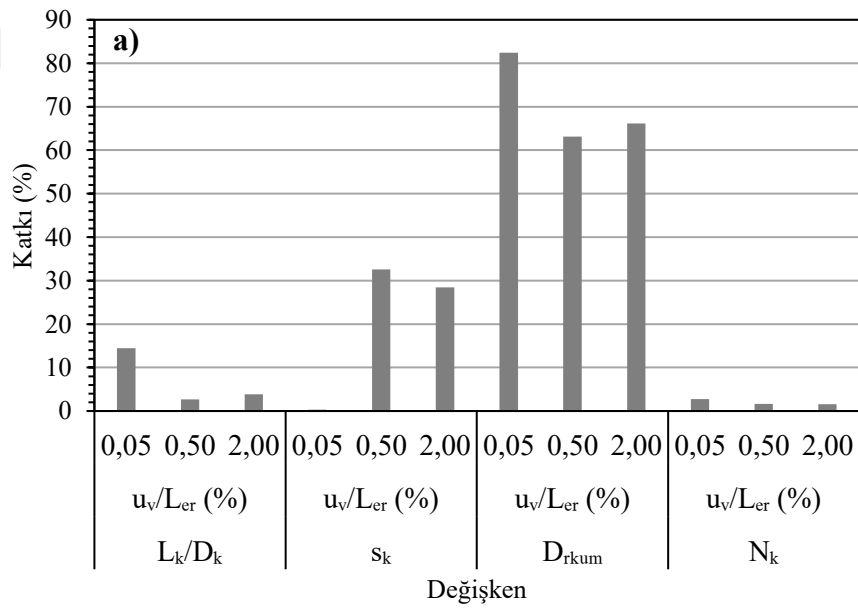
$u_v/L_{er} (\%) = 0,05$				
Kaynak	Serbestlik Derecesi	Kareler Toplamı	Katkı (%)	Ortalama Kare
Model	8	9,131		
L_k/D_k	2	1,322	14,482	0,661
S_k	2	0,030	0,334	0,015
D_{rkum}	2	7,529	82,455	3,764
N_k	2	0,249	2,730	0,125
$u_v/L_{er} (\%) = 0,50$				
Kaynak	Serbestlik Derecesi	Kareler Toplamı	Katkı (%)	Ortalama Kare
Model	8	289,404		
L_k/D_k	2	7,683	2,655	3,841
S_k	2	94,209	32,553	47,105
D_{rkum}	2	182,685	63,125	91,343
N_k	2	4,827	1,668	2,413
$u_v/L_{er} (\%) = 2,00$				
Kaynak	Serbestlik Derecesi	Kareler Toplamı	Katkı (%)	Ortalama Kare
Model	8	5294,104		
L_k/D_k	2	205,458	3,881	102,729
S_k	2	1505,290	28,433	752,645
D_{rkum}	2	3500,949	66,129	1750,475
N_k	2	82,407	1,557	41,203

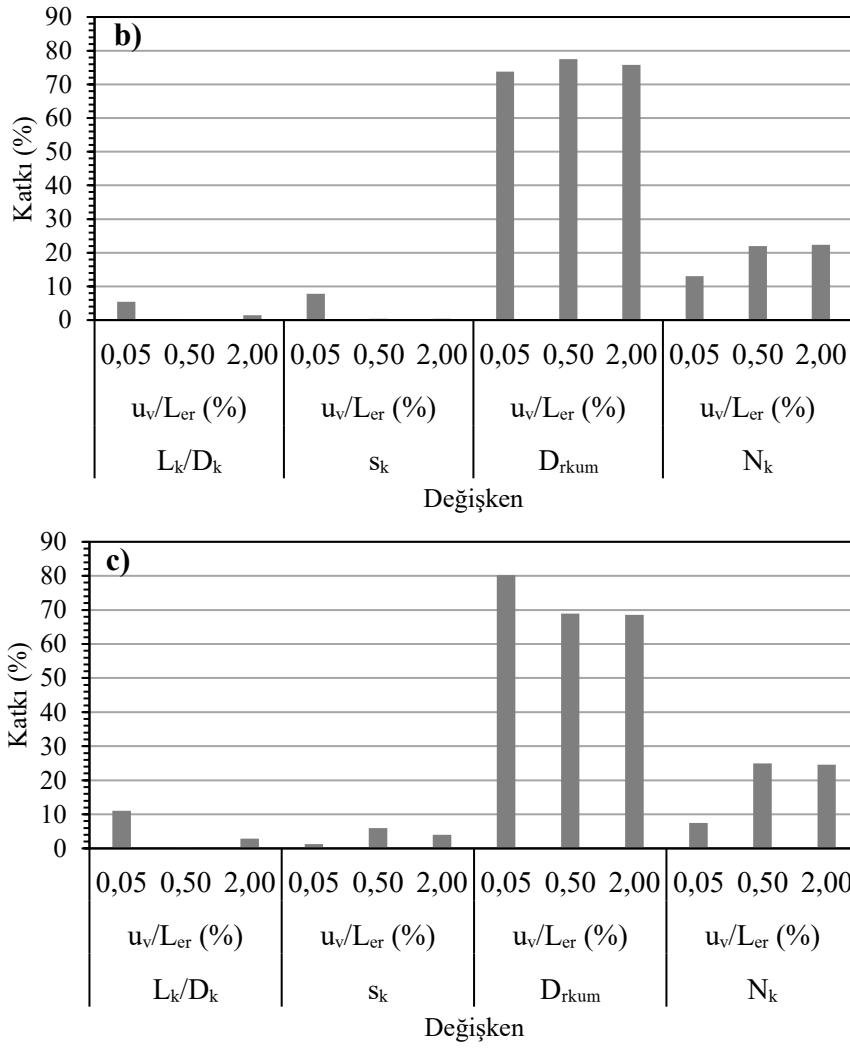
Çizelge 4.47. Kazıklı radyelerde ZB19 gerilmesi için ANOVA sonuçları

$u_v/L_{er} (\%) = 0,05$				
Kaynak	Serbestlik Derecesi	Kareler Toplamı	Katkı (%)	Ortalama Kare
Model	8	64,678		
L_k/D_k	2	3,488	5,393	1,744
S_k	2	5,036	7,787	2,518
D_{rkum}	2	47,706	73,759	23,853
N_k	2	8,448	13,061	4,224
$u_v/L_{er} (\%) = 0,50$				
Kaynak	Serbestlik Derecesi	Kareler Toplamı	Katkı (%)	Ortalama Kare
Model	8	6270,812		
L_k/D_k	2	9,986	0,159	4,993
S_k	2	24,055	0,384	12,027
D_{rkum}	2	4857,744	77,466	2428,872
N_k	2	1379,027	21,991	689,514
$u_v/L_{er} (\%) = 2,00$				
Kaynak	Serbestlik Derecesi	Kareler Toplamı	Katkı (%)	Ortalama Kare
Model	8	79829,344		
L_k/D_k	2	1134,083	1,421	567,041
S_k	2	353,723	0,443	176,862
D_{rkum}	2	60508,800	75,798	30254,400
N_k	2	17832,739	22,339	8916,369

Çizelge 4.48. Kazıklı radyelerde ZB28 gerilmesi için ANOVA sonuçları

$u_v/L_{er} (\%) = 0,05$				
Kaynak	Serbestlik Derecesi	Kareler Toplamı	Katkı (%)	Ortalama Kare
Model	8	2,288		
L_k/D_k	2	0,253	11,053	0,126
s_k	2	0,029	1,274	0,015
D_{rkum}	2	1,836	80,239	0,918
N_k	2	0,170	7,434	0,085
$u_v/L_{er} (\%) = 0,50$				
Kaynak	Serbestlik Derecesi	Kareler Toplamı	Katkı (%)	Ortalama Kare
Model	8	320,729		
L_k/D_k	2	0,763	0,238	0,381
s_k	2	19,060	5,943	9,530
D_{rkum}	2	221,014	68,910	110,507
N_k	2	79,892	24,910	39,946
$u_v/L_{er} (\%) = 2,00$				
Kaynak	Serbestlik Derecesi	Kareler Toplamı	Katkı (%)	Ortalama Kare
Model	8	5085,047		
L_k/D_k	2	143,820	2,828	71,910
s_k	2	204,016	4,012	102,008
D_{rkum}	2	3486,831	68,570	1743,416
N_k	2	1250,380	24,589	625,190





Şekil 4.91. Kazıklı radyelerde oturma seviyelerinin değişimleri ile değişkenlerin zeminde meydana gelen gerilmelerin değişimine katkı dereceleri: a) ZB4, b) ZB19, c) ZB28

Sayısal analizlerden ve deneylerden elde edilen ZB gerilmeleri arasındaki ilişki Çizelge 4.49-4.51 ve Şekil 4.92 ile incelenmiştir. Sayısal analizler üç farklı ölçüm noktasındaki zemin gerilme artışlarını birbirine çok yakın seviyede tahmin edebilmiştir. ZB'ler için çizilen gerilme grafikleri ile Şekil 4.93-4.96 arasında örnek olarak verilen (Diğer sayısal analiz gerilme dağılımları EK-1'de verilmiştir) sayısal analiz gerilme dağılımlarının tutarlılığı da bunu ortaya koymuştur. Ayrıca ortalama MAPE değerlerinin ZB4, ZB19 ve ZB28 için sırasıyla %6,16, %6,14 ve %6,00 olması; ortalama R^2 değerlerinin ZB4, ZB19 ve ZB28 için sırasıyla 0,991, 0,991 ve 0,992 olması ise tutarlılığın yüksek olduğuna işaret etmektedir. Bu tutarlılık, modelin gerilme dağılımını derinlik ve konumdan bağımsız olarak aynı doğrulukta yakalayabildiğini göstermiştir. Ortalama sayısal/deney oranları %93,99-%94,06 aralığında olup sayısal analizlerin deneye göre sistematik olarak düşük gerilme tahmin etme eğiliminin zemin içindeki tüm

konumlarda homojen biçimde dağıldığını göstermiştir. Tahmin performansı hem oturma seviyesinden hem de ölçüm konumundan büyük ölçüde bağımsız olmuştur.

Çizelge 4.49. Kazıklı radyelerde deney ve sayısal analizler ile ZB4 için elde edilen zeminde meydana gelen gerilmelerin karşılaştırılmasında kullanılan göstergeler

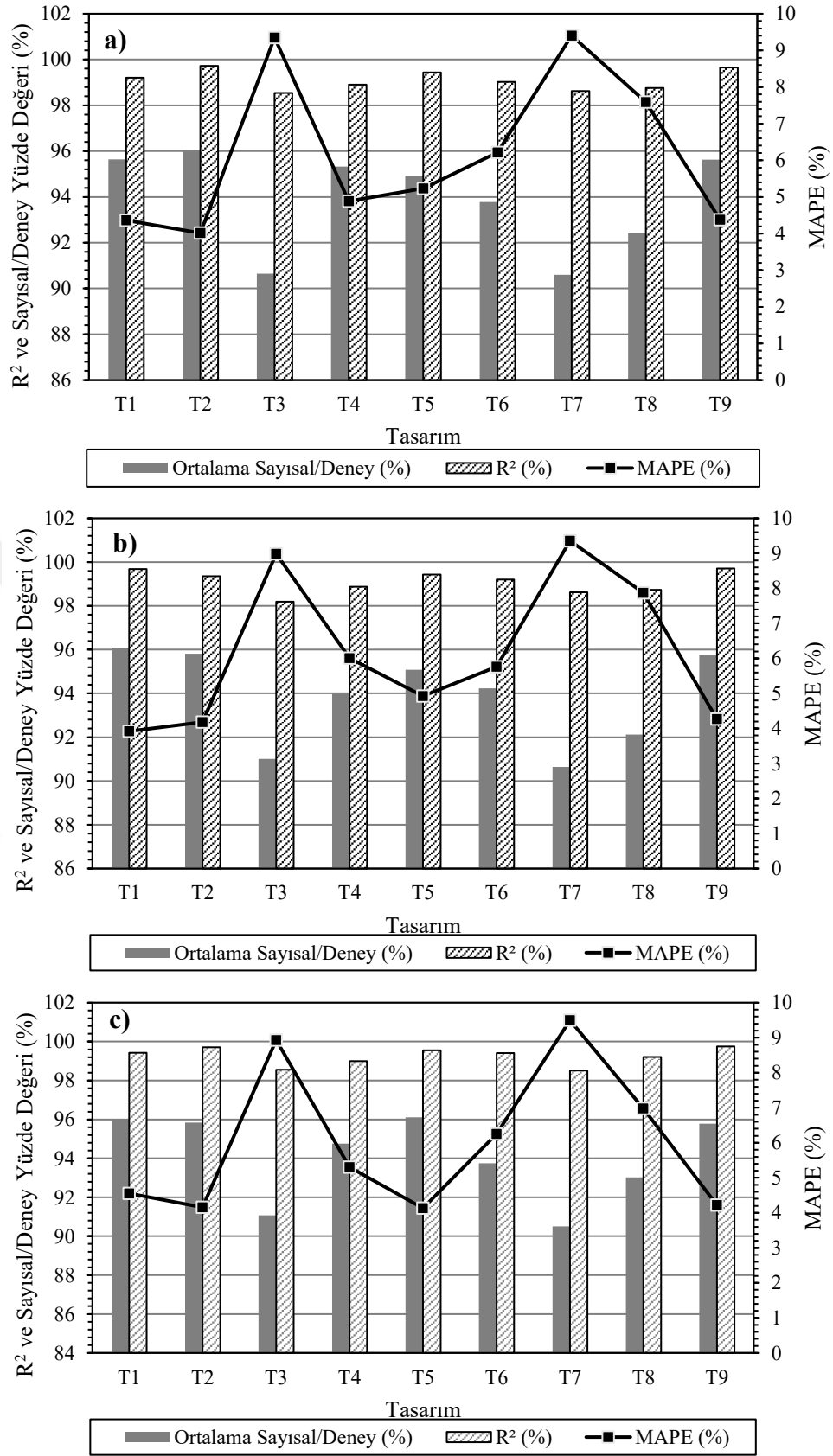
Tasarım	MAPE (%)	En Küçük Sayısal/Deney (%)	En Büyük Sayısal/Deney (%)	Ortalama Sayısal/Deney (%)	R ² (%)
T1	4,36	89,24	100,00	95,64	0,992
T2	4,01	95,47	96,53	95,99	0,997
T3	9,35	88,93	93,21	90,65	0,985
T4	4,89	88,02	102,24	95,33	0,989
T5	5,23	93,06	102,21	94,93	0,994
T6	6,22	88,88	95,25	93,78	0,990
T7	9,40	87,84	92,97	90,60	0,986
T8	7,59	83,98	94,28	92,41	0,988
T9	4,37	94,07	97,34	95,63	0,997
Ortalama	6,16	89,94	97,11	93,88	0,991

Çizelge 4.50. Kazıklı radyelerde deney ve sayısal analizler ile ZB19 için elde edilen zeminde meydana gelen gerilmelerin karşılaştırılmasında kullanılan göstergeler

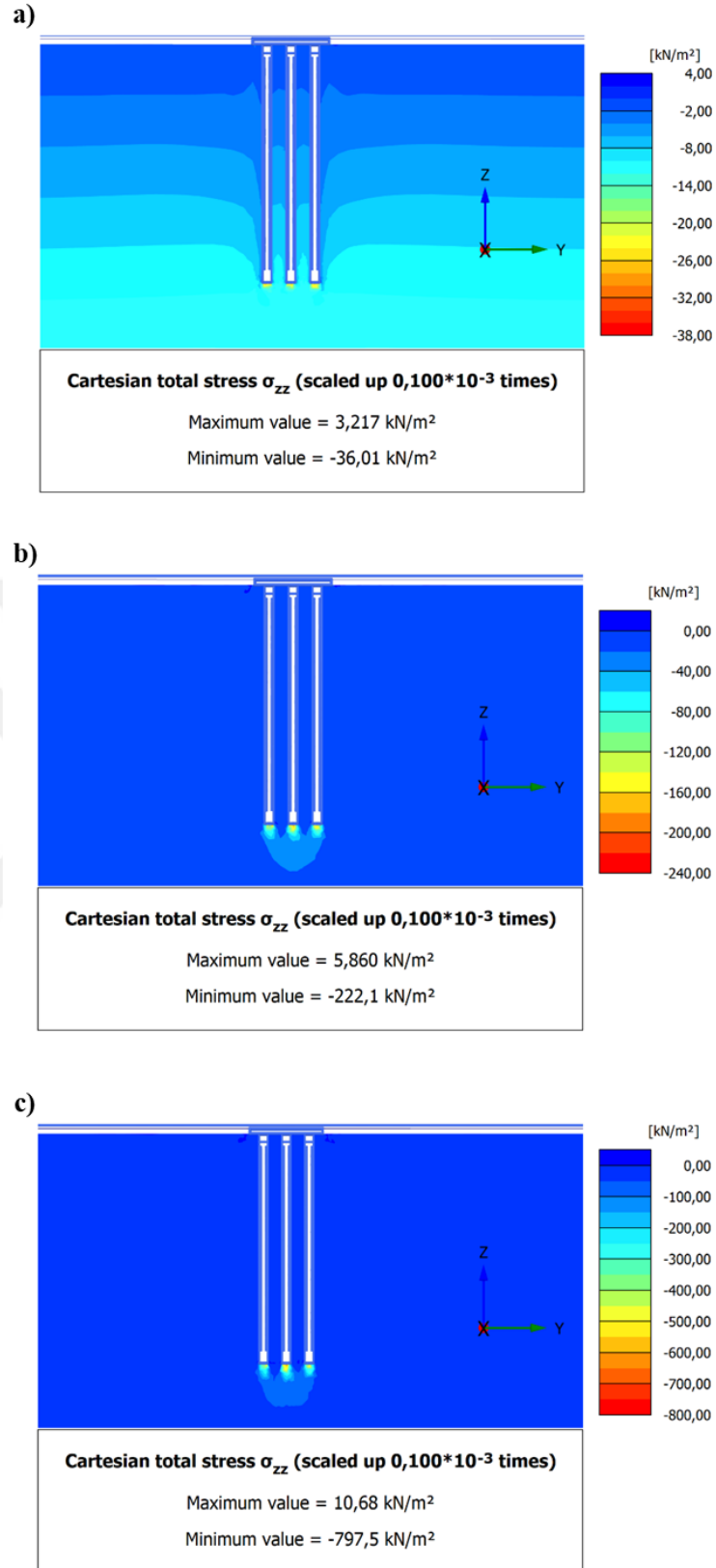
Tasarım	MAPE (%)	En Küçük Sayısal/Deney (%)	En Büyük Sayısal/Deney (%)	Ortalama Sayısal/Deney (%)	R ² (%)
T1	3,92	93,77	100,00	96,08	0,997
T2	4,19	90,37	96,62	95,81	0,994
T3	8,98	88,58	93,21	91,02	0,982
T4	6,00	89,14	99,96	94,00	0,989
T5	4,92	92,94	99,55	95,08	0,994
T6	5,76	92,52	95,44	94,24	0,992
T7	9,36	87,93	92,90	90,64	0,986
T8	7,88	90,16	94,30	92,12	0,987
T9	4,27	94,28	97,10	95,73	0,997
Ortalama	6,14	91,08	96,56	93,86	0,991

Çizelge 4.51. Kazıklı radyelerde deney ve sayısal analizler ile ZB28 için elde edilen zeminde meydana gelen gerilmelerin karşılaştırılmasında kullanılan göstergeler

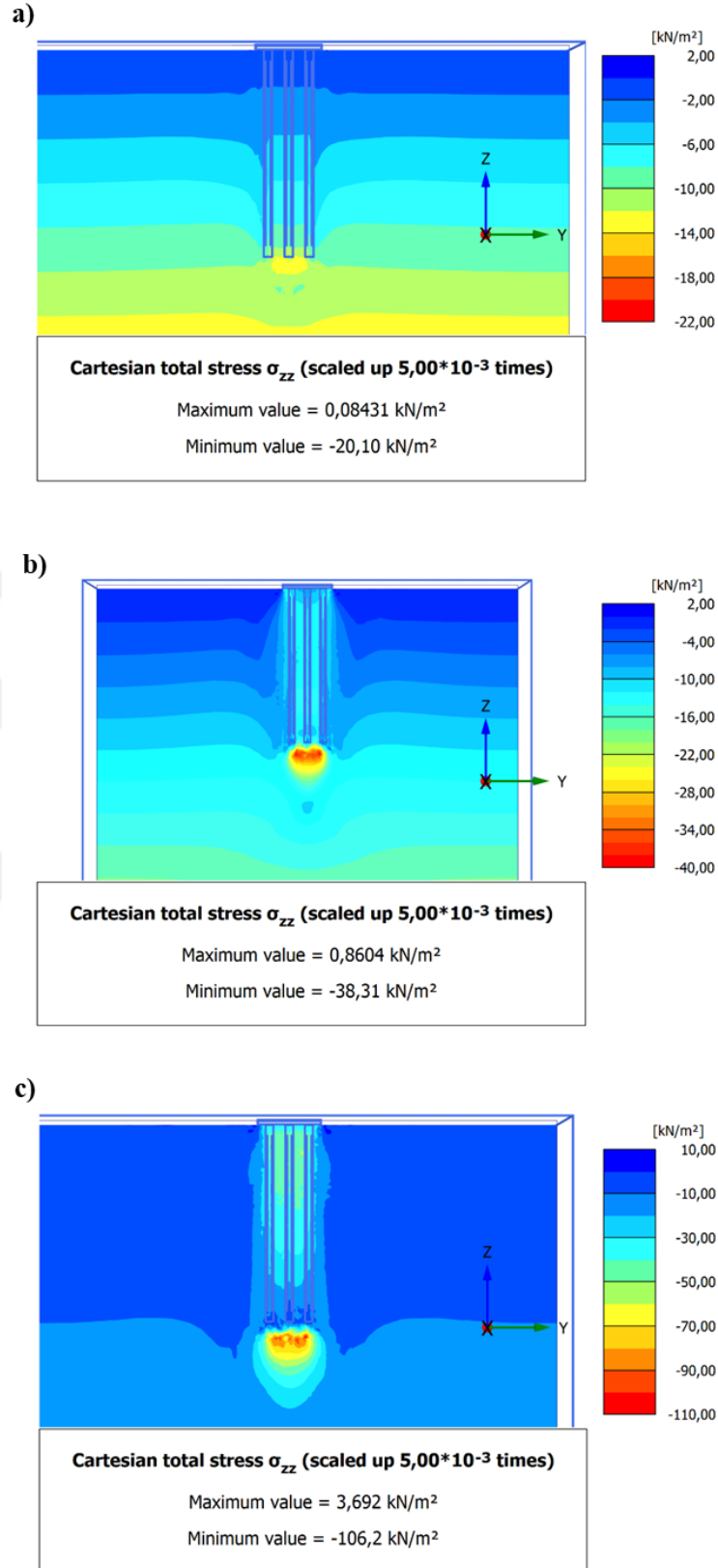
Tasarım	MAPE (%)	En Küçük Sayısal/Deney (%)	En Büyük Sayısal/Deney (%)	Ortalama Sayısal/Deney (%)	R ² (%)
T1	4,55	91,14	107,62	96,01	0,994
T2	4,16	95,15	96,57	95,84	0,997
T3	8,93	88,70	93,33	91,07	0,986
T4	5,31	88,90	100,87	94,76	0,990
T5	4,13	93,08	101,72	96,11	0,996
T6	6,25	92,51	95,18	93,75	0,994
T7	9,50	86,44	93,29	90,50	0,985
T8	6,98	90,97	94,51	93,02	0,992
T9	4,22	94,38	97,34	95,78	0,997
Ortalama	6,00	91,25	97,83	94,09	0,992



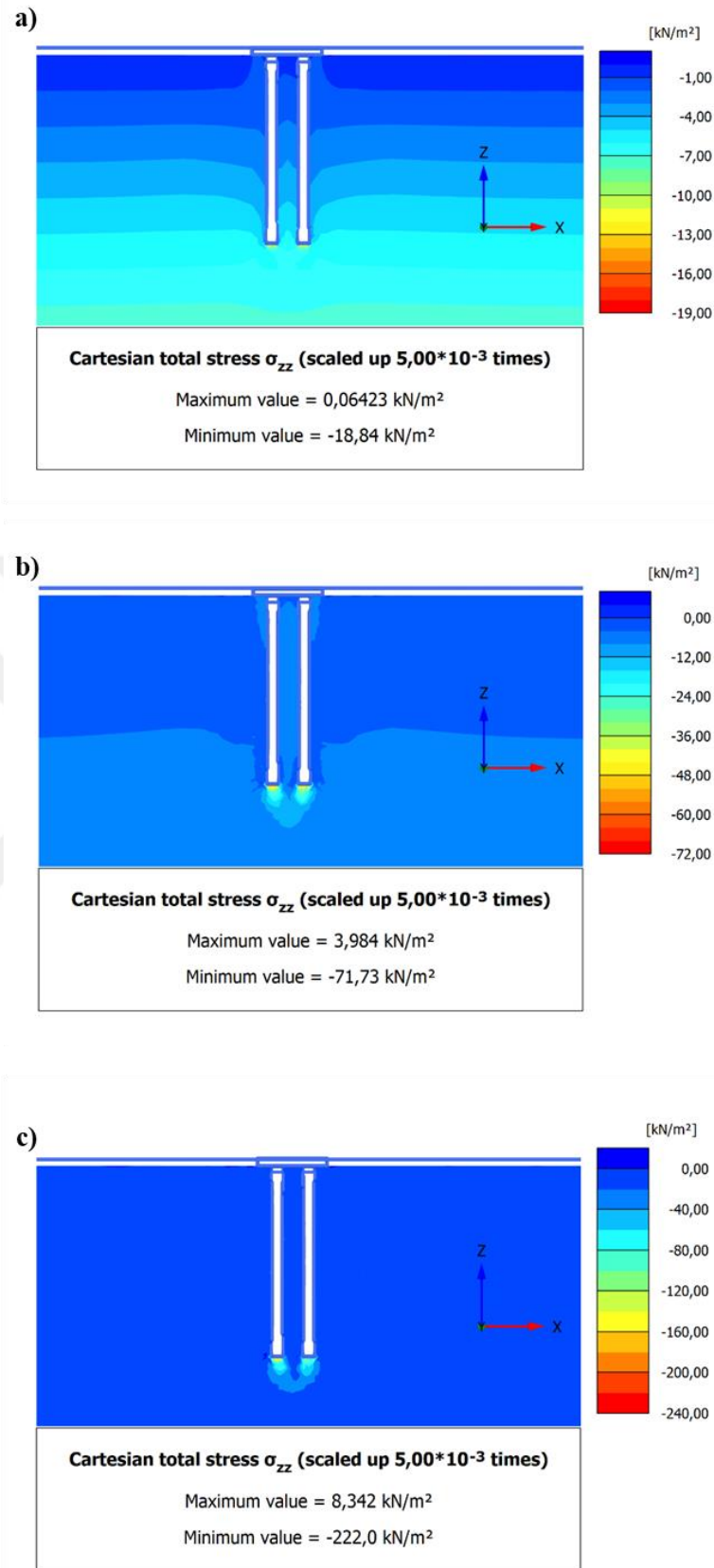
Şekil 4.92. Kazıklı radyelerde zeminde meydana gelen gerilmelerin sayısal analiz ve deney verilerinin kıyaslanmasında kullanılan göstergelerin tasarımlara göre değişimi: a) ZB4, b) ZB19, c) ZB28



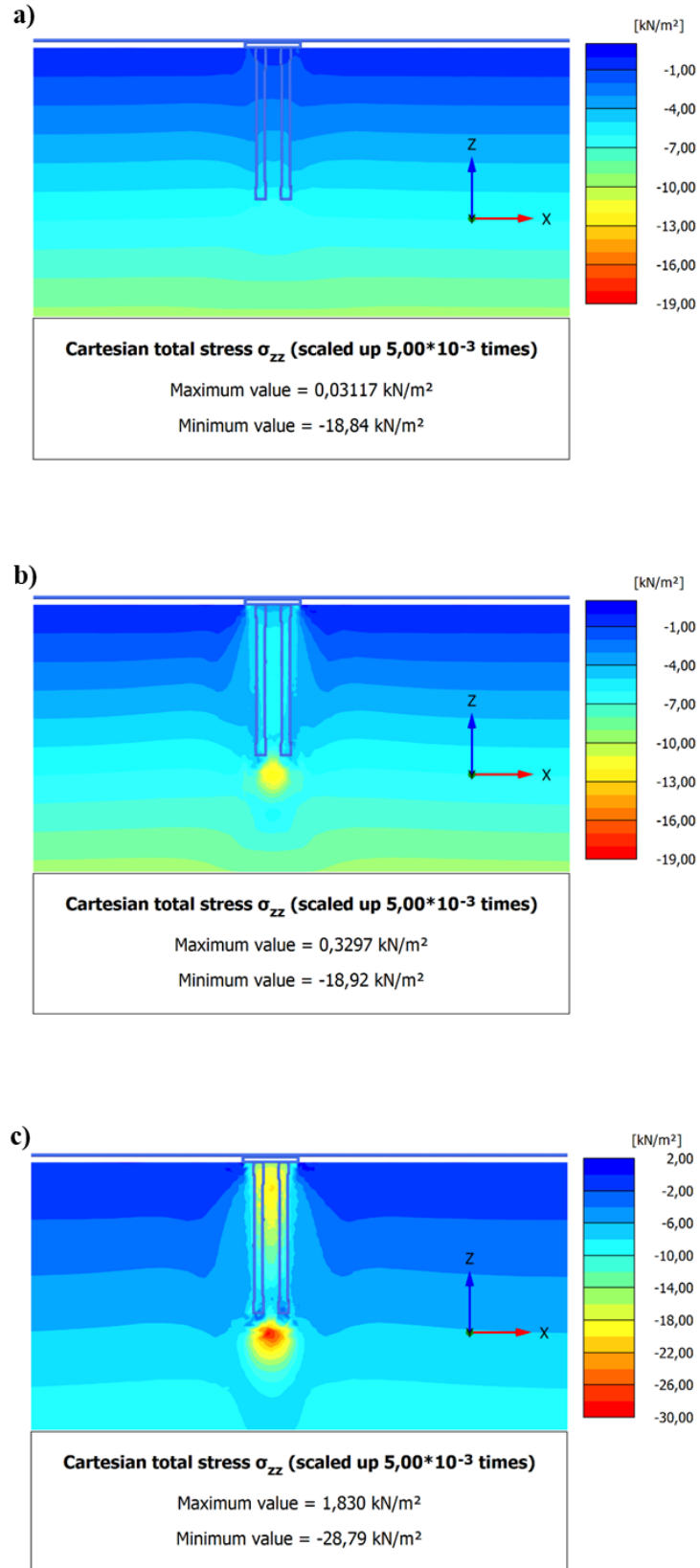
Şekil 4.93. T7 tasarımında farklı oturma seviyeleri için sayısal analiz ile elde edilmiş düşey gerilmelerin 1-1 aksından geçen düşey düzlemde dağılımı: a) u_v/L_{er} (%) = 0,05, b) u_v/L_{er} (%) = 0,50, c) u_v/L_{er} (%) = 2,00



Şekil 4.94. T7 tasarımında farklı oturma seviyeleri için sayısal analiz ile elde edilmiş düşey gerilmelerin 2-2 aksından geçen düşey düzlemde dağılımı: a) u_v/L_{er} (%) = 0,05, b) u_v/L_{er} (%) = 0,50, c) u_v/L_{er} (%) = 2,00



Şekil 4.95. T1 tasarımında farklı oturma seviyeleri için sayısal analiz ile elde edilmiş düşey gerilmelerin 1-1 aksından geçen düşey düzlemde dağılımı: a) u_v/L_{cr} (%) = 0,05, b) u_v/L_{cr} (%) = 0,50, c) u_v/L_{cr} (%) = 2,00



Şekil 4.96. T7 tasarımında farklı oturma seviyeleri için sayısal analiz ile elde edilmiş düşey gerilmelerin 2-2 aksından geçen düşey düzlemde dağılımı: a) u_v/L_{er} (%) = 0,05, b) u_v/L_{er} (%) = 0,50, c) u_v/L_{er} (%) = 2,00

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

5.1. Sonuçlar

İlk aşamasında GGH'nin performansının incelendiği ve ikinci aşamasından GGH'li tekil kazık ve kazıklı radye sistemlerinin davranışının araştırıldığı bu tez çalışmasında aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır:

- GGH'nin 36,48 MPa'ya kadar çıkabilen basınç dayanımı ve 6,68 MPa'ya kadar çıkabilen eğilme dayanımı, inşaat sektöründe yaygın olarak kullanılan çimentolu harç kadar mekanik performansa sahip olabileceğini göstermiştir. Bu tatmin edici performans GGH'nin yapısal elemanlarda kullanımını mümkün hale getirmektedir. GGH'nin eğilme dayanımının basınç dayanımına oranı 0,306'ya kadar çıkabilmiştir. Bu durum GGH'nin çimentolu harca göre daha yüksek eğilme dayanımına sahip olduğunu ortaya koymaktadır.
- Mekanik performansının yanında 24 cm kadar olabilen yayılma değerleri GGH'nin işlenebilirlik özelliği bakımından kolay bir şekilde kullanılabilceğini ortaya koymuştur. Böylece uygulamada rahat bir şekilde karıştırma, taşıma ve yerleştirme işlemleri gerçekleştirilebilecektir.
- GGH'nin 777 dk olabilen priz başlangıç süresinin geleneksel çimentolu harçlara göre oldukça yüksek olduğu belirlenmiştir. Priz başlangıç süresinin uzun tutulması gereken uygulamalar için GGH'nin çimentolu harca göre daha uygun olabileceği öngörülmektedir.
- $MgSO_4$ ve NaCl çözeltilerinde bekletme sonunda GGH'lerin mekanik performansında bir olumsuzluk gözlenmemiş, basınç ve eğilme dayanımları toplamda 6 ay devam eden bekletme süresi boyunca artmaya devam etmiştir. GGH'lerin kütleleri de bu süre zarfında sürekli artmıştır. Buna göre GGH, $MgSO_4$ ve NaCl içeren zemin veya su ortamında kullanılmak için uygun bir malzeme olmaktadır.
- SEM ve XRD analizleri ile tez çalışmasında kullanılan değişkenlerin ve seviyelerinin yeterli performansa sahip GGH üretilmesi için uygun olduğu belirlenmiştir. Bu analizlere göre GGH'de geopolimerizasyonun gerçekleştiğinin göstergesi olan N-A-S-H ve YFC'den karışıma dahil olan CaO nedeniyle meydana gelen C-S-H varlığı başarılı bir şekilde geopolimer harç üretildiğine işaret etmektedir. Basınç ve eğilme dayanımlarının incelenmesinin yanında SEM

ve XRD analizlerinde NaCl ve MgSO₄ çözeltilerinde bekletme sonunda meydana gelebilecek zararlı ürünlerin gözlenmemiş olması da GGH'nin zararlı ortam koşullarına dayanıklı yapısını ortaya koymaktadır.

- GGH'lerin yayılma, işlenebilirlik ve mekanik performansının araştırılmasında sistematik bir şekilde kullanılan KET ve MKT'nin güçlü deneysel tasarım yöntemleri olduğu belirlenmiştir. Özellikle MKT ile yapılan ANOVA sonucunda; istatistiksel olarak anlamlı model oluşturulabilmesi, değişkenlerin ana etki, ikili etkileşim ve ikinci dereceden terimlerinin performans üzerindeki etkilerinin incelenmesi, model formülü katsayılarının elde edilmesi ve optimum harcın belirlenmesi önemli olmuştur. Bu yöntemle, doğal şartlarda oluşturulması gereken çok fazla sayıda karışıma gerek kalmamış ve tasarım uzayını doğru bir şekilde temsil edebilen bir tasarım oluşturulabilmiştir. Deneysel tasarım yöntemlerinin gücü bu bakımdan yadsınamaz olarak kabul edilmelidir.
- GGH'nin basınç ve eğilme dayanımlarının değerlendirilmesi için ikinci dereceden modeller uygun olmuş; bu özellikleri en çok GDBA/Karışım, AÇ/ÖM, YFC/ÖM ve (SD/ÖM)² terimleri etkilemiştir. Buna göre ÖM'nin yapısı ve içeriği mekanik performansı doğrudan etkilemektedir. İşlenebilirlik (yayılma değerleri) ikinci dereceden bir model ile temsil edilebilmiş; fakat ana etki terimlerinin çok etkili olması nedeniyle doğrusal bir model davranışı uygun olmuştur.
- Optimum GGH'nin SD/ÖM, YFC/ÖM, AÇ/ÖM ve GDBA/ÖM oranları sırasıyla 0,269, 0,332, 1,05 ve 0,556 olmuştur. Buna göre benzer değişkenler ile yapılacak deneysel çalışma veya uygulamada gerekli performans için bu karışımın kullanılması uygun olacaktır. Ayrıca belirtmek gerekir ki bu oranların elde edilebilmesi MKT'nin başarısıdır.
- Literatürde GGH'de SD/ÖM, YFC/ÖM, AÇ/ÖM ve GDBA/ÖM değişkenlerinin kullanıldığı, performansın ve zararlı ortam şartlarındaki davranışın deneysel tasarım yöntemleriyle istatistiksel olarak incelendiği ve uygun karışımlar ile optimum tasarımın sunulduğu başka bir çalışma mevcut değildir. Bu özelliği bakımından tez çalışması geniş kapsamlı bir çalışmadır. Tez Çalışması ile bu konuya önemli bir katkıda bulunulduğu düşünülmektedir.
- Tekil kazıklarda taşınan kuvvetin u_v/D_k , D_{rkum} ve L_k/D_k arttıkça yükseldiği görülmüştür. Bu değişkenlere bağlı olarak kurulan istatistiksel model ile hem değişkenler arasındaki etkileşimlerin hem de D_{rkum} ile u_v/D_k 'nin ikinci dereceden terimlerinin etkili olduğu belirlenmiştir. Oturma ve rölatif sıklığın taşınan

kuvvetlerin değişimine etkisinin büyük olduğu belirlenmiş, kazık boyunun etkisi bunlara göre daha zayıf kalmıştır. Oturma seviyesinden bağımsız olarak, benzer geometri koşullarında kapasite artışı yalnız kazık boyu ile değil, zeminin kayma direnci ve rijitliğindeki artışla belirgin biçimde değişebilmiştir.

- Tekil kazıklarda çevre sürtünmesi/eksenel kuvvet oranı küçük oturmalarda yüksek, büyük oturmalarda ise düşük olmuştur. Buna göre, ilk harekete geçme evresinde çevre sürtünmesi baskınken, oturma arttıkça kazık ucuna iletilen eksenel kuvvetin görelî payı artmaktadır. İstatistiksel analiz sonucunda en etkili değişken çok baskın bir biçimde u_v/D_k olmuştur. L_k/D_k artışı çevre sürtünmesini görelî olarak artırırken oturmalar arttıkça etkisi azalmıştır. D_{rkum} artışı ise genel olarak çevre sürtünmesi/eksenel kuvvet oranını uç direncinin artmasına daha büyük katkı sağladığından düşürmüştür.
- Tekil kazıklarda zemin basınç ölçerlerden elde edilen sonuçlarda bütün tasarımlar için $ZB1 > ZB4 > ZB8$ sıralaması korunmuştur. Bu durum, kazık alt ucunda oluşan gerilme etkisinin derinlikle hızlı biçimde sönümlendiğini ve gerilme aktarımının esas olarak uç çevresine oldukça yakın bir bölgede yoğunlaştığını göstermektedir. İstatistiksel analiz ile gerilmeler üzerinde de en önemli etkinin u_v/D_k 'ye ait olduğu belirlenmiştir. D_{rkum} artışı sensör konumu derinleştikçe daha önemli hale gelmiştir. L_k/D_k artışının etkisi daha sınırlı olmuştur.
- Tekil kazıklar için incelenen tüm davranışlarda deneysel çalışmalar ve sayısal analizler arasında genel olarak düşük MAPE ve yüksek R^2 değerleri elde edilmiş olması yüksek uyum olduğunu göstermektedir. Buna göre, sayısal modeller davranışları başarıyla temsil edebilmiştir. Çoğu durumda deney sonuçları sayısal analiz sonuçlarına göre daha yüksek olmuştur. Bu nedenle, özellikle kapasite ile ilgili tasarımlarda sayısal analizlerin güvenli tarafta kaldığı belirlenmiştir.
- Kazıklı radye tarafından taşınan toplam gerilme tüm tasarımlarda doğrusal olmayan biçimde artmıştır. D_{rkum} toplam gerilme üzerinde en etkili değişken olup, etkisi oturma seviyesinin artmasıyla birlikte büyümüştür. L_k/D_k ise özellikle çevre sürtünmesinin harekete geçmeye devam ettiği küçük oturma seviyelerinde etkili olmuştur. Bu durum, kazık uzunluğunun kullanım yükleri altındaki performansta önemli bir rol oynadığını göstermektedir.
- Kazık yük paylaşım oranı, tüm tasarımlarda oturma seviyesi arttıkça azalmıştır. Bu azalış, u_v/L_{er} %0,05-%0,50 arasıdayken çok belirginken u_v/L_{er} %2'ye doğru arttıkça azalmıştır. Bu asimetrik davranış, kazık çevre sürtünme kapasitesinin orta

oturma seviyesinde büyük ölçüde tam olarak harekete geçtiğini ortaya koymaktadır. Yük paylaşımı üzerinde s_k açık ara en etkili değişken olmuştur. Geniş kazık aralıklı tasarımlarda büyük oturma seviyesinde kazıklı radye sisteminde radyenin etkili olduğu davranış baskın olunca, radye boyutlarını etkileyen s_k 'nin etkisi büyük oturma seviyesinde de yüksek olmuştur.

- Kazıklı radyelerde OÇS/OEK oranı oturma seviyesi arttıkça hızlı bir biçimde düşmüştür. Küçük oturma seviyesinde tüm tasarımlarda OÇS/OEK oranı 1'den büyük olup kazıklar sürtünme kazığı davranışı sergilerken, büyük oturma seviyesinde uç direncinin baskın geldiği tasarımlar olmuştur. Bu geçişi belirleyen esas değişken L_k/D_k olup, L_k/D_k 20'den fazlayken bile kazıklar büyük oturmalarda dahi yüksek çevre sürtünme değerlerine sahip olabilmektedir. D_{rkum} artışıyla uç direncinin daha düşük oturma seviyelerinde harekete geçebilmesi nedeniyle, küçük oturma seviyesinde OÇS/OEK oranı sıklıkla arttıkça azalmış; ancak bu etki büyük oturma seviyesinde zayıflamıştır.
- Kazıklı radyelerde zemin içindeki gerilme değişimi açık bir şekilde konum ve derinliğe bağlı olmuştur. Kazık ucu seviyesindeki köşe kazık hizasında (ZB19), radye altına (ZB4) ve kazık altı ara bölgeye (ZB28) kıyasla 3,5–4,6 kat daha büyük gerilme yoğunlaşması gözlenmiştir. Kazık ucu direncinin zemine yoğun bir şekilde gerilme aktarmasıyla bu durum meydana gelmiştir. ZB19'daki gerilme değişimini en çok etkileyen değişkenler D_{rkum} ve N_k olup, çok kazıklı durumda gerilme soğanlarının üst üste gelmesi bu seviyedeki gerilmeyi önemli biçimde artırmıştır. Buna karşılık, ZB4'teki (radye altı) gerilmeleri en çok etkileyen değişken s_k olmuştur. Burada da s_k 'nin radye boyutlarını etkilemesi nedeniyle, radyenin yük payının artmasıyla radye altındaki gerilme yükselmiştir.
- Kazıklı radyeler için yapılan sayısal analizler genel olarak tüm davranışlar için düşük MAPE ve yüksek R^2 değerleri ile tutarlı olmuştur. Kazık yük paylaşım oranı en yüksek tahmin doğruluğuna sahip olup sistematik sapma içermemiştir. Taşınan toplam gerilmeler ile üç farklı derinlikteki zemin basınçlarının sayısal analiz-deney verisi tutarlılığı değişimini ve biçimi birbirine çok yakın olmuş, oturma ve konumdan bağımsız performans sergilemiş ve tutarlı bir düşük tahmin eğilimi göstermiştir. OÇS/OEK oranında ise görece olarak daha yüksek sapma gözlenmiş olup oturma seviyesi değişimine göre tutarlılıkta sapmalar artmıştır.
- Taguchi yönteminin kazıklı radye gibi birçok değişkenin davranışı karmaşık bir şekilde etkilediği geoteknik problemlerinde, davranışı nicel olarak

değerlendirmede ve gerekli deney/analiz sayısını azaltma başarılı bir şekilde kullanılabileceği belirlenmiştir.

- Tez çalışmasında tüm davranış türleri için tekil kazıklarda ve kazıklı radye sistemlerinde sayısal analiz ve deneysel çalışma sonuçlarının uyum derecesinin yüksek olması nedeniyle pekleşen zemin modelinin ve yapılan ağ sıkılaştırmalarının sayısal analizlerde başarılı olduğu belirlenmiştir. MAPE, R^2 ve (sayısal veri)/(deney verisi) göstergelerinin beraber kullanılmasının uyum derecesini değerlendirmede uygun olduğu görülmüştür.
- Tekil kazıklarda ve kazıklı radyelerde kazık elemanının başarılı bir şekilde GGH ile üretilmesi ve deneysel çalışmalarda başarılı bir şekilde kullanılması dahi bu tezin amacının gerçekleştirildiğini göstermiştir. Bunun üzerine tekil kazıkların ve kazıklı radye sistemlerinin davranışının istatistiksel analiz ile (kazıklı radye için Taguchi yöntemi aracılığıyla) incelenmesi değişkenlerin davranışa etkisinin nicel bir şekilde değerlendirilebilmesine imkan sağlamıştır. İstatistiksel analizler ile hem tekil kazık hem de kazıklı radye sistemleri için davranışa etki eden değişkenlerin tek bir optimum değerinin olmadığı, davranış şekline ve oturma seviyelerine göre tasarım değişkenlerinin davranışı etkilediğinin geoteknik mühendisleri tarafından kapsamlı bir şekilde tahlil edilmesi gerektiği belirlenmiştir. Bu konuda literatüre önemli katkı yapılmıştır.

5.2. Öneriler

Tez çalışmasının kapsamı ve elde edilen sonuçlara göre gelecekte yapılacak bilimsel çalışmalar için aşağıdaki hususlar göz önünde bulundurulabilir:

- Tez çalışması her ne kadar kapsamlı bir çalışma olsa da GGH özelliklerinin belirlenebilmesi ile ilgili daha fazla bilimsel çalışmaya ihtiyaç duyulmaktadır. Bu çalışmalarda farklı türde ÖM, AÇ ve GDA kaynağından elde edilmiş agreganın kullanılması ile hem GGH hem de GDA'lı geopolimer malzemelerin davranış farklı geopolimer bileşenlerine göre incelenebilir.
- GGH performansının belirlenebilmesi için literatürdeki çalışmalarda deneysel tasarım yöntemlerinin çoğunlukla kullanılmadığı veya deneme-yanılma yöntemine göre oluşturulmuş tasarımların oluşturulduğu ortaya çıkmaktadır. YYY ve Taguchi yöntemi gibi deneysel tasarım yöntemleri kullanılarak GGH'nin performansına yönelik çalışmaların artırılması gerekmektedir. Böylece

istatistiksel olarak GGH davranışı incelenebilir. GGH performansı ile ilgili diğer özelliklerden olan; fakat bu çalışmada dikkate alınmayan su emme, sorptivite, klor penetrasyonu vb. özelliklerin de deneysel tasarım yöntemleriyle incelenmesi uygun olacaktır.

- GGH'lerin donma-çözülme ve ıslatma-kurutma etkileri altındaki dayanıklılığı da inceleme konusu olmalıdır. Deneysel tasarım yöntemleri ile bu etkiler altındaki GGH'nin dayanıklılığının incelenmesi gerekmektedir.
- Tez çalışmasında özellikleri incelenmiş olan GGH'lerin her ne kadar istenilen performansa sahip olabildiği belirlenmiş olsa da donatı varlığında davranış değişebilir. Deneysel tasarım yöntemleri aracılığıyla donatı varlığında GDBA'lı geopolimer betonların performansının incelenmesi isabetli olacaktır.
- GGH ve GDBA'lı geopolimer betonların kullanımına yönelik bir şartname mevcut değildir. Çevre dostu bir üretim sürecinden geçen ve çimentolu harç/betona yakın veya daha iyi performans gösterebilen geopolimer harç/betonların ilgili şartnamelerde kullanımına yönelik bilimsel çalışmaların yapılması gerekli olmaktadır.
- Tez kapsamında kuru kum zeminde tekil kazıklar ve kazıklı radye sistemleri ile ilgili çalışmalar yürütülmüştür. Taguchi yöntemi veya başka bir yöntemle yapılacak istatistiksel analizlerde zeminde su varlığı, zemin türünün değişmesi, tabakalı zemin, farklı yükleme türü, farklı kazıklı radye yerleşim şekli vb. durum veya özelliklerin değişken olarak dahil edilmesi uygun olabilir.
- Zeminde meydana gelen gerilmeler sadece ayrı bir çalışma olarak ayrıntılı bir şekilde ve gerilme soğanlarının oluşumu ile beraber Taguchi yöntemi veya başka bir yöntemle yapılacak istatistiksel analizler yardımıyla incelenebilir.
- Tekil kazık ve kazıklı radye sistemlerinde sayısal analizlerde pekleşen zemin modeli kullanılmasına rağmen başka zemin modellerinin performansının kıyaslaması istatistiksel analizlerle veya en basit şekilde MAPE, R^2 ve (sayısal veri)/(deney verisi) göstergelerinin beraber kullanılmasıyla yapılabilir.
- Tekil kazık ve kazıklı radye gibi geoteknik problemlerle ilgili deneysel çalışmaların zorluğu göz önüne alınarak, deneysel çalışma yapacak araştırmacılar deneysel tasarım yöntemlerini kullanmalıdır. Taguchi yöntemi veya YYY bu tür çalışmalar için en uygun yöntemler olabilir.
- Kazıklı radye sistemlerinin karmaşık ve iç içe geçmiş etkileşimlerle kontrol edilen doğası nedeniyle, tüm davranışlar için en iyi performansı verecek bir değişken

seviyeleri (değerleri) kombinasyonu mümkün olmamaktadır. Proje tasarımında çalışan geoteknik mühendisleri kazıklı radye sistemleri için tasarım yaparken, farklı davranışları etkileyen değişkenlerin oturma seviyelerine etkilerinin büyük oranda değişebileceğine dikkat ederek düşük, orta ve yüksek oturma seviyelerindeki performansı ayrı ayrı değerlendirmelidir. Bunun için de sayısal analizlerde pekleşen zemin modeli ve sıkılaştırılmış bölgelere sahip sonlu elemanlar ağları kullanarak sayısal analizler gerçekleştirebilir ve gerçek davranışı tahmin etmede fikir sahibi olabilirler.



KAYNAKLAR

- Adediran, A., Yliniemi, J., Carvelli, V., Adesanya, E. ve Illikainen, M., 2022, Durability of alkali-activated Fe-rich fayalite slag-based mortars subjected to different environmental conditions, *Cement and Concrete Research*, 162, 106984, doi.org/[10.1016/j.cemconres.2022.106984](https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2022.106984).
- Afriansya, R., Astuti, P., Ratnadewati, V.S., Randisyah, J., Ramadhona, T.Y. ve Anisa, E.A., 2021, Investigation of setting time and flowability of geopolymers using local industry and agriculture waste as precursor in Indonesia, *GEOMATE Journal*, 21(87), 64–69.
- Aghdam, K.A., Rad, A.F., Shakeri, H. ve Sardroud, J.M., 2018, Approaching green buildings using eco-efficient construction materials: A review of the state-of-the-art, *Journal of Construction Engineering and Project Management*, 8(3), 1–23, doi.org/[10.6106/JCEPM.2018.8.3.001](https://doi.org/10.6106/JCEPM.2018.8.3.001).
- Albitar, M., Mohamed Ali, M.S., Visintin, P. ve Drechsler, M., 2017, Durability evaluation of geopolymer and conventional concretes, *Construction and Building Materials*, 136, 374–385, doi.org/[10.1016/j.conbuildmat.2017.01.056](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.01.056).
- Alloul, A., Amar, M., Benzerzour, M. ve Abriak, N.-E., 2023, Geopolymer mortar with flash-calcined sediments cured under ambient conditions, *Construction and Building Materials*, 391, 131809, doi.org/[10.1016/j.conbuildmat.2023.131809](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.131809).
- Almaged, R.K.M. ve Al-Abbas, K.A., 2024, Numerical and experimental comparison study of piled raft foundation, *Open Engineering*, 14(1), doi.org/[10.1515/eng-2022-0533](https://doi.org/10.1515/eng-2022-0533).
- Al-Mosawi, M.J., Fattah, M.Y. ve Al-Zayadi, A.A.O., 2011, Experimental observations on the behavior of a piled raft foundation, *Journal of Engineering*, 17(4), 807–828, doi.org/[10.31026/j.eng.2011.04.13](https://doi.org/10.31026/j.eng.2011.04.13).
- Alshenawy, A.O., Alrefeai, T.O. ve Alsanabani, N.M., 2016, Analysis of piled raft coefficient and load-settlement on sandy soil, *Arabian Journal of Geosciences*, 9, 475, doi.org/[10.1007/s12517-016-2494-7](https://doi.org/10.1007/s12517-016-2494-7).
- ASTM C88, 2018, Standard test method for soundness of aggregates by use of sodium sulfate or magnesium sulfate, West Conshohocken, PA, A.B.D., ASTM International.
- ASTM C109, 2020, Standard test method for compressive strength of hydraulic cement mortars (using 2-in. or [50-mm] cube specimens), West Conshohocken, PA, A.B.D., ASTM International.
- ASTM C128, 2022, Standard test method for relative density (specific gravity) and absorption of fine aggregate, West Conshohocken, PA, A.B.D., ASTM International.

- ASTM C131, 2020, Standard test method for resistance to degradation of small-size coarse aggregate by abrasion and impact in the Los Angeles machine, West Conshohocken, PA, A.B.D., ASTM International.
- ASTM C348, 2021, Standard test method for flexural strength of hydraulic-cement mortars, West Conshohocken, PA, A.B.D., ASTM International.
- ASTM C807, 2021, Standard test method for time of setting of hydraulic cement mortar by modified vicat needle, West Conshohocken, PA, A.B.D., ASTM International.
- ASTM C1437, 2020, Standard test method for flow of hydraulic cement mortar, West Conshohocken, PA, A.B.D., ASTM International.
- ASTM D854, 2014, Standard test methods for specific gravity of soil solids by water pycnometer, West Conshohocken, PA, A.B.D., ASTM International.
- ASTM D2487, 2017, Standard practice for classification of soils for engineering purposes (unified soil classification system), West Conshohocken, PA, A.B.D., ASTM International.
- ASTM D4253, 2016, Standard test methods for maximum index density and unit weight of soils using a vibratory table, West Conshohocken, PA, A.B.D., ASTM International.
- ASTM D4254, 2016, Standard test methods for minimum index density and unit weight of soils and calculation of relative density, West Conshohocken, PA, A.B.D., ASTM International.
- Ateş, B. ve Şadoğlu, E., 2022, Experimental and numerical investigation of load sharing ratio for piled raft foundation in granular soils. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 26(4), 1662–1673, doi.org/10.1007/s12205-022-1022-4
- Aygörmez, Y. ve Canpolat, O., 2022, Research on resistance to sulfate and chloride of reinforced metakaolin-based geopolymers, *International Journal of Sustainable Construction Engineering and Technology*, 13(1), 87–101.
- Bajad, S.P. ve Sahu, R.B., 2008, An experimental study on the behaviour of vertically loaded piled raft on soft clay, *12th International Conference of International Association for Computer Methods and Advances in Geomechanics (IACMAG)*, Goa, Hindistan, 1–6.
- Bakharev, T., 2005, Durability of geopolymer materials in sodium and magnesium sulfate solutions, *Cement and Concrete Research*, 35(6), 1233–1246, doi.org/10.1016/j.cemconres.2004.09.002.
- Bernal, S.A., Gutiérrez, R.M. ve Provis, J.L., 2012, Engineering and durability properties of concretes based on alkali-activated granulated blast furnace slag/metakaolin blends, *Construction and Building Materials*, 33, 99–108, doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.01.017.

- Bhaduri, A. ve Choudhury, D., 2020, Serviceability-based finite-element approach on analyzing combined pile–raft foundation, *International Journal of Geomechanics*, 20(2), 04019178, doi.org/[10.1061/\(ASCE\)GM.1943-5622.0001580](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GM.1943-5622.0001580).
- Box, G.E. ve Wilson, K.B., 1951, On the experimental attainment of optimum conditions, *Journal of the Royal Statistical Society*, 13(1), 1–38.
- Bralović, N., Despotović, I. ve Kukaras, D., 2023, Experimental analysis of the behaviour of piled raft foundations in loose sand, *Applied Sciences*, 13(1), 546, doi.org/[10.3390/app13010546](https://doi.org/10.3390/app13010546).
- BS EN 1015-11, 2019, Methods of test for mortar for masonry determination of flexural and compressive strength of hardened mortar, British Standards Institution.
- BS EN 8500-2, 2006, Concrete: Complementary british standard to BE En 206-1: Part 1: Method of specifying and guidance for the specifier, British Standards Institution.
- BS-EN 12390-3, 2019, Testing hardened concrete - Part 3 : Compressive strength of test specimens, British Standards Institution.
- Budhu, M., 2010, Soil mechanics and foundations, *Wiley*, Hoboken, NJ, A.B.D.
- Burland, J.B., 1995, ‘Piles as settlement reducers’, *XIX Convegno Italiano di Geotecnica*, 2, 21–34.
- Chanda, D., Saha, R., Haldar, S., Nayak, B.C. ve and, E.V.K., 2023, Scaled modeled tests and finite element numerical study on lateral responses of PRF system under V-H-M loading, *Geomechanics and Geoengineering*, 18(4), 321–345, doi.org/[10.1080/17486025.2022.2048092](https://doi.org/10.1080/17486025.2022.2048092).
- Chandiwala, A.K. ve Vasanwala, S.A., 2023, Experimental investigation of circular piled raft foundation under vertical load in cohesionless soil, *Asia-Pacific Journal of Science and Technology*, 28(6), 10, doi.org/10.14456/apst.2023.108
- Chindaprasirt, P., De Silva, P., Sagoe-Crentsil, K. ve Hanjitsuwan, S., 2012, Effect of SiO₂ and Al₂O₃ on the setting and hardening of high calcium fly ash-based geopolymer systems’, *Journal of Materials Science*, 47(12), 4876–4883, doi.org/[10.1007/s10853-012-6353-y](https://doi.org/10.1007/s10853-012-6353-y).
- Clancy, P. ve Randolph, M.F., 1996, Simple design tools for piled raft foundations, *Géotechnique*, 46(2), 313–328, doi.org/[10.1680/geot.1996.46.2.313](https://doi.org/10.1680/geot.1996.46.2.313).
- Davidovits, J., 1982, The need to create a new technical language for the transfer of basic scientific information, *Transfer and Exploitation of Scientific and Technical Information*, Lüksemburg, 316–320.
- De Sanctis Luca ve Mandolini Alessandro, 2006, Bearing capacity of piled rafts on soft clay soils, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 132(12), 1600–1610, doi.org/[10.1061/\(ASCE\)1090-0241\(2006\)132:12\(1600\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(2006)132:12(1600)).

- Deb, P. ve Pal, S., 2020, Load-settlement and load-sharing behaviour of a piled raft foundation resting on layered soils, *Acta Geotechnica Slovenica*, 17, 71–86, doi.org/[10.18690/actageotechslov.17.1.71-86.2020](https://doi.org/10.18690/actageotechslov.17.1.71-86.2020).
- Deb, P., Debnath, B., Reang, R.B. ve Pal, S.K., 2022, Structural analysis of piled raft foundation in soft soil: An experimental simulation and parametric study with numerical method, *Ocean Engineering*, 261, 112139, doi.org/[10.1016/j.oceaneng.2022.112139](https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2022.112139).
- Derringer, G., ve Suich, R., 1980, Simultaneous optimization of several response variables, *Journal of Quality Technology*, 12(4), 214–219, doi.org/[10.1080/00224065.1980.11980968](https://doi.org/10.1080/00224065.1980.11980968)
- Ekinci, E., 2023, The effects of different production parameters (NaOH concentration, curing regime and replacement ratio of recycled aggregate) on fresh, hardened and elevated temperature performance of geopolymer mortar samples, *Journal of Building Engineering*, 76, 107052, doi.org/[10.1016/j.jobbe.2023.107052](https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2023.107052).
- El-Wafa, M.A. ve Fukuzawa, K., 2018, Early-age strength of alkali-activated municipal slag–fly ash–based geopolymer mortar, *Journal of Materials in Civil Engineering*, 30(4), 04018040, doi.org/[10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0002234](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0002234).
- Elwakil, A.Z. ve Azzam, W.R., 2016, Experimental and numerical study of piled raft system, *Alexandria Engineering Journal*, 55(1), 547–560, doi.org/[10.1016/j.aej.2015.10.001](https://doi.org/10.1016/j.aej.2015.10.001).
- Fallah, M.A. ve Mousavinejad, S.H.G., 2023, A comparative study of properties of ambient-cured recycled GGBFS geopolymer concrete and recycled portland cement concrete, *Journal of Materials in Civil Engineering*, 35(1), 05022002, doi.org/[10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0004563](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0004563).
- Fattah, M.Y., Yousif, M.A. ve Al-Tameemi, S.M.K., 2015, Effect of pile group geometry on bearing capacity of piled raft foundations, *Structural Engineering and Mechanics*, 54(5), 829–853, doi.org/[10.12989/sem.2015.54.5.829](https://doi.org/10.12989/sem.2015.54.5.829).
- Fattah, M.Y., Zbar, B.S. ve Mustafa, F.S., 2017, Vertical vibration capacity of a single pile in dry sand, *Marine Georesources & Geotechnology*, 35(8), 1111–1120, doi.org/[10.1080/1064119X.2017.1294219](https://doi.org/10.1080/1064119X.2017.1294219).
- Fattah, M.Y., Zbar, B.S. ve Mustafa, F.S., 2020, Effect of saturation on response of a single pile embedded in saturated sandy soil to vertical vibration, *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 24(3), 381–400, doi.org/[10.1080/19648189.2017.1391126](https://doi.org/10.1080/19648189.2017.1391126).
- Fernández-Jiménez, A., Vallepu, R., Terai, T., Palomo, A. ve Ikeda, K., 2006, Synthesis and thermal behavior of different aluminosilicate gels, *Journal of Non-Crystalline Solids*, 352(21), 2061–2066, doi.org/[10.1016/j.jnoncrysol.2006.03.037](https://doi.org/10.1016/j.jnoncrysol.2006.03.037).
- Fleming, K., Weltman, A., Randolph, M. ve Elson, K., 2008, Piling engineering, *Taylor ve Francis*, New York, NY, A.B.D.

- Fredlund, D. G., Rahardjo, H., Fredlund, M. D., 2010., Unsaturated soil mechanics in engineering practice, *Wiley*, New York, NY, A.B.D.
- Gomes, K.C., Carvalho, M., Diniz, D. de P., Abrantes, R. de C.C., Branco, M.A. ve Carvalho, P.R.O. de, 2019, Carbon emissions associated with two types of foundations: CP-II Portland cement-based composite vs. geopolymer concrete, *Matéria (Rio de Janeiro)*, 24(4), e12525, doi.org/[10.1590/S1517-707620190004.0850](https://doi.org/10.1590/S1517-707620190004.0850).
- Hadi, M.N.S., Farhan, N.A. ve Sheikh, M.N., 2017, Design of geopolymer concrete with GGBFS at ambient curing condition using Taguchi method, *Construction and Building Materials*, 140, 424–431, doi.org/[10.1016/j.conbuildmat.2017.02.131](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.02.131).
- Hadi, M.N.S., Al-Azzawi, M. ve Yu, T., 2018, Effects of fly ash characteristics and alkaline activator components on compressive strength of fly ash-based geopolymer mortar, *Construction and Building Materials*, 175, 41–54, doi.org/[10.1016/j.conbuildmat.2018.04.092](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.04.092).
- Hadi, M.N.S., Zhang, H. ve Parkinson, S., 2019, Optimum mix design of geopolymer pastes and concretes cured in ambient condition based on compressive strength, setting time and workability, *Journal of Building Engineering*, 23, 301–313, doi.org/[10.1016/j.jobbe.2019.02.006](https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2019.02.006).
- Halder, P. ve Manna, B., 2021, Large scale model testing to investigate the influence of granular cushion layer on the performance of disconnected piled raft system, *Acta Geotechnica*, 16(5), 1597–1614, doi.org/[10.1007/s11440-020-01121-5](https://doi.org/10.1007/s11440-020-01121-5).
- Halder, P. ve Manna, B., 2022a, Load transfer mechanism for connected and disconnected piled raft: a comparative study, *Acta Geotechnica*, 16(5), 3033–3045, doi.org/[10.1007/s11440-021-01409-0](https://doi.org/10.1007/s11440-021-01409-0).
- Halder, P. ve Manna, B., 2022b, Performance evaluation of piled rafts in sand based on load-sharing mechanism using finite element model, *International Journal of Geotechnical Engineering*, 17(7), 574–591, doi.org/[10.1080/19386362.2020.1729297](https://doi.org/10.1080/19386362.2020.1729297)
- Han, F., Salgado, R., Prezzi, M. ve Lim, J., 2019, Load transfer mechanism for connected and disconnected piled raft: a comparative study, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 145(7), 04019027, doi.org/[10.1061/\(ASCE\)GT.1943-5606.0002050](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0002050).
- Han, J. ve Ye, S.-L., 2006, Axial resistance of nondisplacement pile groups in sand, *Canadian Geotechnical Journal*, 43(1), 30–42, doi.org/[10.1139/t05-087](https://doi.org/10.1139/t05-087).
- Hasnaoui, A., Ghorbel, E. ve Wardeh, G., 2021, Performance of metakaolin/slag-based geopolymer concrete made with recycled fine and coarse aggregates, *Journal of Building Engineering*, 42, 102813, doi.org/[10.1016/j.jobbe.2021.102813](https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2021.102813).

- Horikoshi, K. ve Randolph, M.F., 1998, A contribution to optimum design of piled rafts, *Géotechnique*, 48(3), 301–317, doi.org/[10.1680/geot.1998.48.3.301](https://doi.org/10.1680/geot.1998.48.3.301).
- Hu, W., Nie, Q., Huang, B. ve Shu, X., 2019, Investigation of the strength development of cast-in-place geopolymer piles with heating systems, *Journal of Cleaner Production*, 215, 1481–1489, doi.org/[10.1016/j.jclepro.2019.01.155](https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.01.155).
- Huseien, G.F., Mirza, J., Ismail, M., Ghoshal, S.K. ve Ariffin, M.A.M., 2018, Effect of metakaolin replaced granulated blast furnace slag on fresh and early strength properties of geopolymer mortar, *Ain Shams Engineering Journal*, 9(4), 1557–1566, doi.org/[10.1016/j.asej.2016.11.011](https://doi.org/10.1016/j.asej.2016.11.011).
- İlcan, H., Demirbaş, A.O., Ulugöl, H. ve Şahmaran, M., 2024, Low-alkaline activated construction and demolition waste-based geopolymers, *Construction and Building Materials* 411, 134546, doi.org/[10.1016/j.conbuildmat.2023.134546](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.134546).
- İpek, S., 2022, Macro and micro characteristics of eco-friendly fly ash-based geopolymer composites made of different types of recycled sand, *Journal of Building Engineering*, 52, 104431, doi.org/[10.1016/j.jobbe.2022.104431](https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2022.104431).
- Jamil, I., Ahmad, I., Ullah, W., Ahmad, M., Sabri, M.M. ve Majdi, A., 2022, Experimental study on lateral and vertical capacity of piled raft and pile group system in sandy soil, *Applied Sciences*, 12(17), 8853, doi.org/[10.3390/app12178853](https://doi.org/10.3390/app12178853).
- Jamil, I., Ahmad, I., Khan, I., Ullah, W., Ur Rehman, A. ve Ali Khan, S., 2023, Factors affecting the lateral contribution of a raft in a piled raft system, *Ain Shams Engineering Journal*, 14(5), 101968, doi.org/[10.1016/j.asej.2022.101968](https://doi.org/10.1016/j.asej.2022.101968).
- Jena, S., Panigrahi, R. ve Sahu, P., 2019, Effect of silica fume on the properties of fly ash geopolymer concrete, in *Sustainable Construction and Building Materials*, Springer Singapore, Singapore, 145–153.
- Jiao, Z., Li, X., Yu, Q., Yao, Q. ve Hu, P., 2023, Sulfate resistance of class C/class F fly ash geopolymers, *Journal of Materials Research and Technology*, 23, 1767–1780, doi.org/[10.1016/j.jmrt.2023.01.131](https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2023.01.131).
- Kanagaraj, B., Kiran, T., N., A., Al Jabri, K. ve S., J., 2023, Development and strength assessment of eco-friendly geopolymer concrete made with natural and recycled aggregates, *Construction Innovation*, 23(3), 524–545, doi.org/[10.1108/CI-08-2021-0157](https://doi.org/10.1108/CI-08-2021-0157).
- Katzenbach, R., Bachmann, G., Boled-Mekasha, G. ve Ramm, H., 2005, Combined pile raft foundations (CPRF): An appropriate solution for the foundations of high-rise buildings, *Slovak Journal of Civil Engineering*, 3, 19–29.
- Khalil, M.G., Elgabbas, F., El-Feky, M.S. ve El-Shafie, H., 2020, Performance of geopolymer mortar cured under ambient temperature, *Construction and Building Materials*, 242, 118090, doi.org/[10.1016/j.conbuildmat.2020.118090](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118090).

- Khater, H.M., 2013, Effect of silica fume on the characterization of the geopolymer materials, *International Journal of Advanced Structural Engineering*, 5(1), 12, doi.org/[10.1186/2008-6695-5-12](https://doi.org/10.1186/2008-6695-5-12).
- Koushkbaghi, M., Alipour, P., Tahmouresi, B., Mohseni, E., Saradar, A. ve Sarker, P.K., 2019, Influence of different monomer ratios and recycled concrete aggregate on mechanical properties and durability of geopolymer concretes, *Construction and Building Materials*, 205, 519–528, doi.org/[10.1016/j.conbuildmat.2019.01.174](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.01.174).
- Kumar, A. ve Choudhury, D., 2018, Development of new prediction model for capacity of combined pile-raft foundations, *Computers and Geotechnics*, 97, 62–68, doi.org/[10.1016/j.compgeo.2017.12.008](https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2017.12.008).
- Kumar, G. ve Mishra, S.S., 2022, Effect of recycled concrete aggregate on mechanical, physical and durability properties of GGBS–fly ash-based geopolymer concrete, *Innovative Infrastructure Solutions*, 7(4), 237, doi.org/[10.1007/s41062-022-00832-w](https://doi.org/10.1007/s41062-022-00832-w).
- Lee, J., Park, D. ve Choi, K., 2014, Analysis of load sharing behavior for piled rafts using normalized load response model. *Computers and Geotechnics*, 57, 65–74, doi.org/[10.1016/j.compgeo.2014.01.003](https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2014.01.003).
- Li, B., Gao, A., Li, Y., Xiao, H., Chen, N., Xia, D., Wang, S. ve Li, C., 2023, Effect of silica fume content on the mechanical strengths, compressive stress–strain behavior and microstructures of geopolymeric recycled aggregate concrete, *Construction and Building Materials*, 384, 131417, doi.org/[10.1016/j.conbuildmat.2023.131417](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.131417).
- Liu, J.L., Yuan, Z.L. ve Zhang, K.P., 1985, Cap-pile-soil interaction of bored pile groups, *11th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, San Francisco, CA, A.B.D., 1433–1436.
- Liu, Z., Cai, C.S., Peng, H. ve Fan, F., 2016, Experimental study of the geopolymeric recycled aggregate concrete, *Journal of Materials in Civil Engineering*, 28(9), 04016077, doi.org/[10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0001584](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001584).
- Long, T., Wang, Q., Guan, Z., Chen, Y. ve Shi, X., 2017, Deterioration and microstructural evolution of the fly ash geopolymer concrete against MgSO₄ solution, *Advances in Materials Science and Engineering*, 2017(1), 4247217, doi.org/[10.1155/2017/4247217](https://doi.org/10.1155/2017/4247217).
- Mandolini, A., Di Laora, R. ve Mascarucci, Y., 2013, Rational design of piled raft, *Modern building materials, structures and techniques*, 57, 45–52, doi.org/[10.1016/j.proeng.2013.04.008](https://doi.org/10.1016/j.proeng.2013.04.008).
- Mesgari, S., Akbarnezhad, A. ve Xiao, J.Z., 2020, Recycled geopolymer aggregates as coarse aggregates for Portland cement concrete and geopolymer concrete: Effects on mechanical properties, *Construction and Building Materials*, 236, 117571, doi.org/[10.1016/j.conbuildmat.2019.117571](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117571).

- Moghadam, A.S., Roshan, A.M.G. VE Omidinasab, F., 2023, Utilization of agricultural wastes as fiber, binder and aggregates of geopolymer mortars: Application of taguchi method for strength and durability optimization, *Journal of Building Engineering*, 75, 106906, doi.org/[10.1016/j.jobbe.2023.106906](https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2023.106906).
- Mohajerani, A., Suter, D., Jeffrey-Bailey, T., Song, T., Arulrajah, A., Horpibulsuk, S. ve Law, D., 2019, Recycling waste materials in geopolymer concrete, *Clean Technologies and Environmental Policy*, 21(3), 493–515, doi.org/[10.1007/s10098-018-01660-2](https://doi.org/10.1007/s10098-018-01660-2).
- Montgomery, D.C., 2019, Design and analysis of experiments, *John Wiley ve Sons*.
- Morsy, A.M., Ragheb, A.M., Shalan, A.H. ve Mohamed, O.H., 2022, Mechanical characteristics of GGBFS/FA-based geopolymer concrete and its environmental impact, *Practice Periodical on Structural Design and Construction*, 27(2), 04022017, doi.org/[10.1061/\(ASCE\)SC.1943-5576.0000686](https://doi.org/10.1061/(ASCE)SC.1943-5576.0000686).
- Nath, P. ve Sarker, P.K., 2014, Effect of GGBFS on setting, workability and early strength properties of fly ash geopolymer concrete cured in ambient condition, *Construction and Building Materials*, 66, 163–171, doi.org/[10.1016/j.conbuildmat.2014.05.080](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.05.080).
- Nelder, J.A. ve Mead, R., 1965, A simplex method for function minimization, *The Computer Journal*, 7(4), 308–313, doi.org/[10.1093/comjnl/7.4.308](https://doi.org/10.1093/comjnl/7.4.308)
- Nuaklong, P., Sata, V. ve Chindapasirt, P., 2016, Influence of recycled aggregate on fly ash geopolymer concrete properties, *Journal of Cleaner Production*, 112, 2300–2307, doi.org/[10.1016/j.jclepro.2015.10.109](https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.10.109).
- Nuaklong, P., Sata, V., Wongsas, A., Srinavin, K. ve Chindapasirt, P., 2018, Recycled aggregate high calcium fly ash geopolymer concrete with inclusion of OPC and nano-SiO₂, *Construction and Building Materials*, 174, 244–252, doi.org/[10.1016/j.conbuildmat.2018.04.123](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.04.123).
- Okoye, F.N., Durgaprasad, J. ve Singh, N.B., 2016, Effect of silica fume on the mechanical properties of fly ash based-geopolymer concrete, *Ceramics International*, 42(2, Part B), 3000–3006, doi.org/[10.1016/j.ceramint.2015.10.084](https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2015.10.084).
- Olivier, J. ve Peters, J., 2020, Trends in global CO₂ and total greenhouse gas emissions, *PBL Netherlands Environmental Assessment Agency*.
- Omeman, Z.M. (2012). Load sharing of piled-raft foundations in sand subjected to vertical loads, (Doktora Tezi). Concordia University.
- Omer, J. ve Haroglu, H., 2021, Tests on model piled rafts in sand: Measured settlements compared with finite element predictions, *Geotechnical and Geological Engineering*, 39, 3271–3283, doi.org/[10.1007/s10706-020-01664-0](https://doi.org/10.1007/s10706-020-01664-0)
- Özcan, A. ve Karakoç, M.B., 2019, Evaluation of sulfate and salt resistance of ferrochrome slag and blast furnace slag-based geopolymer concretes, *Structural Concrete*, 20(5), 1607–1621, doi.org/[10.1002/suco.201900061](https://doi.org/10.1002/suco.201900061).

- Özcelikci, E., Kul, A., Günal, M.F., Özel, B.F., Yıldırım, G., Ashour, A. ve Şahmaran, M., 2023, A comprehensive study on the compressive strength, durability-related parameters and microstructure of geopolymer mortars based on mixed construction and demolition waste, *Journal of Cleaner Production*, 396, 136522, doi.org/[10.1016/j.jclepro.2023.136522](https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.136522).
- Panizza, M., Natali, M., Garbin, E., Ducman, V. ve Tamburini, S., 2020, Optimization and mechanical-physical characterization of geopolymers with Construction and Demolition Waste (CDW) aggregates for construction products, *Construction and Building Materials*, 264, 120158, doi.org/[10.1016/j.conbuildmat.2020.120158](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120158).
- Parthiban, K. ve Saravana Raja Mohan, K., 2017, Influence of recycled concrete aggregates on the engineering and durability properties of alkali activated slag concrete, *Construction and Building Materials*, 133, 65–72, doi.org/[10.1016/j.conbuildmat.2016.12.050](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.12.050).
- Pasupathy, K., Ramakrishnan, S. ve Sanjayan, J., 2021, Influence of recycled concrete aggregate on the foam stability of aerated geopolymer concrete, *Construction and Building Materials*, 271, 121850, doi.org/[10.1016/j.conbuildmat.2020.121850](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121850).
- Patil, J.D., Vasanvala, S.A. ve Solanki, C.H., 2016, An experimental study on behaviour of piled raft foundation, *Indian Geotechnical Journal*, 46(1), 16–24, doi.org/[10.1007/s40098-015-0145-7](https://doi.org/10.1007/s40098-015-0145-7).
- Plaxis Materials Manual, 2022, Delft University of Technology & Plaxis, Delft, Hollanda.
- Provis, J.L. ve van Deventer, J.S.J., 2009, Geopolymers structures, processing, properties and industrial applications, *Elsevier*.
- Prusty, J.K. ve Pradhan, B., 2022, Optimizing the performance of geopolymer mortar based on flowability, strength, and durability properties, *Advances in Civil Engineering Materials*, 11(1), 372–397, doi.org/[10.1520/ACEM20210141](https://doi.org/10.1520/ACEM20210141).
- Rafeet, A., Vinai, R., Soutsos, M. ve Sha, W., 2019, Effects of slag substitution on physical and mechanical properties of fly ash-based alkali activated binders (AABs), *Cement and Concrete Research*, 122, 118–135, doi.org/[10.1016/j.cemconres.2019.05.003](https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2019.05.003).
- Reig, L., Soriano, L., Borrachero, M.V., Monzó, J.M. ve Payá, J., 2022, Potential use of ceramic sanitary ware waste as pozzolanic material, *Boletín de la Sociedad Española de Cerámica y Vidrio*, 61(6), 611–621, doi.org/[10.1016/j.bsecv.2021.05.006](https://doi.org/10.1016/j.bsecv.2021.05.006).
- Ren, X. ve Zhang, L., 2018, Experimental study of interfacial transition zones between geopolymer binder and recycled aggregate, *Construction and Building Materials*, 167, 749–756, doi.org/[10.1016/j.conbuildmat.2018.02.111](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.02.111).

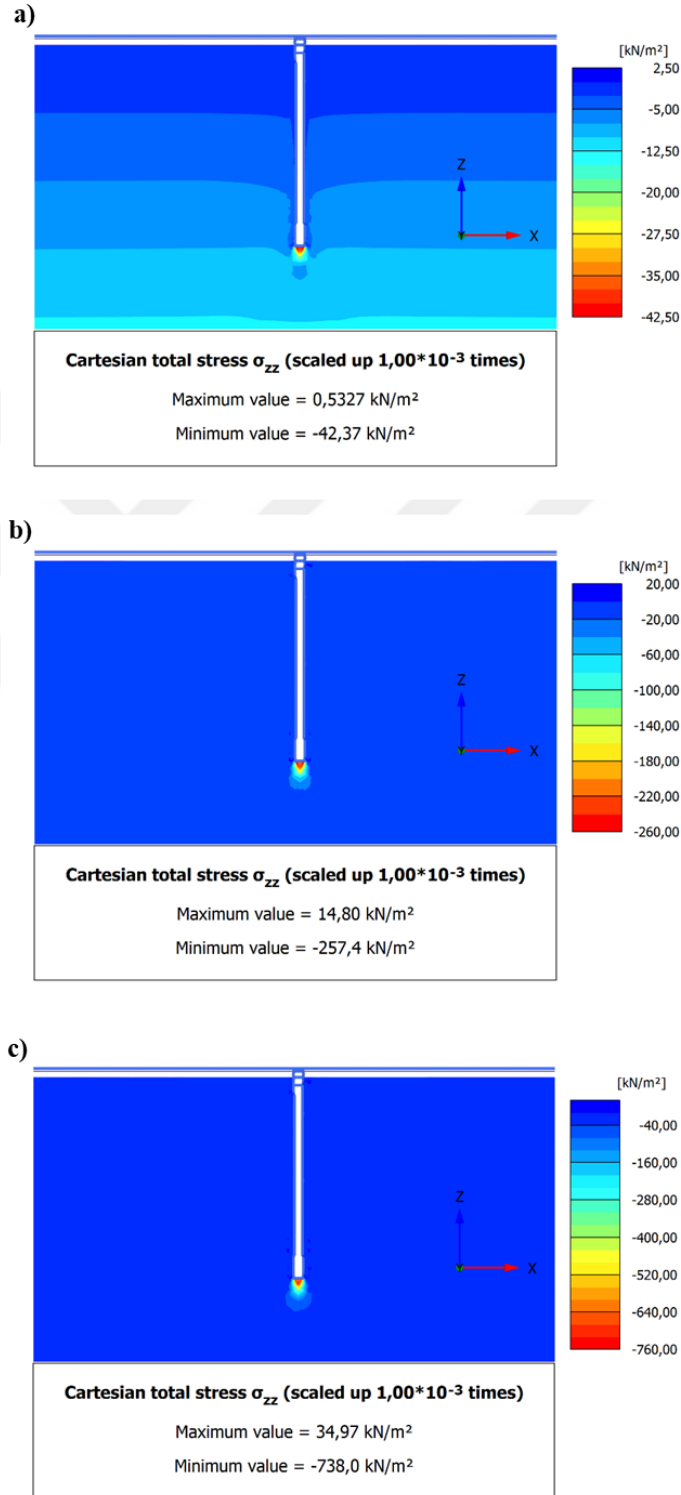
- Reul, O., 2004, Numerical study of the bearing behavior of piled rafts, *International Journal of Geomechanics*, 4(2), 59–68, doi.org/[10.1061/\(ASCE\)1532-3641\(2004\)4:2\(59\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1532-3641(2004)4:2(59)).
- Reul, O. ve Randolph, M.F., 2004, Design strategies for piled rafts subjected to nonuniform vertical loading, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 130(1), 1–13, doi.org/[10.1061/\(ASCE\)1090-0241\(2004\)130:1\(1\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(2004)130:1(1)).
- Saha, S., Rajasekaran, C. ve Gupta, P., 2020, Performance of eco-friendly mortar mixes against aggressive environments, *Advances in concrete construction*, 10(3), 237–245.
- Salahshour, Y. ve Ardakani, A., 2018, Evaluation of piled raft behavior based on the taguchi method subjected to combination of vertical and horizontal loads, *Journal of Engineering Geology*, 11(3), 181, doi.org/[10.18869/acadpub.jeg.11.3.183](https://doi.org/10.18869/acadpub.jeg.11.3.183).
- Santhanam, M., Cohen, M.D. ve Olek, J., 2002, Mechanism of sulfate attack: A fresh look: Part 1: Summary of experimental results, *Cement and Concrete Research*, 32(6), 915–921, doi.org/[10.1016/S0008-8846\(02\)00724-X](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(02)00724-X).
- SEPA Guidance, 2013, Recycled aggregates from inert waste, *Scottish Environment Protection Agency (SEPA)*.
- Sharafkhah, M. ve Shooshpasha, I., 2018, Physical modeling of behaviors of cast-in-place concrete piled raft compared to free-standing pile group in sand, *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 10(4), 703–716, doi.org/[10.1016/j.jrmge.2017.12.007](https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2017.12.007).
- Silva, P.D., Sagoe-Crenstil, K. ve Sirivivatnanon, V., 2007, Kinetics of geopolymerization: role of Al₂O₃ and SiO₂, *Cement and Concrete Research*, 37(4), 512–518, doi.org/[10.1016/j.cemconres.2007.01.003](https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2007.01.003).
- Singh, R.P., Vanapalli, K.R., Jadda, K. ve Mohanty, B., 2024, Durability assessment of fly ash, GGBS, and silica fume based geopolymer concrete with recycled aggregates against acid and sulfate attack, *Journal of Building Engineering*, 82, 108354, doi.org/[10.1016/j.jobbe.2023.108354](https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2023.108354).
- Somna, K., Jaturapitakkul, C., Kajitvichyanukul, P. ve Chindaprasirt, P., 2011, NaOH-activated ground fly ash geopolymer cured at ambient temperature, *Fuel*, 90(6), 2118–2124, doi.org/[10.1016/j.fuel.2011.01.018](https://doi.org/10.1016/j.fuel.2011.01.018).
- Tabaroei, A., Abrishami, S. ve Hosseini, E.S., 2017, Comparison between two different pluviation setups of sand specimens, *Journal of Materials in Civil Engineering*, 29(10), 04017157, doi.org/[10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0001985](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001985).
- Tan, J., Cai, J., Li, X., Pan, J. ve Li, J., 2020, Development of eco-friendly geopolymers with ground mixed recycled aggregates and slag, *Journal of Cleaner Production*, 256, 120369, doi.org/[10.1016/j.jclepro.2020.120369](https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120369).

- Thomas, B.S., Yang, J., Bahurudeen, A., Chinnu, S.N., Abdalla, J.A., Hawileh, R.A. ve Hamada, H.M., 2022, Geopolymer concrete incorporating recycled aggregates: A comprehensive review, *Cleaner Materials*, 3, 100056, doi.org/[10.1016/j.clema.2022.100056](https://doi.org/10.1016/j.clema.2022.100056).
- TS EN 933-3, 2012. Agregaların geometrik özellikleri için deneyler - Bölüm 3: Tane şekli tayini - yassılık endeksi, Ankara, Türkiye, TSE.
- Uğurlu, A.İ., Karakoç, M.B. ve Özcan, A., 2021, Effect of binder content and recycled concrete aggregate on freeze-thaw and sulfate resistance of GGBFS based geopolymer concretes, *Construction and Building Materials*, 301, 124246, doi.org/[10.1016/j.conbuildmat.2021.124246](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.124246).
- U.S. EPA. 2018, Construction and demolition debris generation in the United States". *U.S. Environmental Protection Agency (USEPA)*.
- Vu, A.-T., Matsumoto, T., Kobayashi, S.-I. ve Nguyen, T.-L., 2016, Model load tests on battered pile foundations and finite-element analysis, *International Journal of Physical Modelling in Geotechnics*, 18(1), 33–54, doi.org/[10.1680/jphmg.16.00010](https://doi.org/10.1680/jphmg.16.00010).
- Wang, F., Sun, X., Tao, Z. ve Pan, Z., 2022, Effect of silica fume on compressive strength of ultra-high-performance concrete made of calcium aluminate cement/fly ash based geopolymer, *Journal of Building Engineering*, 62, 105398, doi.org/[10.1016/j.jobbe.2022.105398](https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2022.105398).
- Wang, J., Xie, J., Wang, C., Zhao, J., Liu, F. ve Fang, C., 2020, Study on the optimum initial curing condition for fly ash and GGBS based geopolymer recycled aggregate concrete, *Construction and Building Materials*, 247, 118540, doi.org/[10.1016/j.conbuildmat.2020.118540](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118540).
- Wood, D.M., 2004, Geotechnical modelling, *CRC Press*, Londra, İngiltere.
- Wu, J., Min, Y., Li, B. ve Zheng, X., 2021, Stiffness and strength development of the soft clay stabilized by the one-part geopolymer under one-dimensional compressive loading, *Soils and Foundations*, 61(4), 974–988, doi.org/[10.1016/j.sandf.2021.06.001](https://doi.org/10.1016/j.sandf.2021.06.001).
- Xie, J., Wang, J., Rao, R., Wang, C. ve Fang, C., 2019a, Effects of combined usage of GGBS and fly ash on workability and mechanical properties of alkali activated geopolymer concrete with recycled aggregate, *Composites Part B: Engineering*, 164, 179–190, doi.org/[10.1016/j.compositesb.2018.11.067](https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2018.11.067).
- Xie, J., Zhao, J., Wang, J., Wang, C., Huang, P. ve Fang, C., 2019b, Sulfate resistance of recycled aggregate concrete with GGBS and fly ash-based geopolymer, *Materials*, 12(8), doi.org/[10.3390/ma12081247](https://doi.org/10.3390/ma12081247).
- Xu, Z., Huang, Z., Liu, C., Deng, X., Hui, D., Deng, Y., Zhao, M. ve Qin, L., 2021a, Experimental study on mechanical properties and microstructures of steel fiber-

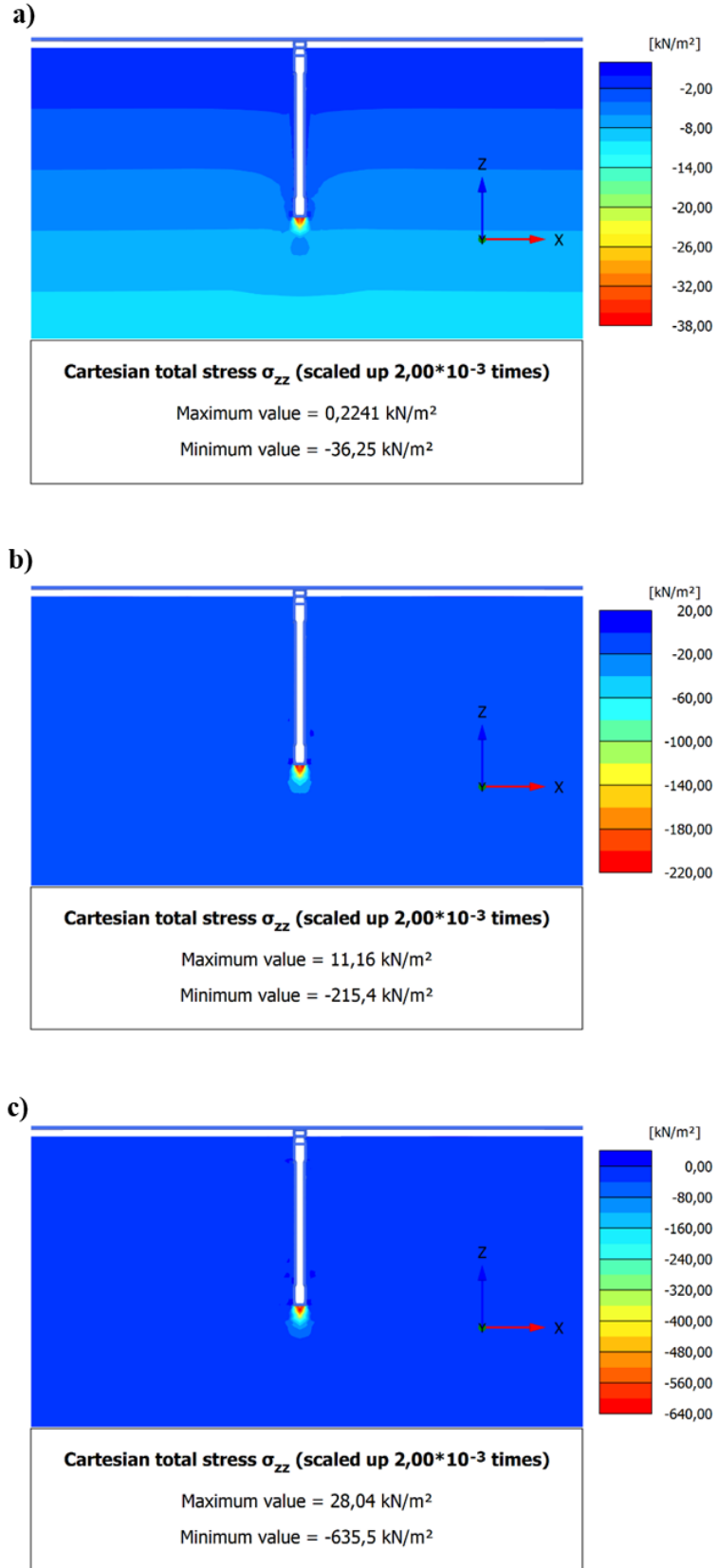
- reinforced fly ash-metakaolin geopolymer-recycled concrete, *Reviews on Advanced Materials Science*, 60(1), 578–590, doi.org/[10.1515/rams-2021-0050](https://doi.org/10.1515/rams-2021-0050).
- Xu, Z., Huang, Z., Liu, C., Deng, X., Hui, D. ve Deng, S., 2021b, Research progress on mechanical properties of geopolymer recycled aggregate concrete, *Reviews on Advanced Materials Science*, 60(1), 158–172, doi.org/[10.1515/rams-2021-0021](https://doi.org/10.1515/rams-2021-0021).
- Yip, C.K., Lukey, G.C., Provis, J.L. ve Deventer, J.S.J. van, 2008, Effect of calcium silicate sources on geopolymerisation, *Cement and Concrete Research*, 38(4), 554–564, doi.org/[10.1016/j.cemconres.2007.11.001](https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2007.11.001).
- Yirsaw, A. ve Asha, A., 2023, Numerical study on optimization of piled raft foundation on stratified soil under static load, *Advances in Civil Engineering*, 2023, 4732353, doi.org/[10.1155/2023/4732353](https://doi.org/10.1155/2023/4732353)
- Zhang, H. ve Hadi, M.N.S., 2019, Geogrid-confined pervious geopolymer concrete piles with FRP-PVC-confined concrete core: Concept and behaviour, *Construction and Building Materials*, 211, 12–25, doi.org/[10.1016/j.conbuildmat.2019.03.231](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.03.231).
- Zhang, M., Deskins, N.A., Zhang, G., Cygan, R.T. ve Tao, M., 2018, Modeling the Polymerization Process for Geopolymer Synthesis through Reactive Molecular Dynamics Simulations, *The Journal of Physical Chemistry C*, 122(12), 6760–6773, doi.org/[10.1021/acs.jpcc.8b00697](https://doi.org/10.1021/acs.jpcc.8b00697).
- Zhu, P., Hua, M., Liu, H., Wang, X. ve Chen, C., 2020, Interfacial evaluation of geopolymer mortar prepared with recycled geopolymer fine aggregates, *Construction and Building Materials*, 259, 119849, doi.org/[10.1016/j.conbuildmat.2020.119849](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119849).

EKLER

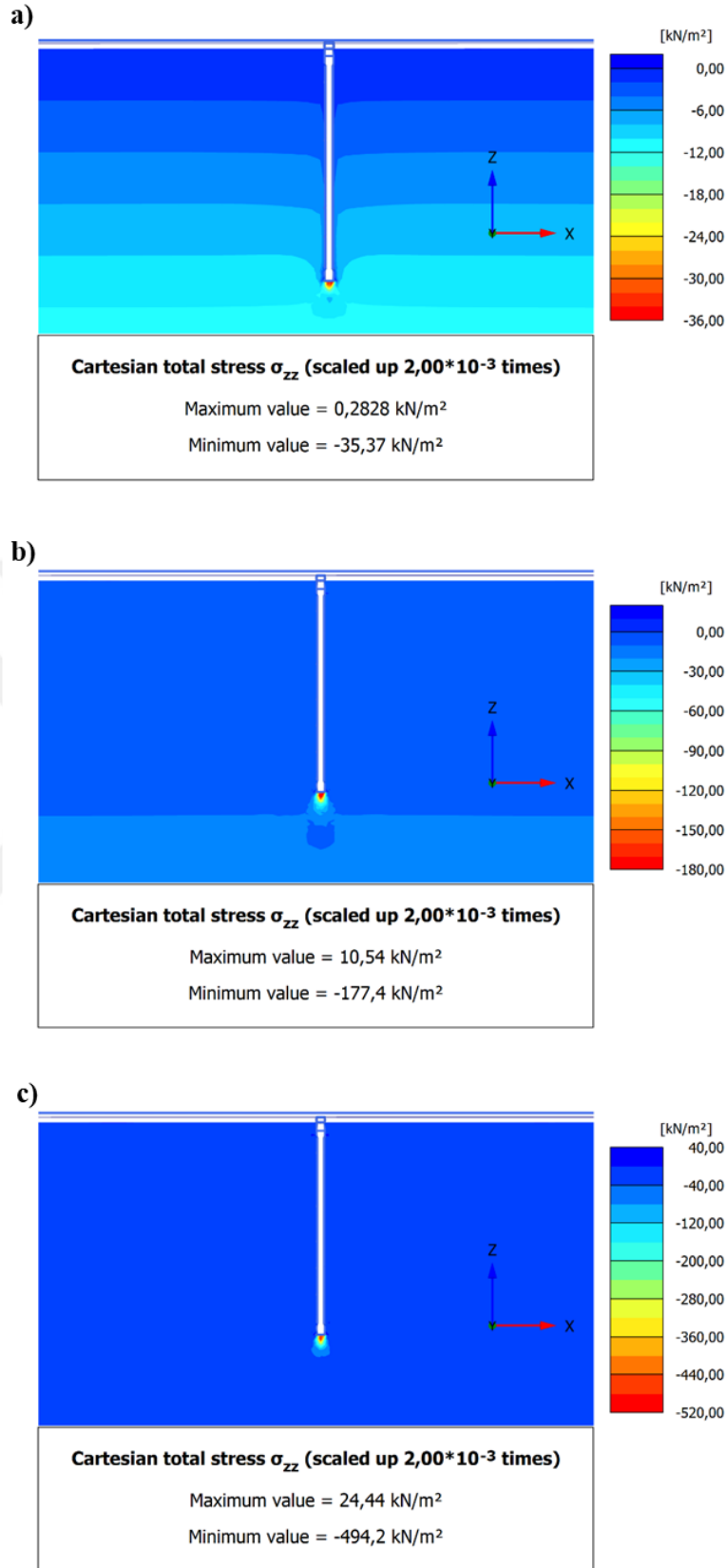
EK-1 Sayısal Analizlerde Elde Edilen Zemindeki Düşey Gerilmelerin Dağılımları



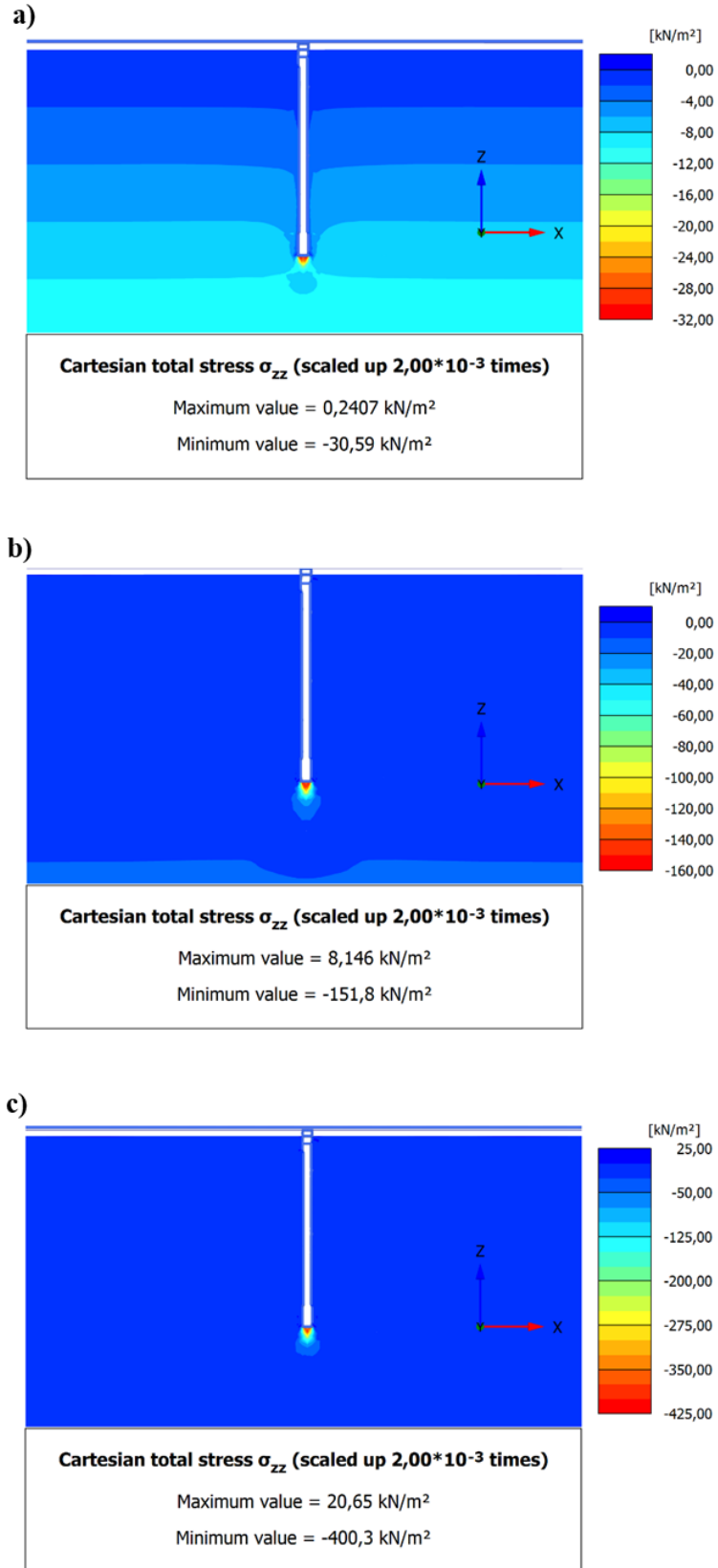
Şekil EK-1.1. L20Dr65 tasarımında farklı oturma seviyeleri için sayısal analiz ile elde edilmiş düşey gerilmelerin dağılımı: a) u_v/D_k (%) = 0,5, b) u_v/D_k (%) = 5,0, c) u_v/D_k (%) = 20,0



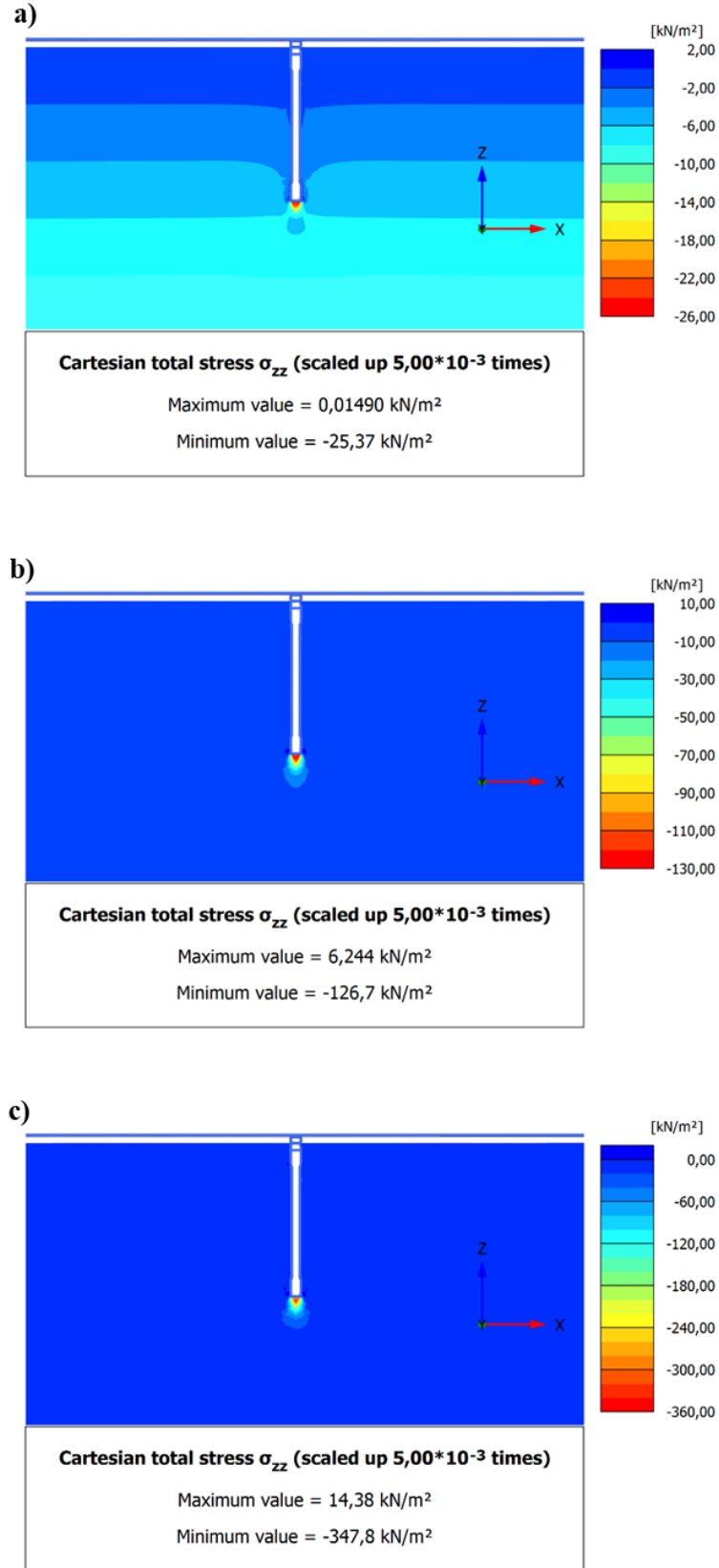
Şekil EK-1.2. L15Dr65 tasarımında farklı oturma seviyeleri için sayısal analiz ile elde edilmiş düşey gerilmelerin dağılımı: a) u_v/D_k (%) = 0,5, b) u_v/D_k (%) = 5,0, c) u_v/D_k (%) = 20,0



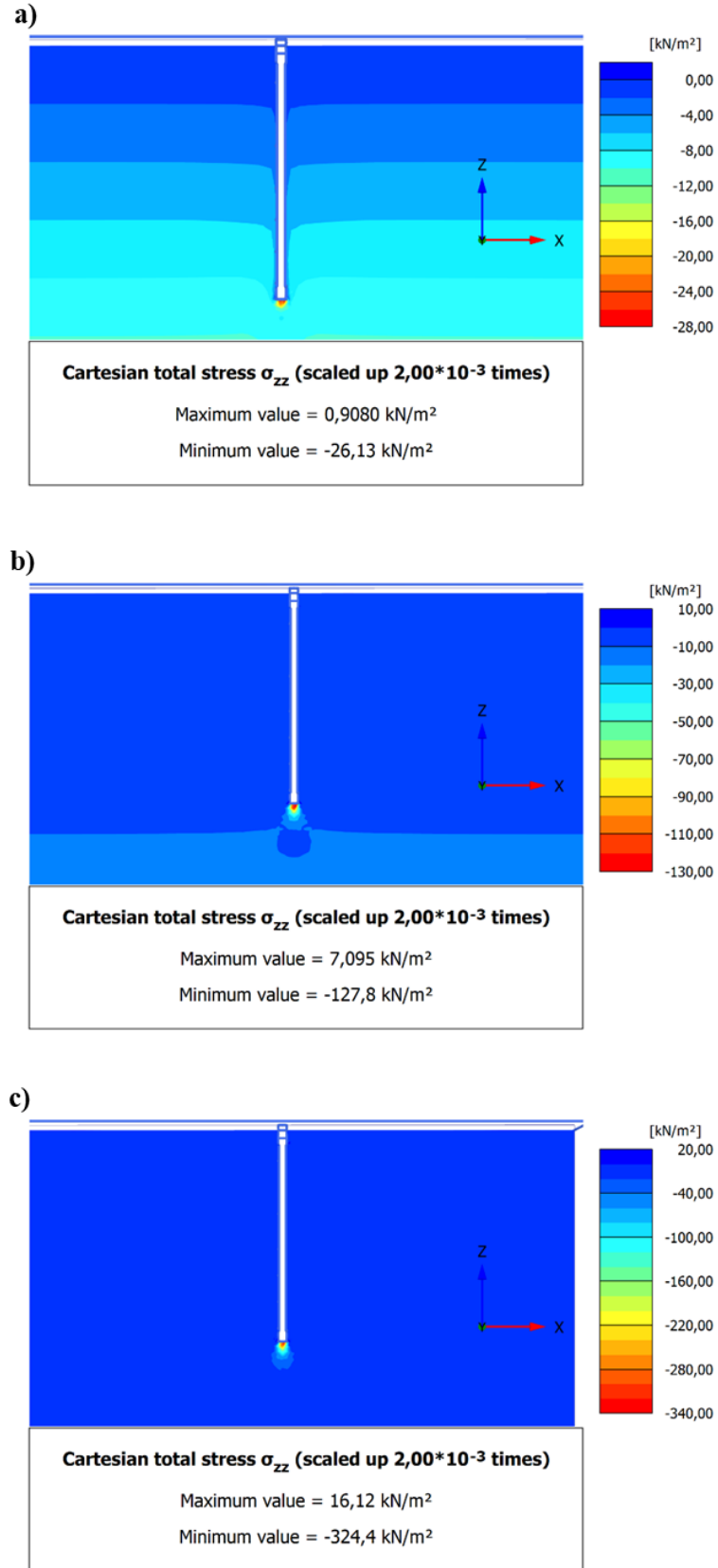
Şekil EK-1.3. L25Dr50 tasarımında farklı oturma seviyeleri için sayısal analiz ile elde edilmiş düşey gerilmelerin dağılımı: a) u_v/D_k (%) = 0,5, b) u_v/D_k (%) = 5,0, c) u_v/D_k (%) = 20,0



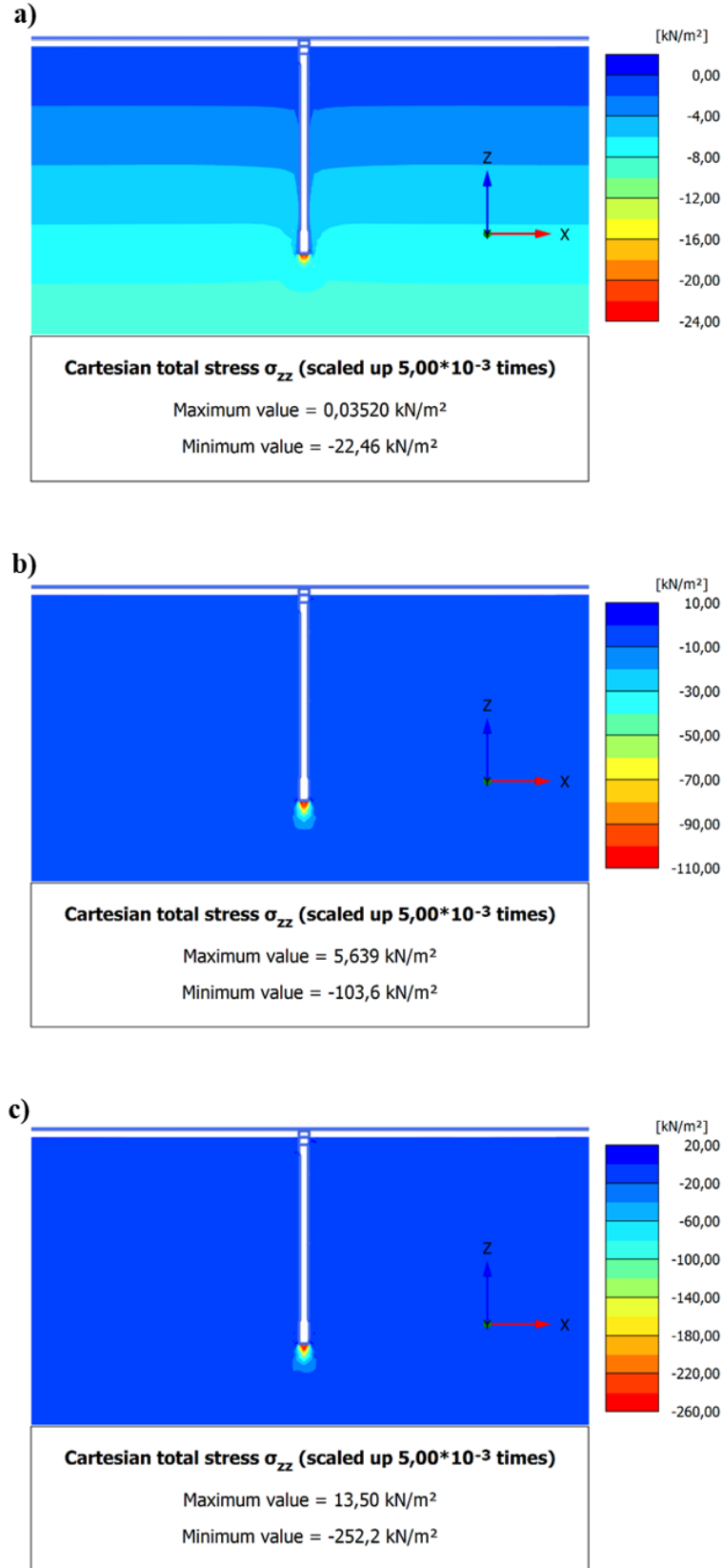
Şekil EK-1.4. L20Dr50 tasarımında farklı oturma seviyeleri için sayısal analiz ile elde edilmiş düşey gerilmelerin dağılımı: a) u_v/D_k (%) = 0,5, b) u_v/D_k (%) = 5,0, c) u_v/D_k (%) = 20,0



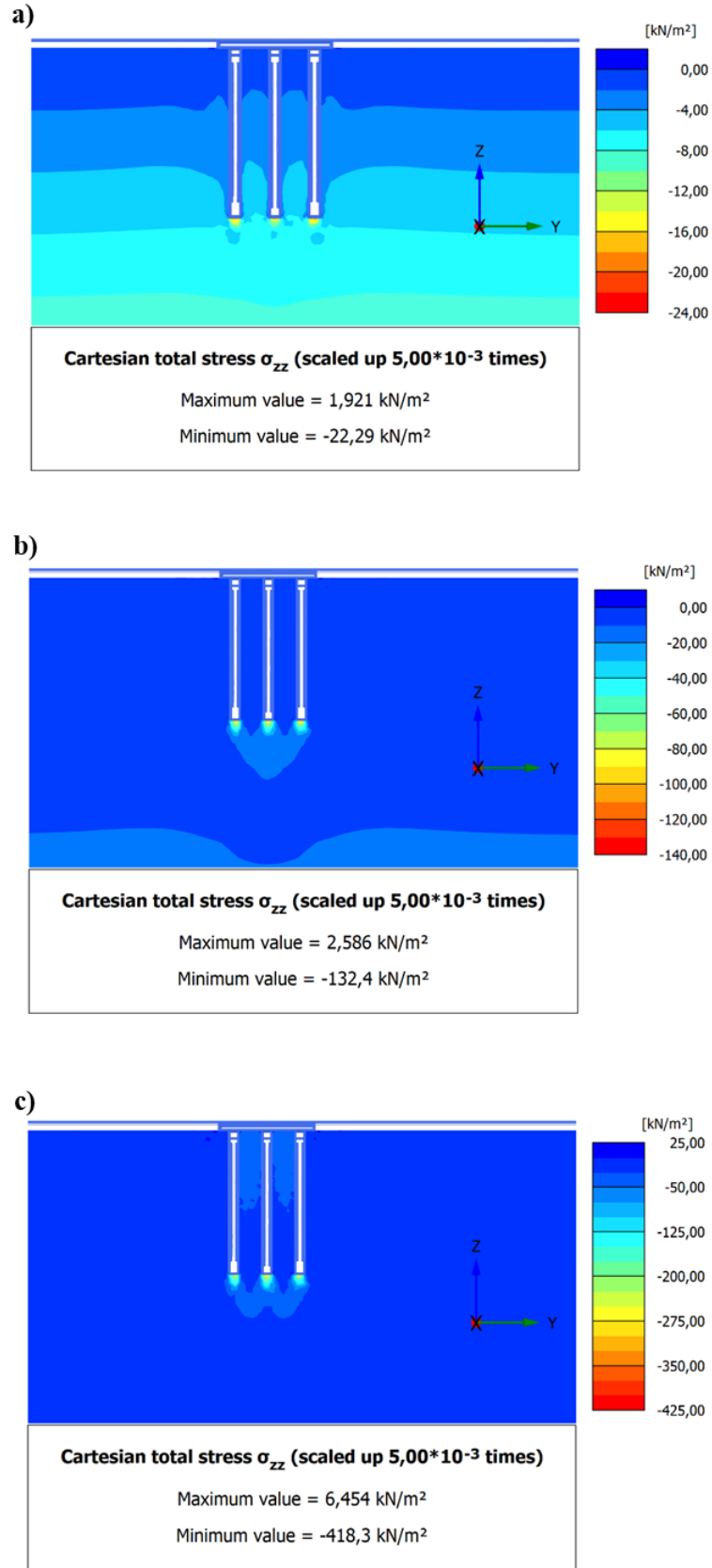
Şekil EK-1.5. L15Dr50 tasarımında farklı oturma seviyeleri için sayısal analiz ile elde edilmiş düşey gerilmelerin dağılımı: a) u_v/D_k (%) = 0,5, b) u_v/D_k (%) = 5,0, c) u_v/D_k (%) = 20,0



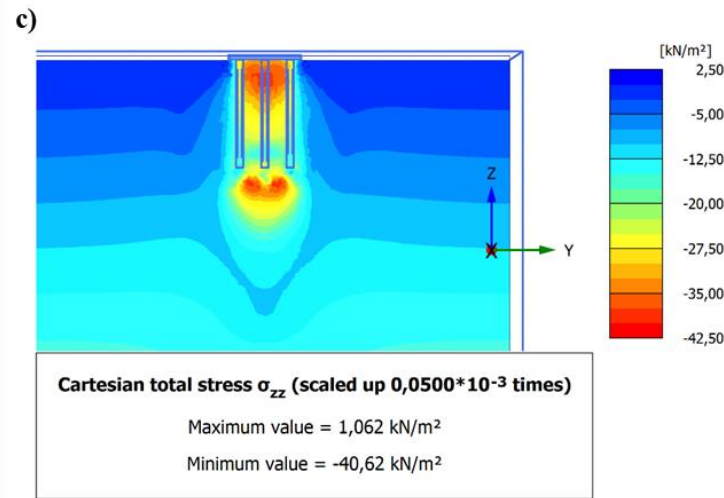
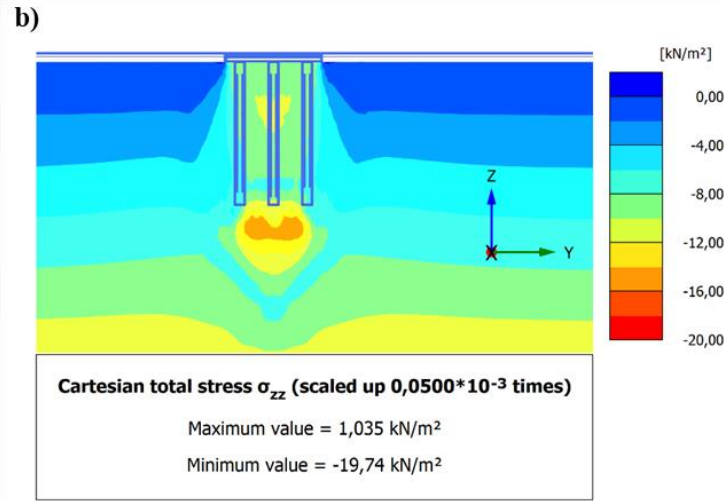
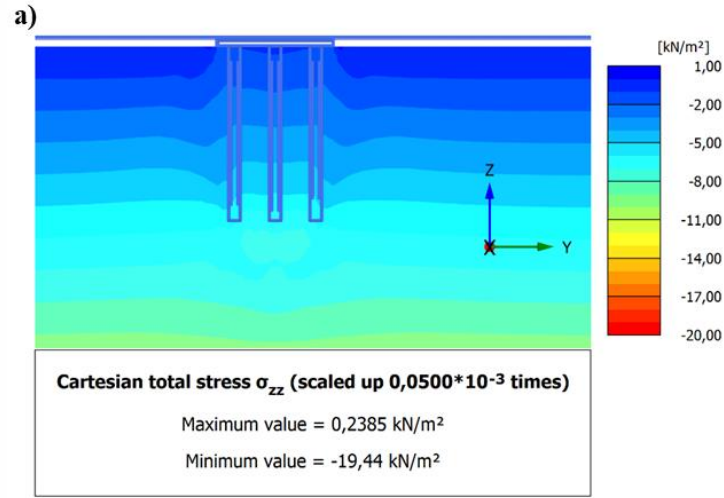
Şekil EK-1.6. L25Dr35 tasarımında farklı oturma seviyeleri için sayısal analiz ile elde edilmiş düşey gerilmelerin dağılımı: a) u_v/D_k (%) = 0,5, b) u_v/D_k (%) = 5,0, c) u_v/D_k (%) = 20,0



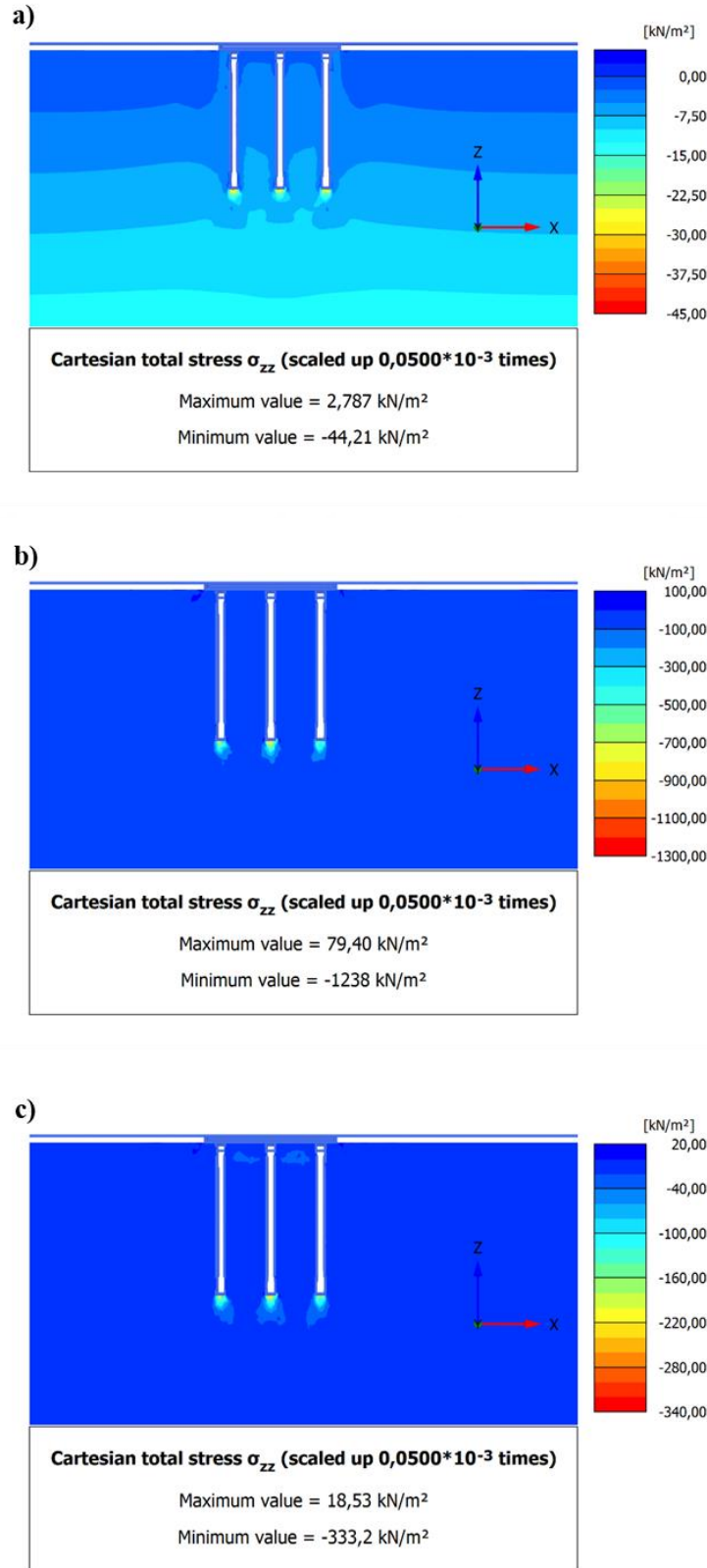
Şekil EK-1.7. L20Dr35 tasarımında farklı oturma seviyeleri için sayısal analiz ile elde edilmiş düşey gerilmelerin dağılımı: a) u_v/D_k (%) = 0,5, b) u_v/D_k (%) = 5,0, c) u_v/D_k (%) = 20,0



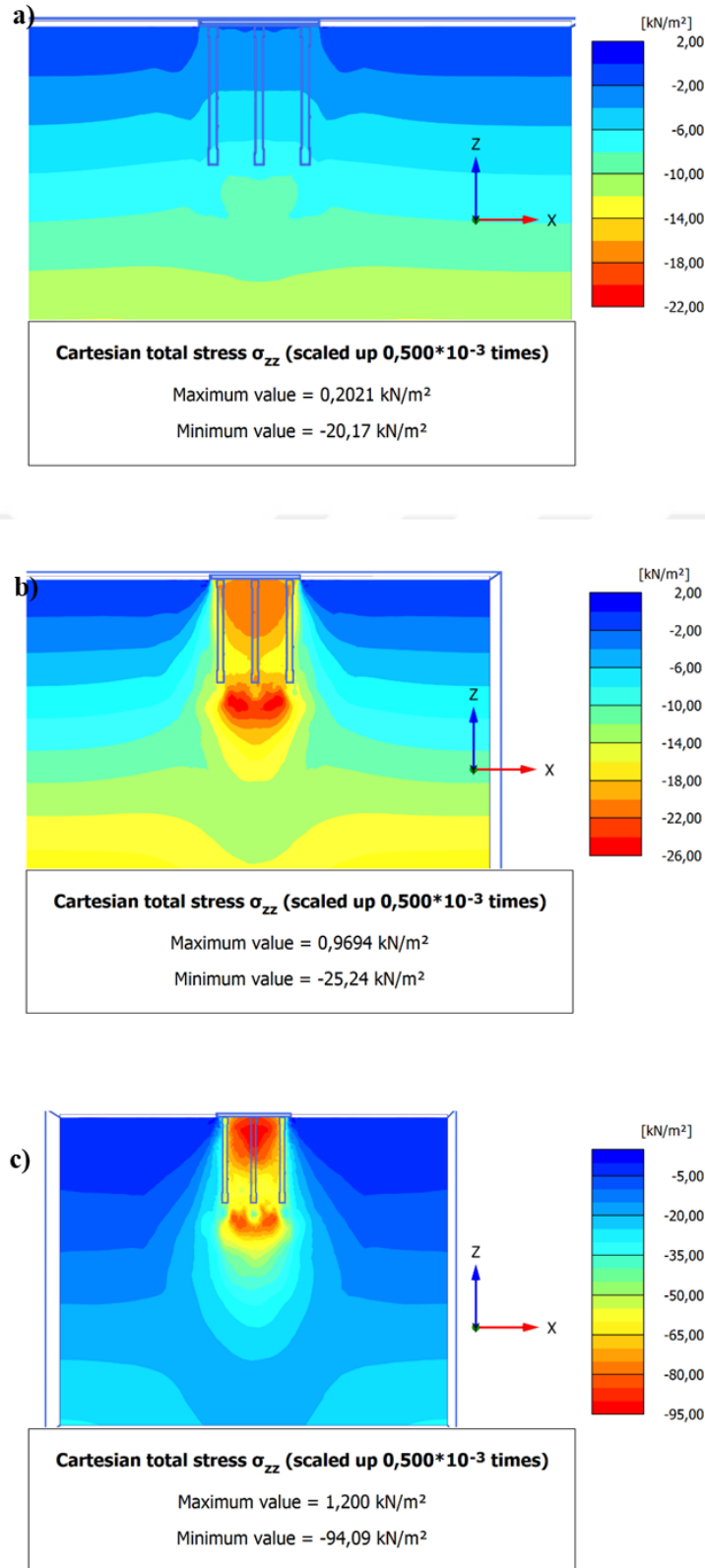
Şekil EK-1.8. T2 tasarımında farklı oturma seviyeleri için sayısal analiz ile elde edilmiş düşey gerilmelerin 1-1 aksından geçen düşey düzlemde dağılımı: a) u_v/L_{er} (%) = 0,05, b) u_v/L_{er} (%) = 0,50, c) u_v/L_{er} (%) = 2,00



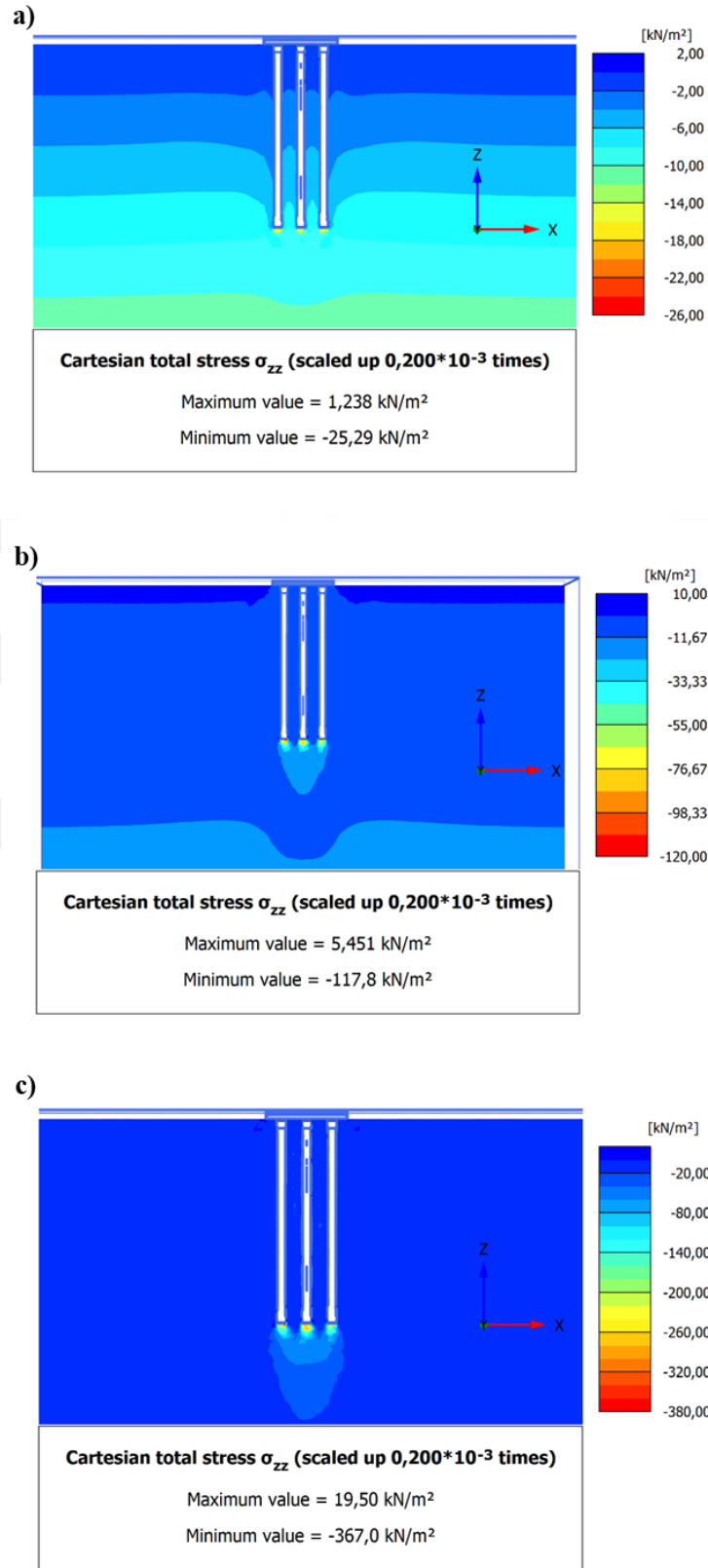
Şekil EK-1.9. T2 tasarımında farklı oturma seviyeleri için sayısal analiz ile elde edilmiş düşey gerilmelerin 2-2 aksından geçen düşey düzlemde dağılımı: a) u_v/L_{er} (%) = 0,05, b) u_v/L_{er} (%) = 0,50, c) u_v/L_{er} (%) = 2,00



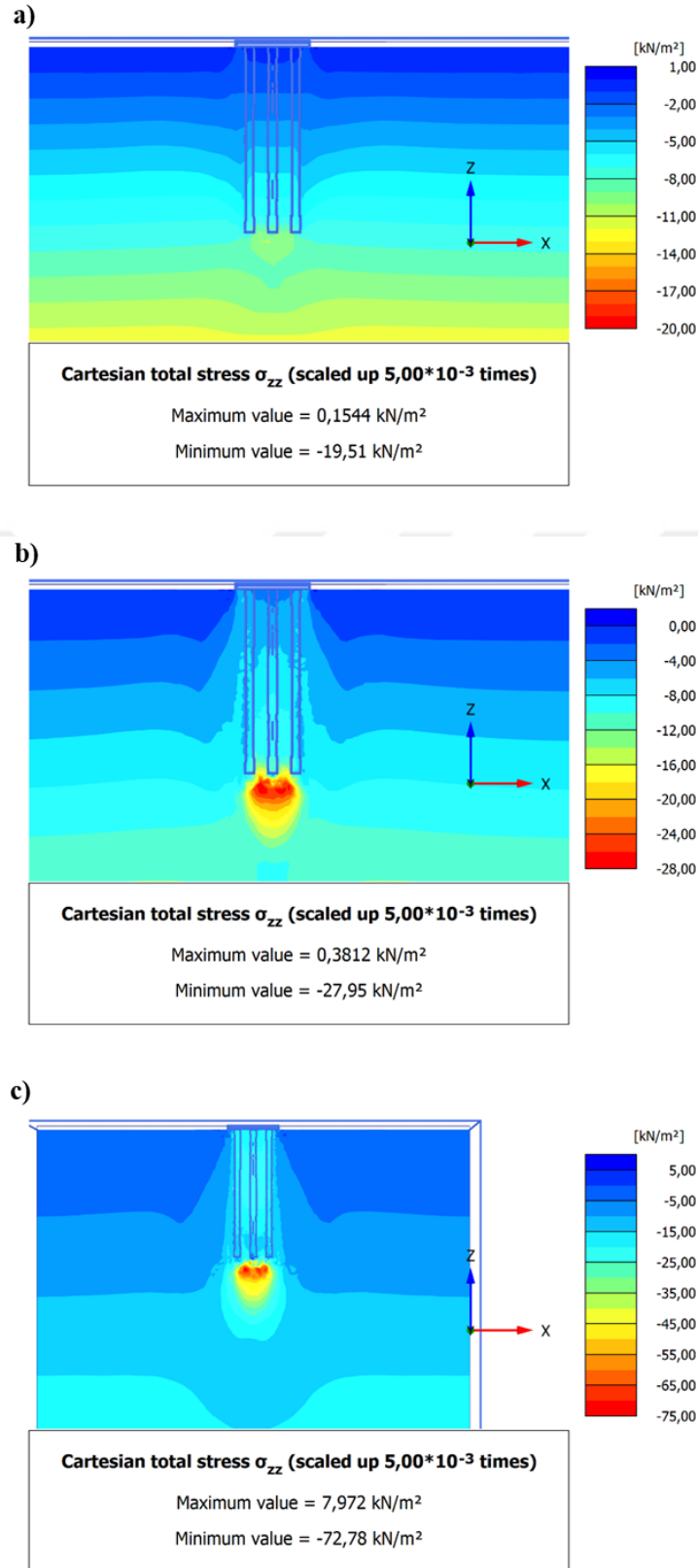
Şekil EK-1.10. T3 tasarımında farklı oturma seviyeleri için sayısal analiz ile elde edilmiş düşey gerilmelerin 1-1 aksından geçen düşey düzlemde dağılımı: a) u_v/L_{er} (%) = 0,05, b) u_v/L_{er} (%) = 0,50, c) u_v/L_{er} (%) = 2,00



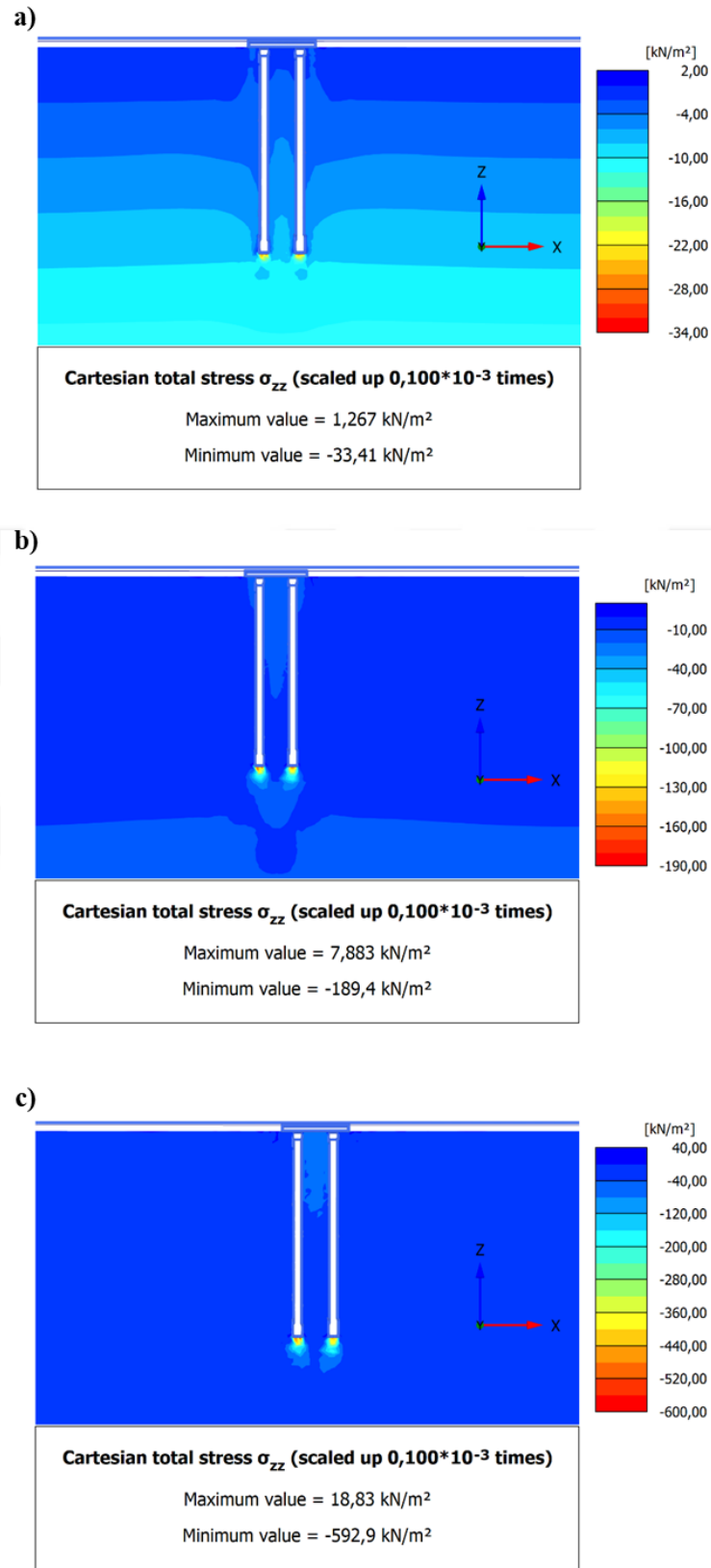
Şekil EK-1.11. T3 tasarımında farklı oturma seviyeleri için sayısal analiz ile elde edilmiş düşey gerilmelerin 2-2 aksından geçen düşey düzlemde dağılımı: a) u_v/L_{er} (%) = 0,05, b) u_v/L_{er} (%) = 0,50, c) u_v/L_{er} (%) = 2,00



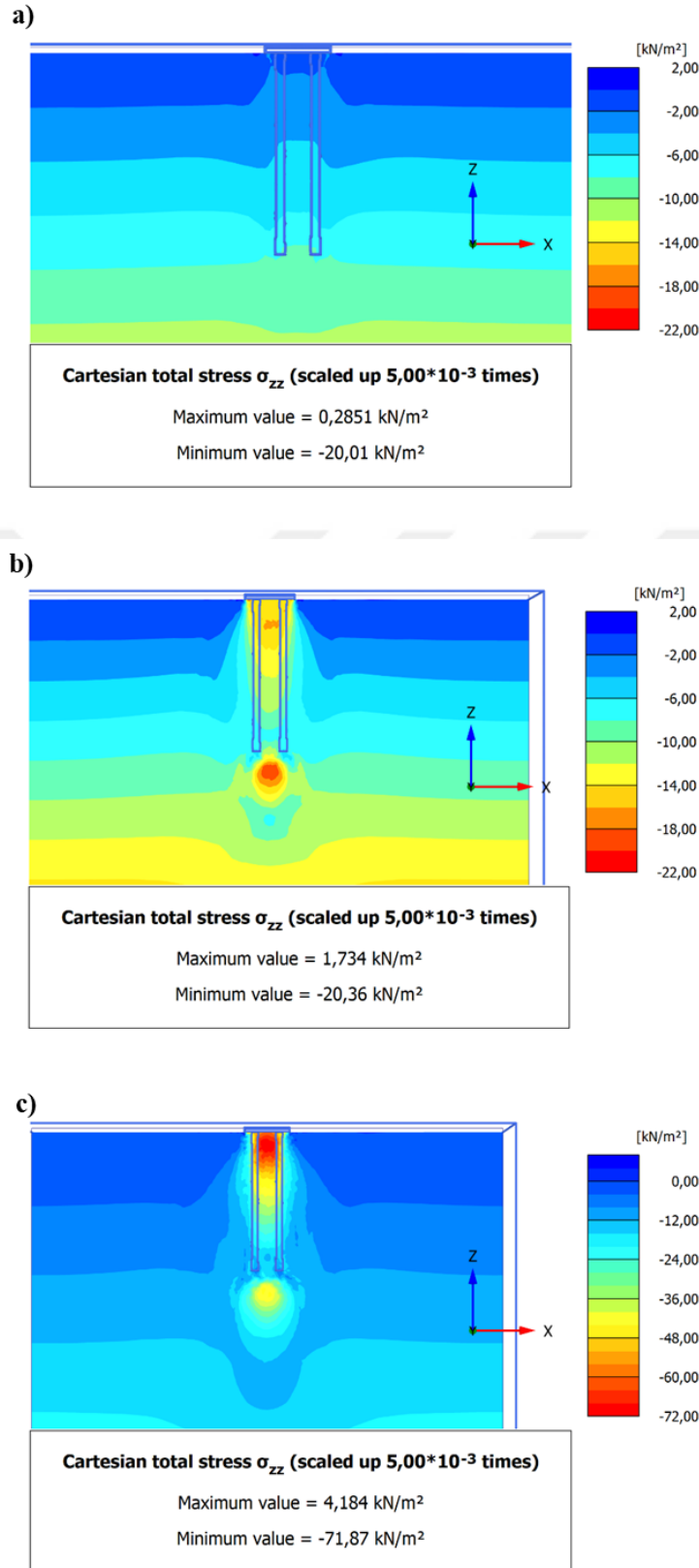
Şekil EK-1.12. T4 tasarımında farklı oturma seviyeleri için sayısal analiz ile elde edilmiş düşey gerilmelerin 1-1 aksından geçen düşey düzlemde dağılımı: a) u_v/L_{er} (%) = 0,05, b) u_v/L_{er} (%) = 0,50, c) u_v/L_{er} (%) = 2,00



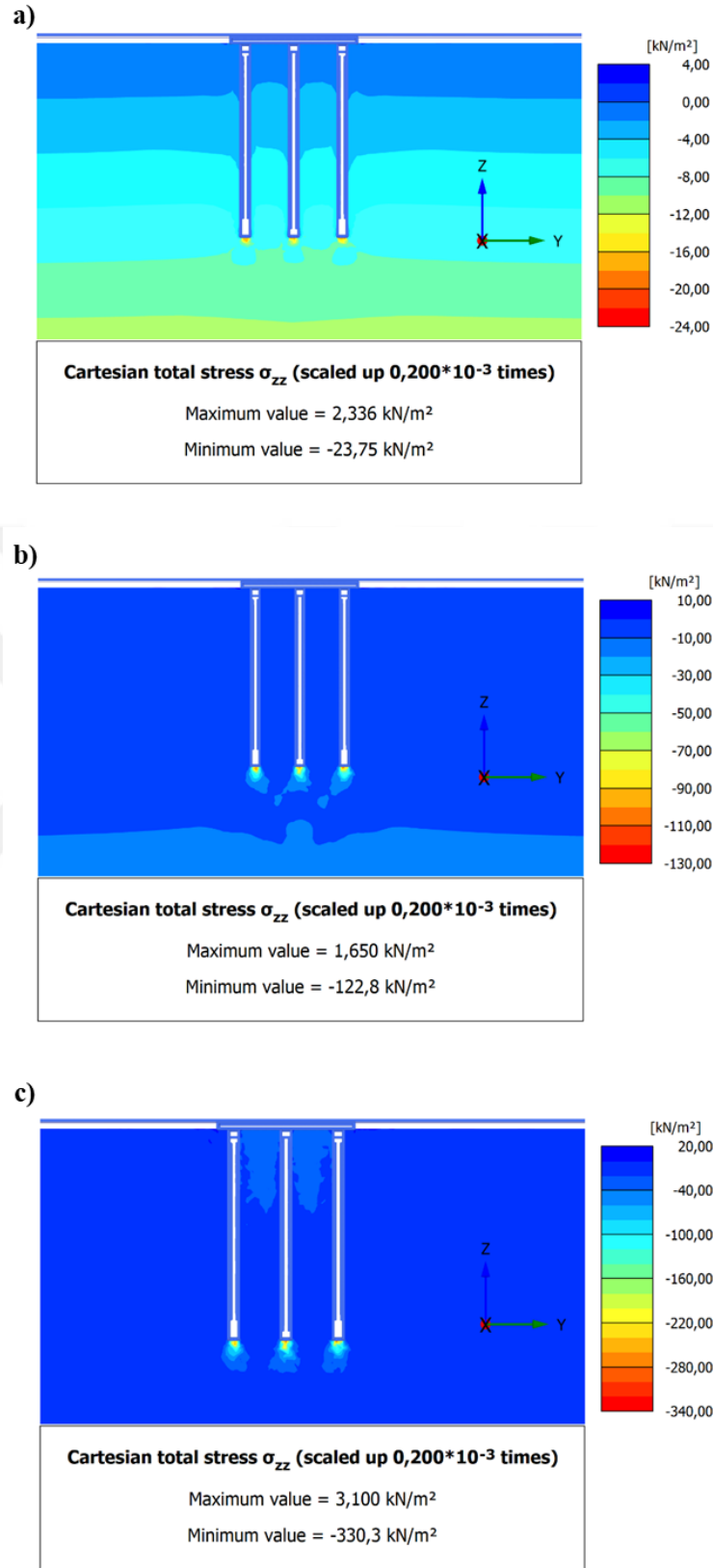
Şekil EK-1.13. T4 tasarımında farklı oturma seviyeleri için sayısal analiz ile elde edilmiş düşey gerilmelerin 2-2 aksından geçen düşey düzlemde dağılımı: a) u_v/L_{er} (%) = 0,05, b) u_v/L_{er} (%) = 0,50, c) u_v/L_{er} (%) = 2,00



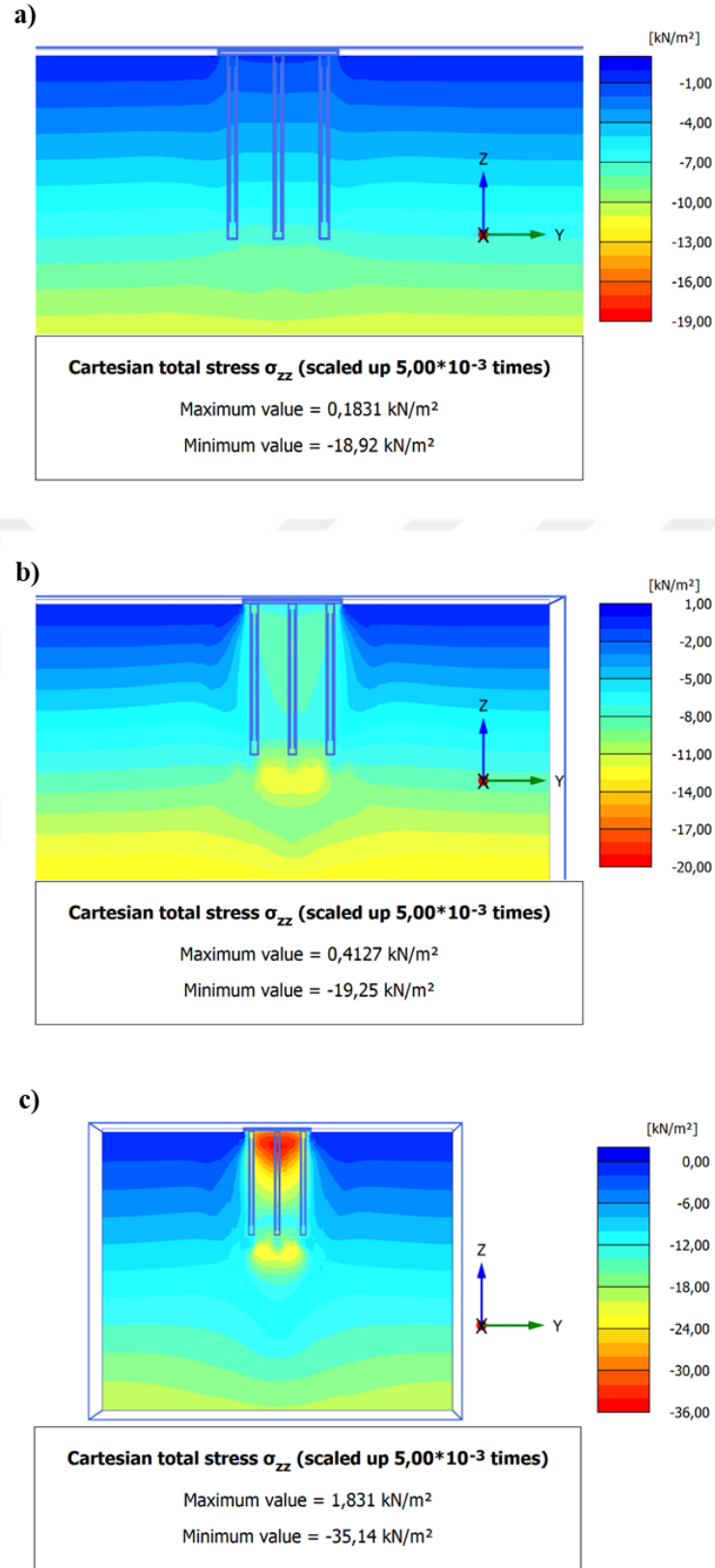
Şekil EK-1.14. T5 tasarımında farklı oturma seviyeleri için sayısal analiz ile elde edilmiş düşey gerilmelerin 1-1 aksından geçen düşey düzlemde dağılımı: a) u_v/L_{er} (%) = 0,05, b) u_v/L_{er} (%) = 0,50, c) u_v/L_{er} (%) = 2,00



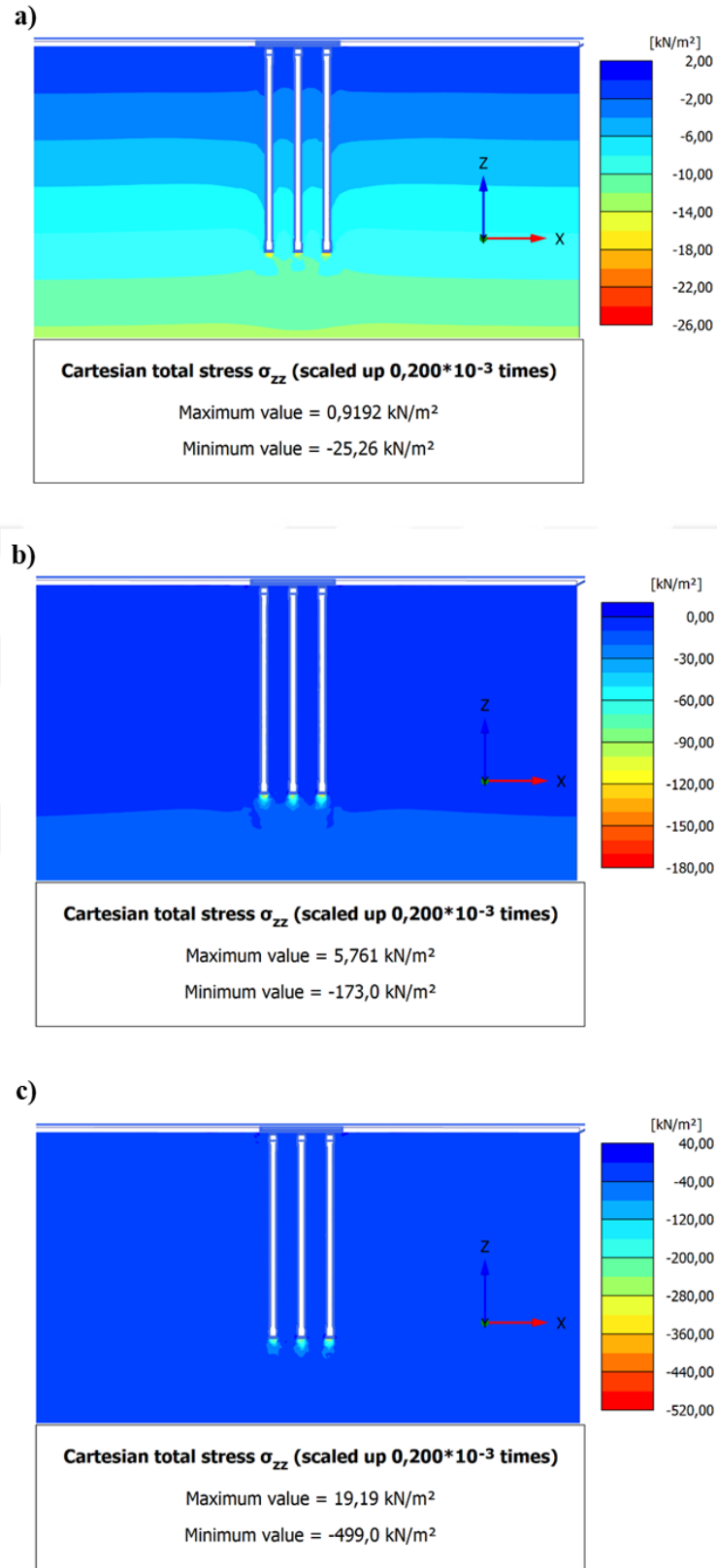
Şekil EK-1.15. T5 tasarımında farklı oturma seviyeleri için sayısal analiz ile elde edilmiş düşey gerilmelerin 2-2 aksından geçen düşey düzlemde dağılımı: a) u_v/L_{er} (%) = 0,05, b) u_v/L_{er} (%) = 0,50, c) u_v/L_{er} (%) = 2,00



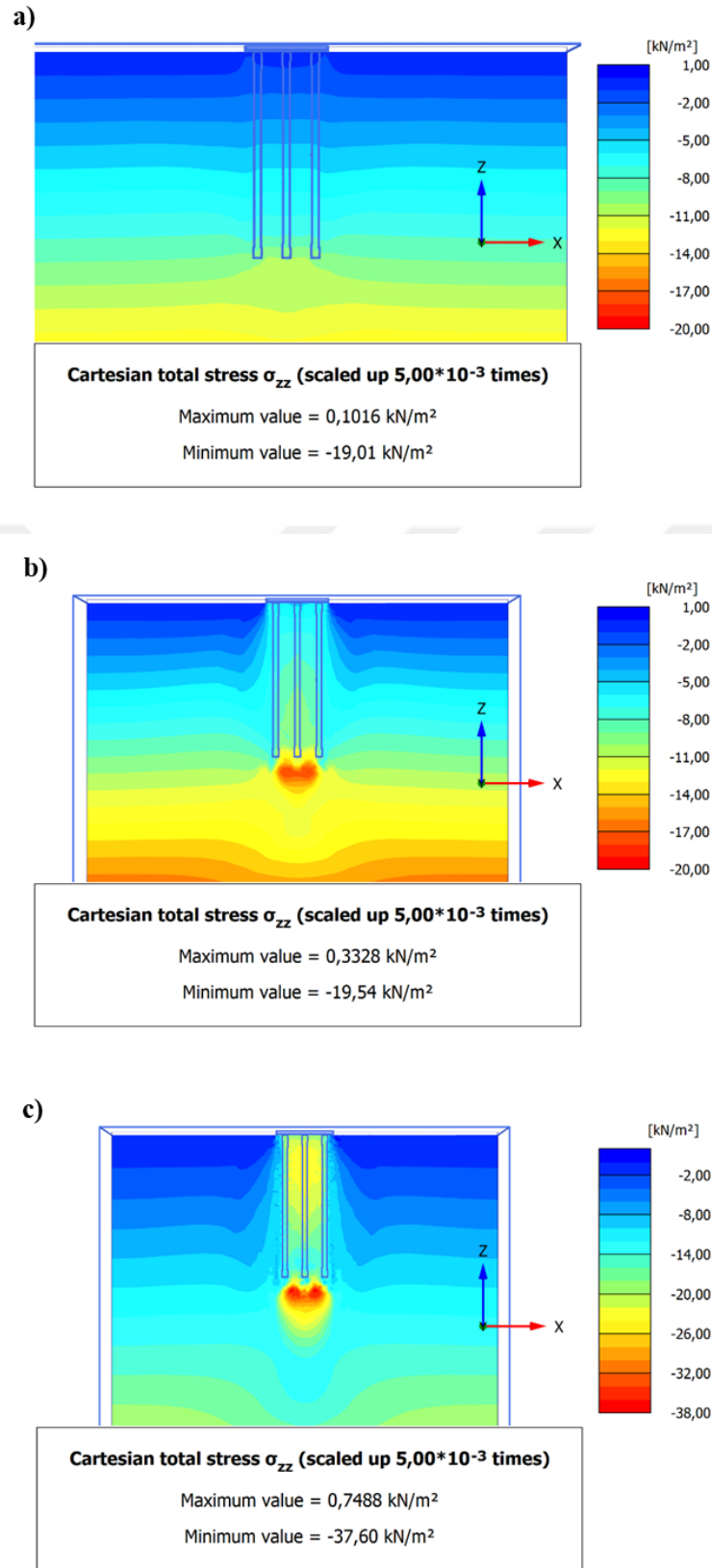
Şekil EK-1.16. T6 tasarımında farklı oturma seviyeleri için sayısal analiz ile elde edilmiş düşey gerilmelerin 1-1 aksından geçen düşey düzlemde dağılımı: a) $u_v/L_{er} (\%) = 0,05$, b) $u_v/L_{er} (\%) = 0,50$, c) $u_v/L_{er} (\%) = 2,00$



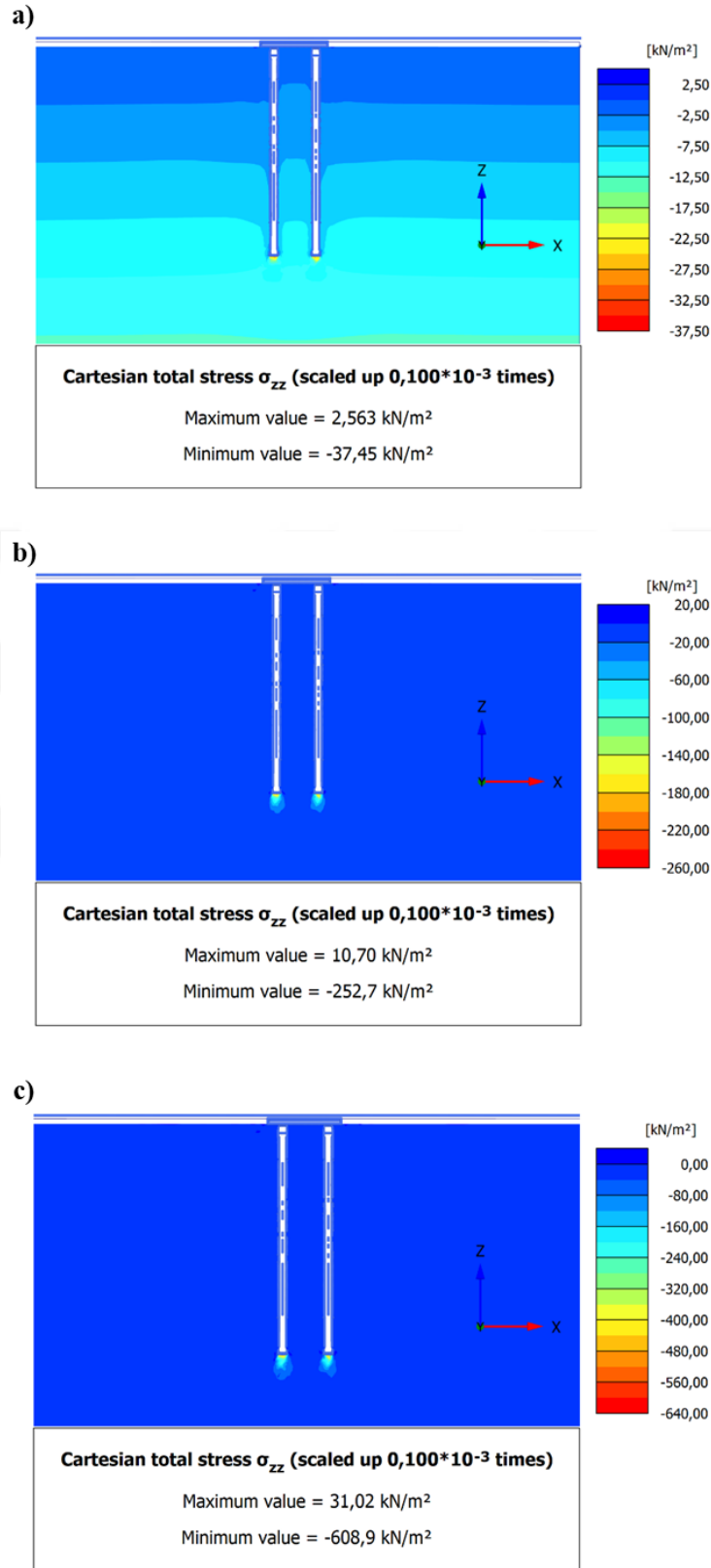
Şekil EK-1.17. T6 tasarımında farklı oturma seviyeleri için sayısal analiz ile elde edilmiş düşey gerilmelerin 2-2 aksından geçen düşey düzlemde dağılımı: a) u_v/L_{er} (%) = 0,05, b) u_v/L_{er} (%) = 0,50, c) u_v/L_{er} (%) = 2,00



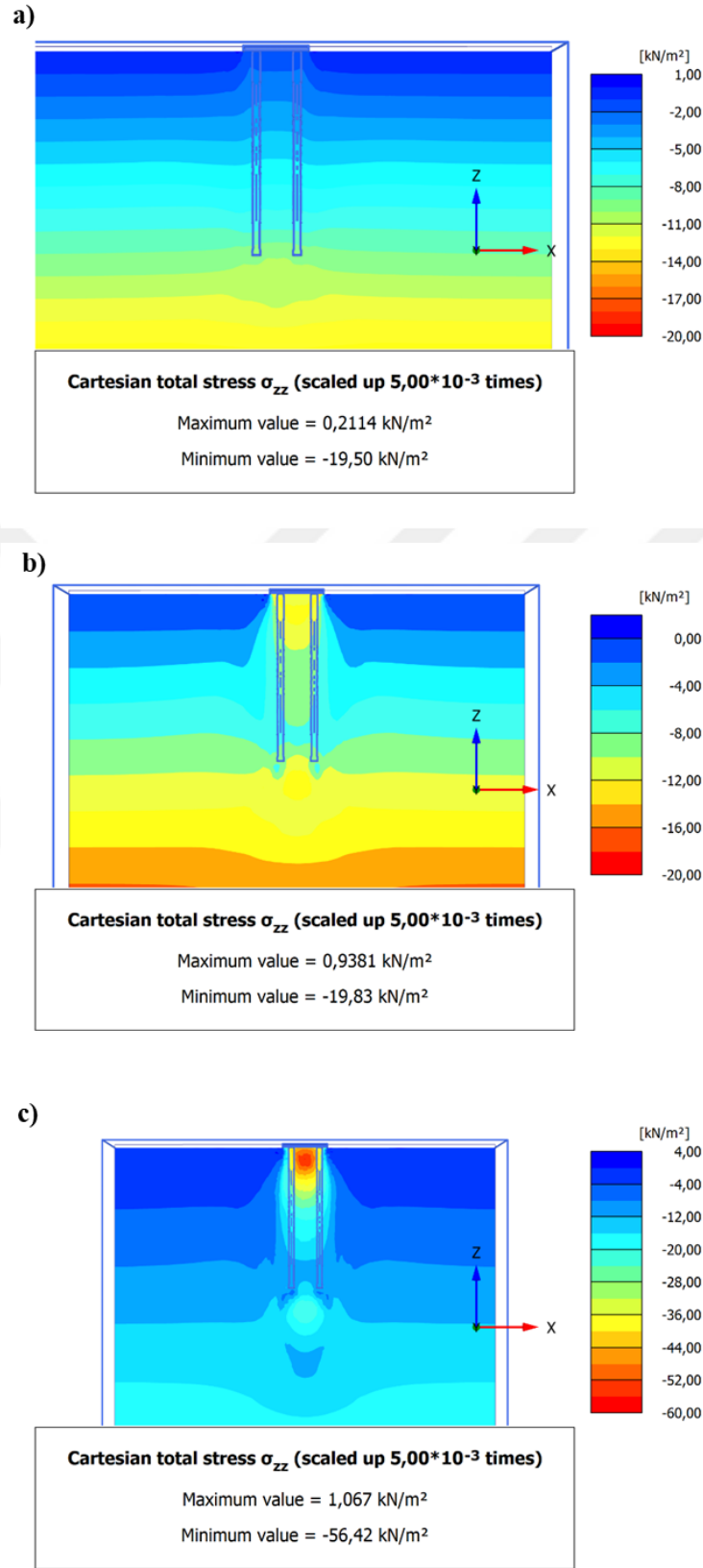
Şekil EK-1.18. T8 tasarımında farklı oturma seviyeleri için sayısal analiz ile elde edilmiş düşey gerilmelerin 1-1 aksından geçen düşey düzlemde dağılımı: a) u_v/L_{er} (%) = 0,05, b) u_v/L_{er} (%) = 0,50, c) u_v/L_{er} (%) = 2,00



Şekil EK-1.19. T8 tasarımında farklı oturma seviyeleri için sayısal analiz ile elde edilmiş düşey gerilmelerin 2-2 aksından geçen düşey düzlemde dağılımı: a) u_v/L_{er} (%) = 0,05, b) u_v/L_{er} (%) = 0,50, c) u_v/L_{er} (%) = 2,00



Şekil EK-1.20. T9 tasarımında farklı oturma seviyeleri için sayısal analiz ile elde edilmiş düşey gerilmelerin 1-1 aksından geçen düşey düzlemde dağılımı: a) u_v/L_{er} (%) = 0,05, b) u_v/L_{er} (%) = 0,50, c) u_v/L_{er} (%) = 2,00



Şekil EK-1.21. T9 tasarımında farklı oturma seviyeleri için sayısal analiz ile elde edilmiş düşey gerilmelerin 2-2 aksından geçen düşey düzlemde dağılımı: a) u_v/L_{er} (%) = 0,05, b) u_v/L_{er} (%) = 0,50, c) u_v/L_{er} (%) = 2,00