



**T.C.
MUSTAFA KEMAL ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

ÇOK KENARLI YÜZEYSEL TEMELLERİN SAYISAL ANALİZİ

Ferdane KILIÇEL

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**HATAY
AĞUSTOS-2014**



T.C.

MUSTAFA KEMAL ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ÇOK KENARLI YÜZEYSEL TEMELLERİN SAYISAL ANALİZİ

Ferdane KILIÇEL

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**HATAY
AĞUSTOS-2014**

T.C.
MUSTAFA KEMAL ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ÇOK KENARLI YÜZEYSEL TEMELLERİN SAYISAL ANALİZİ

FERDANE KILIÇEL

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Yrd. Doç. Dr. Murat ÖRNEK danışmanlığında hazırlanan bu tez **25/08/2014** tarihinde aşağıdaki jüri üyeleri tarafından **OYBİRLİĞİ** ile kabul edilmiştir.

Yrd. Doç. Dr. Murat ÖRNEK
Başkan

Yrd. Doç. Dr. Mustafa ÇALIŞKAN
Üye

Yrd. Doç. Dr. Erdoğan KANCA
Üye

Kod No:750

Prof. Dr. İsmail Hakkı KARAHAN
Enstitü Müdürü

Bu çalışma..... tarafından desteklenmiştir.

Proje No:.....

Not: Bu tezde kullanılan özgün ve başka kaynaktan yapılan bildirişlerin, çizelge, şekil ve fotoğrafların kaynak gösterilmeden kullanımı, 5846 sayılı Fikir ve Sanat Eserleri Kanunundaki hükümlere tabidir.

25/08/2014

TEZ BİLDİRİMİ

Tez içindeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edilerek sunulduğunu, tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını ve tez üzerinde Yükseköğretim Kurulu tarafından hiçbir değişiklik yapılamayacağı için tezin bilgisayar ekranında görüntülendiğinde asıl nüsha ile aynı olması sorumluluğunun tarafıma ait olduğunu beyan ederim.

Ferdane KILIÇEL

ÖZET

ÇOK KENARLI YÜZEYSEL TEMELLERİN SAYISAL ANALİZİ

Bu tez çalışmasında, kum zemine oturan çok kenarlı (+, T, H ve kare kesitli) yüzeysel temellerin davranışı sayısal olarak incelenmiştir. Analizlerde sonlu elemanlar yöntemi esasına dayanan PLAXIS 3D Foundation bilgisayar programı kullanılarak zemin-temel sisteminin yükleme sonucu oluşan göçme aşamaları modellenmiştir. Kum zemin davranışının modellenmesinde Pekleşen Zemin Modeli kullanılmıştır. Analizlerin doğruluğu ve tutarlılığını belirleyebilmek için laboratuvar ortamında yapılan deneyler modellenmeye çalışılmış, uyumluluğun belirlenmesinin ardından parametrik çalışmalara geçilmiştir. Çok kenarlı temeller üzerinde yapılan analiz sonuçlarından elde edilen değerler, yaklaşık olarak aynı alana sahip kare temellerin taşıma gücü kapasitesiyle karşılaştırılmıştır.

2014, 77 sayfa

Anahtar Kelimeler: Çok kenarlı temel, sonlu elemanlar yöntemi, taşıma gücü, oturma, gerilme

ABSTRACT

NUMERICAL ANALYSES OF MULTI-EDGE FOOTINGS

In this study, the behavior of the multi-edge shallow footings (+, T, H and square shaped) was numerically investigated. In the numerical analyses, the collapse mechanism of the soil-footing system was simulated using the finite element based computer program Plaxis 3D Foundation. The Hardening Soil Model was used to model the sand soil behavior. For obtaining the accuracy and the consistency, the laboratory model tests were simulated, and then, extra parametric analyses were performed. The numerical results of multi-edge footings were compared with the results of square shaped footings having similar areas.

2014, 77 pages

Key Words: Multi-Edge footings, finite element method, bearing capacity, settlement, stress

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans tez konusunun belirlenmesinde, araştırılması ve yazımı sırasında sahip olduğu bilgi birikimi ve tecrübesi ile çalışmayı yönlendiren ve her türlü yardımı esirgemeyen danışman hocam Sayın Yrd. Doç. Dr. Murat ÖRNEK'e ve yardımlarını esirgemeyen, bilgi birikimiyle her zaman yardımcı olan Sayın Doç. Dr. A. Azim YILDIZ hocama sonsuz saygı ve teşekkürlerimi sunarım.

Çalışmalarım sırasında yardımlarını esirgemeyen Prof. Dr. Mustafa LAMAN ve başta Arş. Gör. Baki BAĞRIAÇIK olmak üzere Çukurova Üniversitesi Mimarlık Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümündeki araştırma görevlilerine teşekkür ederim.

Yardımlarından dolayı Mustafa Kemal Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Arş. Gör. Yakup TÜREDİ'ye ve İnşaat Yük. Müh. Burakbey DAVARCI'ya teşekkür ederim.

Hayatımın her döneminde olduğu gibi çalışmalarım sırasında da bana destek olan, desteklerini hiçbir zaman eksik etmeyen aileme teşekkür ederim.

Çalışmalarım esnasında bana en büyük desteği veren, her zaman yanımda olduğunu hissettiren sevgili Bahadır OK'a teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

ÖZET.....	I
ABSTRACT.....	II
TEŞEKKÜR.....	III
İÇİNDEKİLER	IV
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	VI
ÇİZELGELER DİZİNİ	VIII
SİMGE VE KISALTMALAR DİZİNİ	IX
1. GİRİŞ	1
2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR.....	3
2.1. Yüzeysel Temeller	3
2.2. Taşıma Gücü Kapasitesi	3
2.2.1. Genel Kayma Göçmesi.....	4
2.2.2. Yerel Kayma Göçmesi	4
2.2.3. Zımbalama Kayma Göçmesi	5
2.3. Taşıma Gücünün Belirlenmesi.....	6
2.3.1. İzin Verilebilir Taşıma Kapasitesi.....	6
2.3.2. Nihai Taşıma Kapasitesi	6
2.4. Terzaghi Taşıma Gücü Teorisi.....	8
2.5. Temel Tabanında Oluşan Basınçlar	9
2.5.1. İlave Yüklerden Dolayı Oluşan Düşey Gerilmeler	10
2.5.2. İzobarlar	11
2.5.3. Yatay Bir Düzlemde veya Doğrultuda Düşey Gerilme Dağılım.....	12
2.5.4. Düşey Bir Düzlemdeki Düşey Gerilme Dağılımı	12
2.6. Kum Zemine Oturan Temeller Üzerinde Yapılan Çalışmalar	13
2.6.1. Prakash ve Saran (1971).....	13
2.6.2. Lutenege ve Adams (1998).....	16
2.6.3. Ghazavi ve Mokhtari (2008)	18
2.6.4. Keskin ve Laman (2012)	20
2.6.5. Davarcı (2013).....	22
3. MATERYAL ve YÖNTEM.....	27

3.1. Sonlu Elemanlar Yöntemi.....	28
3.2. Sayısal Analiz Programı	29
3.2.1. Sonlu Elemanlar Yönteminde Hesaplama Aşamaları	29
3.3. Zemin Modelleri	33
3.3.1. Lineer Elastik (LE) Zemin Modeli.....	33
3.3.2. Mohr-Coulomb (MC) Zemin Modeli.....	34
3.3.3. Pekleşen-Zemin (HS) Modeli.....	34
3.3.4. Yumuşak Zemin-Sünme (SSC) Modeli	36
3.4. PLAXIS 3D Foundation Programı.....	37
3.4.1. Çalışma Düzlemlerinin Oluşturulması	37
3.4.2. Sonlu Elemanlar Ağının Oluşturulması	38
3.4.3. Zemin Profilinin Elde Edilmesi.....	39
3.4.4. Malzeme Özelliklerinin Tanımlanması	40
3.4.5. Temel Elemanının Oluşturulması.....	41
3.4.6. Yükün Uygulanması.....	43
3.4.7. Hesaplamalar	44
4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA.....	45
4.1. Sayısal Analiz ve Deney Sonuçlarının Karşılaştırılması.....	45
4.2. Parametrik Çalışmalar	47
4.3. Oturma Analizleri.....	57
4.4. Gerilme Analizleri	60
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	73
KAYNAKLAR	75
ÖZGEÇMİŞ	77

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1.	Genel kayma göçmesine ait göçme yüzeyi ve yük-oturma eğrisi.....	4
Şekil 2.2.	Bölgesel kayma göçmesine ait göçme yüzeyi ve yük-oturma eğrisi	5
Şekil 2.3.	Zımbalama kayma göçmesine ait göçme yüzeyi ve yük-oturma eğrisi	6
Şekil 2.4.	Nihai taşıma kapasitesinin farklı yöntemlerle elde edilmesi (Örnek, 2009)	7
Şekil 2.5.	Terzaghi tarafından kabul edilen zemin kırılma yüzeyleri.....	8
Şekil 2.6.	Rijit temel tabanındaki oturma ve basınç dağılımı.....	10
Şekil 2.7.	Zeminde mevcut ve ilave düşey gerilmeler (Uzuner, 1998).....	11
Şekil 2.8.	Tekil yük için izobarlar (Uzuner, 1998).....	11
Şekil 2.9.	Tekil bir yük altında, yatay bir düzlemdeki gerilme dağılımı (Uzuner, 1998)	12
Şekil 2.10.	Tekil yük altında düşey doğrultuda oluşan gerilme dağılımı (Uzuner, 1998)	13
Şekil 2.11.	Eksantrik yüklü sürekli temeller için önerilen taşıma kapasitesi teorisi (Prakash ve Saran, 1971).....	14
Şekil 2.12.	$N_{c(e)}$, $N_{q(e)}$ ve $N_{\gamma(e)}$ taşıma gücü faktörleri (Prakash ve Saran, 1971).....	15
Şekil 2.13.	Eşitlik 2.6 ve 2.7 için gösterimler (Prakash ve Saran, 1971)	16
Şekil 2.14.	D/B=0 için temel yükleme deneyleri sonuçları (Lutenegger ve Adams, 1998).....	17
Şekil 2.15.	Farklı gömülme derinlikleri için yükleme deney sonuçları (Lutenegger ve Adams, 1998).....	17
Şekil 2.16.	Temel tabanı altında oluşan kesme bölgeleri (Ghazavi ve Mokhtari, 2008)	18
Şekil 2.17.	Ghazavi ve Hadiani (2005) tarafından deneylerde kullanılan model temeller (Ghazavi ve Mokhtari, 2008)	19
Şekil 2.18.	Model şekli ve engelleme modundaki makaslama bölgeleri temeller (Ghazavi ve Mokhtari, 2008)	19
Şekil 2.19.	A-A ve B-B deplasman hatları (Ghazavi ve Mokhtari, 2008)	20
Şekil 2.20.	Farklı temel genişlikleri için taban basıncı – oturma eğrileri (Keskin ve Laman, 2012)	22
Şekil 2.21.	Farklı temel genişlikleri için sayısal ve teorik q_u değerleri (Keskin ve Laman, 2012)	22
Şekil 3.1.	Sonlu elemanlar yöntemi.....	28
Şekil 3.2.	Problem geometrisinin sonlu elemanlara ayrılması	30
Şekil 3.3.	Sonlu eleman örnekleri.....	30
Şekil 3.4.	Düğüm noktası serbestlik dereceleri	31
Şekil 3.5.	Global matris eşitliklerinin elde edilmesi.....	32
Şekil 3.6.	Sınır şartlarının probleme uygulanması	33
Şekil 3.7.	Standart bir drenajlı üç eksenli basınç deneyinde hiperbolik gerilme - şekil değiştirme ilişkisi	35
Şekil 3.8.	Çalışma düzlemlerinin temsili gösterimi.....	38
Şekil 3.9.	Ağ sıklığının taşıma kapasitesine etkisi	39
Şekil 3.10.	Borehole sondaj kuyusu	40
Şekil 3.11.	Model temellere ait zemin ortamının sonlu elemanlar ağı.....	42
Şekil 3.12.	Yükleme sonucunda zeminde oluşan deformasyon görünüşleri	43

Şekil 3.13. Oturma görünümleri	44
Şekil 4.1. Kare temele ait deney ve analiz sonuçlarının karşılaştırılması	45
Şekil 4.2. (+) temele ait deney ve analiz sonuçlarının karşılaştırılması	46
Şekil 4.3. H temele ait deney ve analiz sonuçlarının karşılaştırılması	46
Şekil 4.4. T temele ait deney ve analiz sonuçlarının karşılaştırılması.....	47
Şekil 4.5. Kare temele ait alan ve taşıma gücü değişimleri.....	49
Şekil 4.6. (+) temele ait alan ve taşıma gücü değişimleri.....	50
Şekil 4.7. H temele ait alan ve taşıma gücü değişimleri.....	50
Şekil 4.8. T temele ait alan ve taşıma gücü değişimleri	51
Şekil 4.9. Kare temele ait taşıma gücü ve s/B grafiği	52
Şekil.4.10. (+) temele ait taşıma gücü ve s/B grafiği	52
Şekil.4.11. H temele ait taşıma gücü ve s/B grafiği	53
Şekil 4.12. T temele ait taşıma gücü ve s/B değerleri	53
Şekil 4.13. q_u değerinin belirlenmesi.....	54
Şekil 4.14. Kare temel ve (+) temelin karşılaştırması	55
Şekil 4.15. Kare temel ve H temelin karşılaştırması	56
Şekil 4.16. Kare temel ve T temelin karşılaştırması.....	57
Şekil 4.17. $q_u=500 \text{ kN/m}^2$ için temellerin oturma ilişkisi	58
Şekil 4.18. $q_u=1000 \text{ kN/m}^2$ için temellerin oturma ilişkisi.....	59
Şekil 4.19. Kare temele ait düşey gerilme-temel yüzey alanı ilişkisi.....	61
Şekil 4.20. + temele ait düşey gerilme-temel yüzey alanı ilişkisi	61
Şekil 4.21. H temele ait düşey gerilme-temel yüzey alanı ilişkisi.....	62
Şekil 4.22. T temele ait düşey gerilme-temel yüzey alanı ilişkisi	62
Şekil 4.23. T temele ait 1 cm derinlikteki gerilme dağılımı.....	63
Şekil 4.24. T temele ait 3 cm derinlikteki gerilme dağılımı.....	64
Şekil 4.25. T temele ait 5 cm derinlikteki gerilme dağılımı.....	64
Şekil 4.26. T temele ait 10 cm derinlikteki gerilme dağılımı.....	65
Şekil 4.27. T temele ait 15 cm derinlikteki gerilme dağılımı.....	65
Şekil 4.28. T temele ait 20 cm derinlikteki gerilme dağılımı.....	66
Şekil 4.29. T temele ait 25 cm derinlikteki gerilme dağılımı.....	66
Şekil 4.30. + temel altında farklı derinliklerde oluşan gerilme dağılımları	67
Şekil 4.31. T temele ait A-A kesitindeki düşey gerilmeler	68
Şekil 4.32. T temele ait B-B kesitindeki düşey gerilmeler.....	68
Şekil 4.33. T temele ait C-C kesitindeki düşey gerilmeler.....	68
Şekil 4.34. + temele ait A-A kesitindeki düşey gerilmeler.....	69
Şekil 4.35. + temele ait B-B kesitindeki düşey gerilmeler.....	69
Şekil 4.36. + temele ait C-C kesitindeki düşey gerilmeler	69
Şekil 4.37. T temele ait A-A kesitinde oluşan deplasman hattı.....	70
Şekil 4.38. T temele ait B-B kesitinde oluşan deplasman hattı	71
Şekil 4.39. + temele ait C-C kesitinde oluşan deplasman hattı	71
Şekil 4.40. + temele ait D-D kesitinde oluşan deplasman hattı.....	72

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 2.1.	Farklı temel genişlikleri için sayısal ve teorik q_u değerleri (Keskin ve Laman, 2012)	21
Çizelge 2.2.	Donatısız gevşek kum zeminde elde edilen deney sonuçları (Davarcı, 2013).....	24
Çizelge 2.3.	Donatısız sıkı kum zeminde elde edilen deney sonuçları (Davarcı, 2013).....	25
Çizelge 3.1.	Gevşek kum zemin için HS model parametreleri.....	41
Çizelge 4.1.	Çalışmalarda kullanılan temel boyutları.....	48
Çizelge 4.2.	Kare ve (+) temele ait temel boyutları, alanları ve q_u değerler	55
Çizelge 4.3.	Kare ve H temele ait temel boyutları, alanları ve q_u değerler	55
Çizelge 4.4.	Kare ve T temele ait temel boyutları, alanları ve q_u değerler	56
Çizelge 4.5.	Kullanılan temel modelleri, boyutları ve alanları.....	58
Çizelge 4.6.	Farklı yükleme durumlarında elde edilen oturma miktarları.....	60

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

A	: temel alanı
B	: temel genişliği
c	: kohezyon
C_u	: üniformluk katsayısı
D	: temel çapı
D_f	: temel derinliği
D_r	: sıkılık derecesi
e	: eksantriste
E	: elastisite modülü
E_{50}	: üç eksenli yükleme rijitliği
E_{ur}	: üç eksenli yükleme boşaltma rijitliği
E_{oed}	: ödometre yükleme rijitliği
$p^{ref.}$	: referans çevre basıncı
FS	: güvenlik katsayısı
GS	: güvenlik katsayısı
K	: temel şekil katsayısı
L	: temel uzunluğu
m	: mobilizasyon faktörü
N_c, N_q, N_γ	: taşıma gücü katsayıları
P_p, P_m	: pasif kuvvet
R_f	: göçme oranı
s	: oturma
u	: ötelenme hareketi
q	: taban basıncı
q_{emin}	: emin taşıma gücü
q_a	: deviatörük gerilmenin asimptotu
q_f	: göçme anındaki deviatörük gerilme
q_u	: nihai taşıma kapasitesi
Q	: yük
z	: derinlik

α	: yenilme eğrisinin zemin yüzeyi ile yapmış olduğu açı
ν	: poisson oranı
ϕ	: kayma mukavemeti açısı
ϕ_m	: mobilize edilmiş zemin sürtünme açısı
γ	: birim hacim ağırlığı
γ_{kmax}	: maksimum kuru birim hacim ağırlığı
γ_{kmin}	: minimum kuru birim hacim ağırlığı
μ	: temel şekline bağlı katsayı
λ	: sıkışma indeksi
ν	: zeminin poisson oranı
$\mathbf{O}$	: dönme hareketi
σ_z	: z derinliğindeki düşey gerilme
ϵ	: üç eksenli basınç deneyinden elde edilen düşey deformasyon
τ_z	: z derinliğindeki kayma gerilmesi
$\{u\}$	: düğüm noktası deplasman vektörü
$[k]_e$	: eleman deplasman faktörü
$\{f\}_e$	: eleman yük vektörü
$\{F\}$	: sistem yük vektörü
$[K]$	: sistem rijitlik matrisi
$\{u\}_e$	: eleman deplasman vektörü
$\{U\}$	: deplasman vektörü

1. GİRİŞ

Dünyada hızla artan nüfus birçok sorunları da beraberinde getirmektedir. Bu sorunların başında gelenlerden biri de hızla artan nüfusa karşın barınma ihtiyacının karşılanmasında yeterli yerleşim alanlarının bulunmaması ve yapı üretimi yapılabilecek alanların sınırlı olmasıdır. Bu nedenle, taşıma gücü ve oturma kriterleri bakımından yapı için olumsuz olabilecek zeminlerin de inşaat alanı olarak kullanılması zorunlu hale gelmektedir. Mühendislik yapılarının temel sistemlerinin tasarımında, zeminde taşıma gücü ve oturma koşullarının sağlanması durumunda büyük çoğunlukla yüzeysel temeller kullanılarak çözüme gidilmektedir.

Zeminlerin taşıma gücü temel altındaki zeminin birim hacim ağırlığına, kayma mukavemetine (kohezyon, içsel sürtünme açısı), ilk gerilme durumuna, deformasyon karakteristikleri gibi mekanik özelliklerine ve su hidrolik şartına bağlı olduğu kadar temelin büyüklük, derinlik, biçim, taban pürüzlülüğü ve taşıdığı yük değeri gibi özelliklerle tasarım metoduna da bağlıdır.

Geoteknik mühendisliğinde yüzeysel temeller genellikle kare, dikdörtgen, şerit, daire veya ring kesitli olarak tasarlanmaktadır. Ancak bazı uygulamalarda gerek statik, gerek mimari, gerekse de ekonomik sebeplerden dolayı farklı yüzeysel temel geometrileri (düzensiz temel geometrileri) de seçilebilmektedir. Temel mühendisliğinde kenar ve köşe sayısı 4'ten fazla olan H, + ve T gibi temeller çok kenarlı temeller olarak tanımlanmaktadır. Çok kenarlı yüzeysel temeller, düzensiz geometriye sahip yapılar tarafından aktarılan yükün emniyetli ve ekonomik bir şekilde zemin ortamına aktarılmasında kullanılmaktadır.

Bu tez çalışmasında, kum zemine oturan çok kenarlı (+, T, H ve kare kesitli) yüzeysel temellerin taşıma gücü, oturma ve gerilme davranışını incelemek amacıyla üç boyutlu sonlu elemanlar analizleri gerçekleştirilmiştir. Sayısal analizler, sonlu elemanlar yöntemi ile çözüm yapan Plaxis 3D Foundation paket programı kullanılarak yapılmıştır. Analizlerde, deneysel çalışmada izlenen programa benzer şekilde, çok kenarlı model temellerin, farklı sıklıktaki taşıma kapasiteleri araştırılmıştır. Bu tez çalışmasında Davarcı (2013) tarafından sunulan deneysel veriler kullanılmıştır. Bu amaçla deneysel çalışmadaki deney düzeneği, yükleme koşulları ve malzeme özellikleri Plaxis 3D Foundation bilgisayar programında modellenerek sayısal çözümler yapılmıştır.

Analizlerin doğruluğu ve tutarlılığını belirleyebilmek için laboratuvar ortamında yapılan deneyler modellenmiş, uyumluluğun belirlenmesinin ardından parametrik çalışmalara geçilmiştir. Çok kenarlı temeller üzerinde yapılan analiz sonuçlarından elde edilen değerler, yaklaşık olarak aynı alana sahip kare temellerin taşıma gücü kapasitesiyle karşılaştırılmıştır.

2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

Literatürde çok kenarlı yüzeysel temellerin kullanıldığı çalışmaların sayısı oldukça sınırlıdır (Ghazavi ve Hadiani, 2005; Ghazavi ve Mokhtari, 2008; Davarcı ve ark, 2014). Literatürde farklı geometrik yapıya sahip temellerin (T-konsol, küre, konik, piramit tip vs.) taşıma gücü ve oturma davranışları konularında çalışma yapan araştırmacılar da yer almaktadır (Kurian 2006; Tani ve Craig 1995; Watson ve Randolph 1997; Bransby ve Randolph 1999a; Bransby ve Randolph 1999b).

Bu bölümde, kum zemine oturan yüzeysel temellerin taşıma gücü ile ilgili çalışmalar yer almaktadır. Öncelikle yüzeysel temellerde, göçme türleri, göçmeye etki eden faktörler, taşıma gücü koşulu ve zemin emniyet gerilmesi kavramları açıklanarak, yüzeysel temellerin taşıma gücüyle ilgili yapılmış olan çalışmalara yer verilmiştir. Daha sonra, çalışmanın konusunu içeren çok kenarlı yüzeysel temellerin taşıma gücüne yönelik yapılan çalışmalar sunulmuştur.

2.1. Yüzeysel Temeller

Temel; sağlam zemine oturtulan ve yapıdan gelen yükleri temel zeminine aktaran yapı elemanıdır. Yüzeysel temellerde yapı yükü doğrudan temel tabanı ile taşıyıcı zemine aktarılır. $D_f \leq B$ olduğu sürece yüzeysel temel olarak nitelendirilir. Zemin ve yük durumuna göre çeşitli yüzeysel temeller (tekil temel, şerit temel, radye temel) mevcuttur.

2.2. Taşıma Gücü Kapasitesi

Taşıma gücü (q_u), zemine uygulanabilecek en yüksek gerilme miktarı olarak tanımlanmaktadır. Temelin taban basıncı olarak zemine aktardığı yüklerin yine temel-zemin ikilisinin sahip olduğu taşıma kapasitesi ile taşınabilmesi gerekir. Yapı yükleri temel zemininde basınç gerilmeleri ve kayma gerilmeleri oluşturmaktadır. Eğer zeminde oluşan kayma gerilmeleri zeminin kayma mukavemeti değerini aşarsa taşıma gücü göçmesi meydana gelmektedir. Taşıma gücü göçmesi üç tipte olmaktadır;

- a) Genel kayma göçmesi
- b) Yerel kayma göçmesi
- c) Zımbalama kayma göçmesi

2.2.1. Genel Kayma Göçmesi

Bu tür bir göçme türü genellikle, sıkı kum veya sert killerde görülmektedir. Temel zemininde gözlenen göçme yüzeyi ile tipik bir yük-oturma eğrisi Şekil 2.1'de yer almaktadır. Başlangıçta, temele uygulanan Q yükü ($q=Q/A$) arttıkça oturmalar artmakta iken, göçme yüküne ulaşıldığında, yük sabit kalmakta ve oturmalar da devam ederek büyük değerlere ulaşmaktadır. Zemin, kayma yüzeyleri boyunca kırılarak göçmekte ve zemin yüzeyinde kabarmalar oluşmaktadır. Nihai taşıma kapasitesi q_u , yük-oturma eğrisinin en üst noktasındaki değeri olup, yük-oturma eğrisinden açıkça belirlenebilmektedir. Grafikteki s_u , göçme anındaki oturma değeridir (Yıldız, 2002).

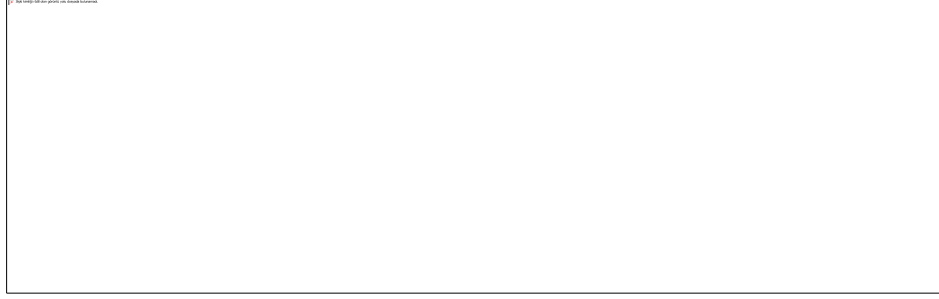


Şekil 2.1. Genel kayma göçmesine ait göçme yüzeyi ve yük-oturma eğrisi

2.2.2. Yerel Kayma Göçmesi

Bu tür bir göçme türü genellikle, orta sıkı kum veya orta sertlikteki kil zeminlerde görülmektedir. Zeminde gözlenen göçme yüzeyi ve yük-oturma eğrisi Şekil 2.2'de yer almaktadır. Şekilden görüldüğü üzere yük-oturma eğrisi, 3 bölümden oluşmaktadır. İlk bölümde q_u' =ilk göçme yükü olmak üzere, $q=q_u'$ değerine kadar yükün arttırılması durumunda, oturmalar da artmaktadır. Bu bölümde, zemin düşey yönde sıkışırken çok az miktarda yanıl deformasyonlar görülmektedir. İkinci bölümde, yani, yükün daha da arttırılması durumunda yük-oturma eğrisi daha dik ve düzensiz bir şekilde artmaktadır.

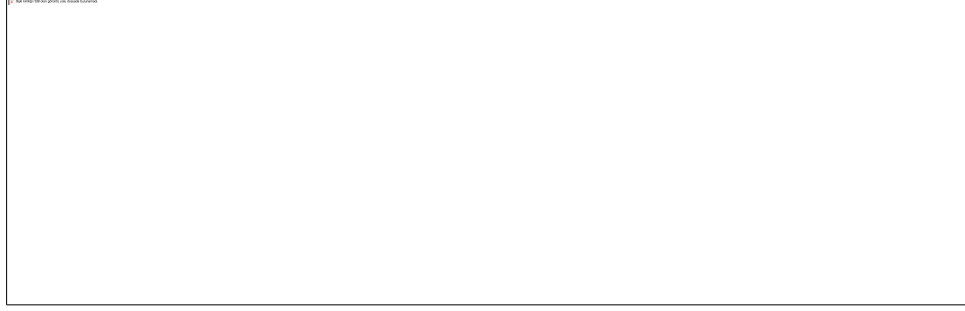
Zeminde dışa ve yukarı doğru hareketler gözlenmektedir. Üçüncü bölümde yani, $q=q_u$ olduğunda ise, göçme yüzeyi zemin yüzeyine ulaşmaktadır. Yük arttırılmaya devam ederse, zemin yüzeyinde kabarmalar oluşmakta yük-oturma eğrisi de doğrusal olarak artmaktadır. Bu tür bir göçmede eğri üzerinde q_u değeri tam olarak belirgin değildir (Yıldız, 2002).



Şekil 2.2. Bölgesel kayma göçmesine ait göçme yüzeyi ve yük-oturma eğrisi

2.2.3. Zımbalama Kayma Göçmesi

Bu tür bir göçme türü genellikle, gevşek kumlarda veya yumuşak kil zeminlerde görülmektedir. Zeminde gözlenen göçme yüzeyi ve tipik bir yük-oturma eğrisi Şekil 2.3'de yer almaktadır. Bu tür göçmelerde, zemin yüzeyinde kabarmalar oluşmamaktadır. Yük arttıkça oturmalar da sürekli artmakta olup, eğri üzerinde göçme yükü q_u net olarak tayin edilememektedir. Bu durumda, nihai taşıma kapasitesi değeri q_u 'nın belirlenmesi için iki yöntem ileri sürülmüştür. İlk yöntemde Das ve ark. (1994) tarafından, nihai taşıma kapasitesi değeri yük-oturma eğrisinde, $\Delta s/\Delta q$ oranının en büyük olduğu ve bundan sonra sabit kaldığı nokta olarak tanımlanmıştır. İkinci yöntemde ise, Yetimoğlu ve ark. (1994) tarafından yük-oturma eğrisinin başlangıç ve bitiş teğetlerinin kesişim noktası olarak tanımlanmıştır (Yıldız, 2002).



Şekil 2.3. Zımbalama kayma göçmesine ait göçme yüzeyi ve yük-oturma eğrisi

2.3. Taşıma Gücünün Belirlenmesi

2.3.1. İzin Verilebilir Taşıma Kapasitesi

Geoteknik uygulamalarında, izin verilen taşıma kapasitesi ilk olarak belirlenen nihai taşıma kapasitesinin uygun bir güvenlik faktörü ile azaltılması sonucu elde edilmektedir. Bu yaklaşımda oturma ve deformasyonlar dikkate alınmadan hesaplamalar yapılmaktadır. Tahmini oturma kabul edilemeyecek kadar fazlaysa, projede belirlenen tolere edilebilir sınırlar içerisinde tahmin edilen oturma değeri “izin verilen” değere kadar azaltılmaktadır. Oturma değerinin temel büyüklüğünden bağımsız olması bu yaklaşımı yetersiz kılmaktadır (Lutenegger ve Adams, 1998).

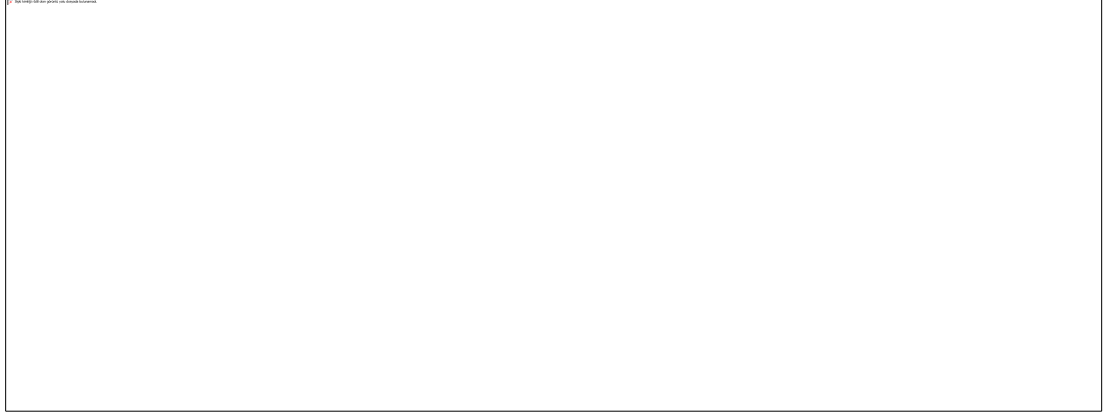
2.3.2. Nihai Taşıma Kapasitesi

Nihai taşıma kapasitesini değerlendirmek için kullanılan en yaygın yöntemler şunlardır:

1. Göreceli oturma sınırı değerine karşılık gelen temel taban basıncını seçilmesi (örneğin, $s/B \sim 10\%$); Bu yöntem 0.1B Yöntemi olarak adlandırılır.
2. Oturma değerinde belirgin bir değişimin meydana geldiği noktaya karşılık gelen yük değerinin seçilmesi; Bu yöntem Teğet Kesişim Yöntemi olarak adlandırılır.
3. Yük- oturma değerinde düzeltme yapılarak kesişim noktasına karşılık gelen yük değerinin seçilmesi; Bu yöntem Log-Log Yöntemi olarak adlandırılır.

4. Y¼k-oturma eğrisine uygun bir model seğilerek tahmini bir asimptot değere karşılık gelen y¼k değerinin seçilmesi; Bu y¼ntem Hiperbolik Y¼ntem olarak da adlandırılır (Lutenegger ve Adams, 1998).

Taşıma kapasitesinin tutarlı olabilmesi için bu y¼ntemlerden tek birinin seçilmesi ¼nemlidir. Bu y¼ntemler tipik bir temel deneyi için şekil 2.4'te g¼sterilmiřtir.



a) Teğet kesiştirme y¼ntemi

b) Log-Log y¼ntemi



b) Hiperbolik y¼ntem

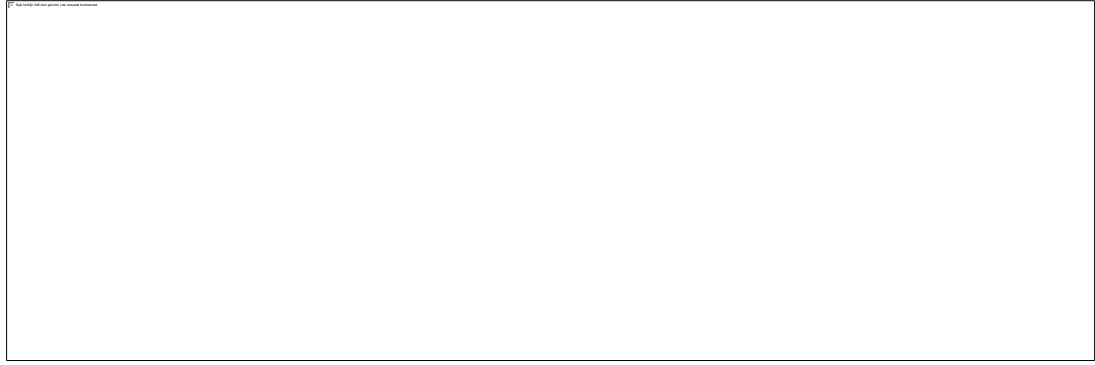
d) 0.1B y¼ntemi

şekil 2.4. Nihai Taşıma kapasitesinin farklı y¼ntemlerle elde edilmesi (¼rnek, 2009)

2.4. Terzaghi Taşıma Gücü Teorisi

Terzaghi tarafından üniform yüklü şerit temel için ileri sürülen taşıma gücü teorisinde, göçme anında temel zemininde oluşan kırılma yüzeyleri Şekil 2.5'de olduğu gibi kabul edilmiştir. Bu teoride, temel altındaki göçme bölgesi üç ana bölgeye ayrılmaktadır. Bunlar;

1. abc bölgesi: Temelin hemen altında yer alan kama şeklindeki elastik bölgedir. abc üçgeninin ac ve bc kenarları eşit olup $\alpha = \phi$ 'dir.
2. bcf bölgesi: Prandtl radyal kayma bölgesidir. cf kırılma yüzeyi logaritmik spiraldir.
3. bfg bölgesi: Rankine pasif bölgesidir. Bu bölgenin kayma yüzeylerinin yatayla yaptığı açı $(45 - \phi/2)$ 'dir.



Şekil 2.5. Terzaghi tarafından kabul edilen zemin kırılma yüzeyleri

Temel zemini; homojen, izotrop ve yarı sonsuz kabul edilerek şerit temelin nihai taşıma kapasitesi için aşağıdaki bağıntı çıkarılmıştır:

$$q_u = cN_c + \gamma D_f N_q + 0.5\gamma B N_\gamma \quad (2.1)$$

Burada N_c, N_q, N_γ , ϕ 'ye bağlı taşıma gücü katsayıları, c , kohezyon, γ , zeminin birim hacim ağırlığı, B , temel genişliği ve D_f ise, temel gömülme derinliğidir.

Terzaghi formülünün genel biçimi ise aşağıda verilmektedir:

$$q_u = K_1 c N_c + \gamma D_f N_q + K_2 \gamma B N_\gamma \quad (2.2)$$

Burada, K_1 ve K_2 temel şekil katsayılarıdır.

Güvenli bir temel veya temel sisteminin taşıma gücü ve oturma gibi iki ana şartı sağlaması gerekmektedir.

a) Taşıma gücü şartına göre; üstyapı yükü altında temel zemininde kayma kırılması oluşmamalı ve göçmeye karşı belli bir güvenlik olmalıdır. Bu durumda nihai taşıma kapasitesi değeri, belli bir güvenlik sayısına (GS) bölünerek elde edilmektedir.

$$q_{emin} = q_u / GS \quad (2.3)$$

b) Oturma şartına göre; üstyapı yükü nedeniyle temel tabanında meydana gelen oturmalar yapıya zarar vermemeli veya müsaade edilebilir sınırlar içerisinde olmalıdır. Temel zemininde meydana gelen oturmalar elastik oturma (zemin boşluklarındaki havanın dışarı çıkması ile zemin danelerinin birbirine yaklaşması sonucu oluşan), konsolidasyon oturması (zemin boşluklarındaki suyun zamanla dışarı çıkmasıyla meydana gelen oturma) ve ikincil konsolidasyon oturması (suya doymuş killerde görülen ve konsolidasyon oturmasını takip eden sıkışma) olmak üzere 3 bileşenden oluşmaktadır. Bir temel oturmasında, zemin cinsine bağlı olarak bu bileşenlerden bir veya birkaçı ihmal edilebilmektedir. Taşıma gücü ve oturma şartları sağlanarak hesaplanan taban basıncı değeri, zemin emniyet gerilmesi (q_{zemin}) olarak tanımlanmaktadır.

2.5. Temel Tabanında Oluşan Basınçlar

Temelle zeminin temas yüzeyinde oluşan gerilmeye temel taban basıncı denir. Zemin içinde sıkışabilir tabakalarda meydana gelen gerilme artışları, çok defa yapı ağırlığının sebep olduğu temel taban basınçlarından doğar. Temel tamamen bükülebilir ise üniform yükten dolayı herhangi bir cins zemindeki taban basıncı da üniform olur. Fakat bu ideal durum uygulamada gerçekleştirilemez.

Birçok yapı temeli, zeminin rijitliğine oranla çok daha fazla rijittir. Rijitlik arttıkça taban basıncı da üniform dağılımdan uzaklaşır. Kum ve kil zeminlere oturan rijit temellerin altında taban basıncı dağılışı birbirinden çok farklıdır (Özudoğru ve ark., 1996).

Sığ temellerin görevi, binadan kendisine taşıyıcı elemanlar vasıtasıyla aktarılan yükleri emniyetli bir şekilde zemine aktarabilmektedir. Binada temele aktarılan yükler zeminde ters yönde tepki gerilmelerinin oluşmasına sebep olur (Kanıt, 2003).

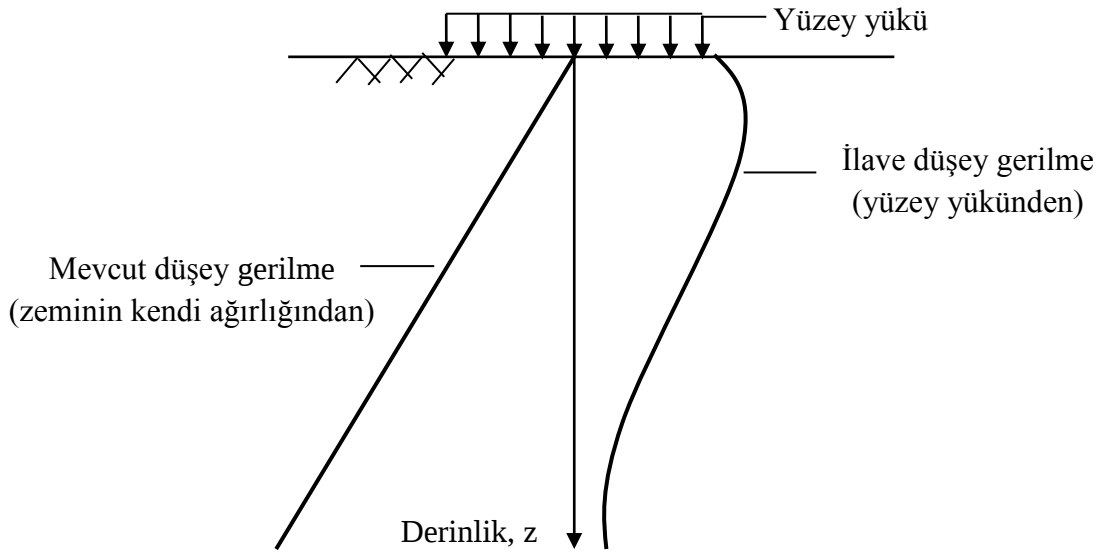
Temele aktarılan yük nedeniyle rijit bir temel tabanında oluşan oturma ve basınç dağılımı, zemin cinsine bağlı olarak farklılık göstermektedir. Kil ve kum zemin üzerine oturan rijit bir temel tabanında oluşan oturma ve basınç dağılımları Şekil 2.6’da görülmektedir. Her iki zeminde de oturmalar üniform iken taban basıncı dağılımları farklıdır. Kil zeminlerde temel kenarlarında taban basıncı maksimum olurken, kum zeminde ise, temel merkezinde maksimum olmaktadır.



Şekil 2.6. Rijit temel tabanındaki oturma ve basınç dağılımı

2.5.1. İlave Yüklerden Dolayı Oluşan Düşey Gerilmeler

Zemin yüzeyinde uygulanan bir yükten dolayı zemin kütlesi içindeki noktalarda gerilme artışları meydana geleceği bilinmektedir. Şekil 2.7’de zemin yüzeyine yakın bir yükten dolayı, alttaki zemin tabakalarına iletilen düşey gerilmelerin derinlikle dağılımı gösterilmiştir. Şekilden görülebileceği gibi, derinlik arttıkça gerilmelerin şiddeti azalmaktadır. Bu gerilmelerin gerçek dağılımını ve değerlerini belirleyebilmek için uygulanan yükün şiddeti, yük uygulanan alanın boyutları ile biçimi ve zemin özelliklerinin bilinmesi gerekir (Özaydın, 1989).

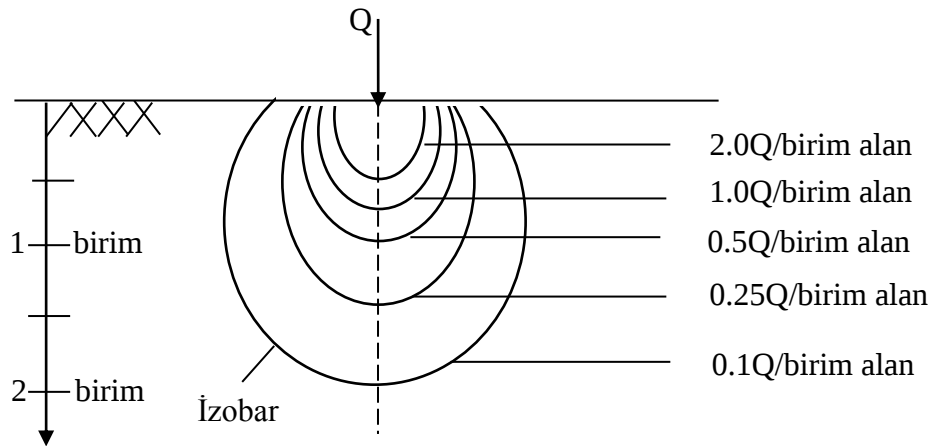


Şekil 2.7. Zeminde mevcut ve ilave düşey gerilmeler (Uzuner, 1998)

Yüzey yüklerinden dolayı, zeminde oluşan düşey gerilme dağılımlarının belirlenmesinde kullanılan bazı yöntemler aşağıda açıklanmaktadır.

2.5.2. İzobarlar

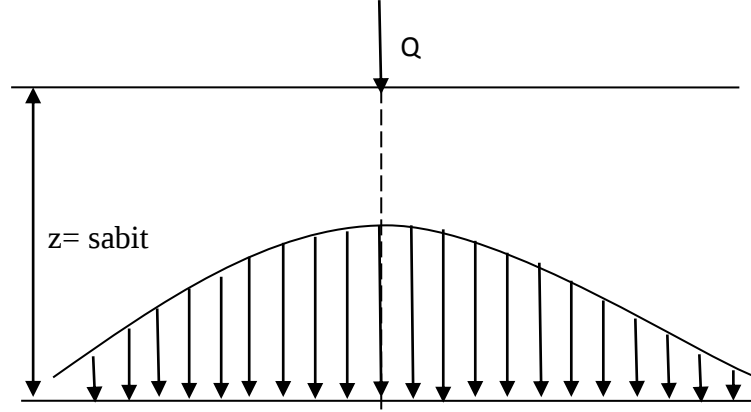
İzobar (basınç soğanı), eşit düşey gerilme noktalarını birleştiren eğri olarak bilinmektedir. Şekil 2.8’de tekil yükten oluşan izobarlar görülmektedir.



Şekil 2.8. Tekil yük için izobarlar (Uzuner, 1998)

2.5.3. Yatay Bir Düzlemde veya Doğrultuda Düşey Gerilme Dağılımı

Herhangi bir derinlikteki Q tekil yükünün altında ($z = \text{sabit}$) bir yatay düzlemdeki düşey gerilme dağılımı Şekil 2.9'da görülmektedir.

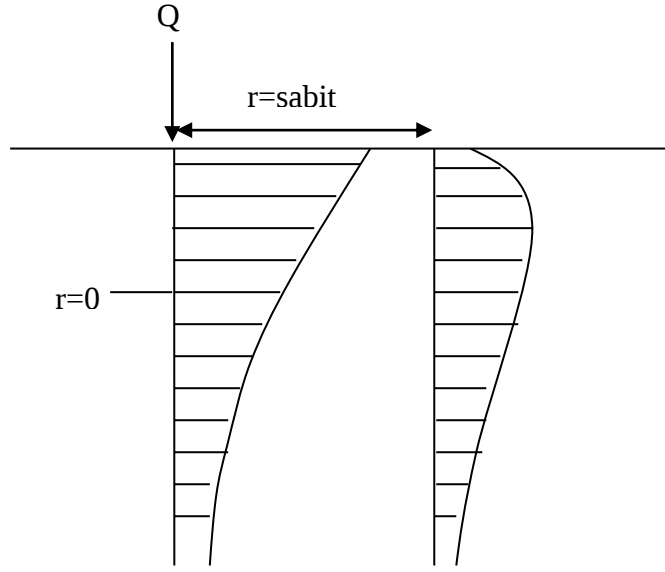


Şekil 2.9. Tekil bir yük altında, yatay bir düzlemdeki gerilme dağılımı (Uzuner, 1998)

Şekilden de anlaşıldığı gibi yükün etki noktasından yanlara doğru uzaklaştıkça aynı düzlemdeki düşey gerilme değerleri azalmaktadır.

2.5.4. Düşey Bir Düzlemdeki Düşey Gerilme Dağılımı

Tekil yükten dolayı, herhangi bir $r = \text{sabit}$ uzaklıktaki bir düzlem veya doğrultudaki düşey gerilme artışı Şekil 2.10'da görülmektedir. Buna göre düşey düzlem boyunca gerilme dağılımı yüzeye yakın kısımlarda büyük değerlerde iken yüzeyden aşağı doğru gidildikçe düşey gerilme değerleri azalmaktadır (Bağrıaçık, 2010).

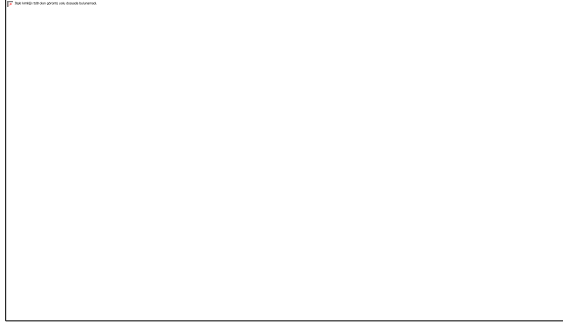


Şekil 2.10. Tekil yük altında düşey doğrultuda oluşan gerilme dağılımı (Uzuner, 1998)

2.6. Kum Zemine Oturan Temeller Üzerinde Yapılan Çalışmalar

2.6.1. Prakash ve Saran (1971)

Prakash ve Saran (1971) tarafından eksantrik yüke maruz kalan sürekli temellerin taşıma gücünü tahmin edebilmek için kapsamlı bir formül geliştirilmiştir. Buna göre, eksantrik yüke maruz kalan sürekli yüzeysel temel altındaki zeminde olduğu varsayılan göçme yüzeyi Şekil 2.11’de gösterilmiştir. B genişliğindeki bir temele merkezden e kadar mesafede birim uzunluğa etkiyen Q_u nihai yükü uygulandığında Şekil 2.11’da görülen I. bölge  ve  kama açıları yapan elastik bölgedir. II. ve III. bölgeler Terzaghi kabulüne benzetilerek II. bölge radyal kayma, III. bölge ise Rankine pasif bölgesidir.



(a)



(b)



(c)

Şekil 2.11. Eksantrik yüklü sürekli temeller için önerilen taşıma kapasitesi teorisi (Prakash ve Saran, 1971)

Prakash ve Saran (1971) tarafından temel tabanı altında oluşan abc elastik kama bölgesi dikkate alınarak taşıma kapasitesi ifadesi geliştirilmiştir (Şekil 2.11a). Şekil 2.11b’de zemin ve temelin temas genişliğinin Bx_1 olduğuna dikkat edilmelidir. Kamanın kendi ağırlığı ihmal edildiğinde;

$$Q_u = P_p \cos\left(\frac{P_p}{P_m} - \phi\right) + P_m \cos\left(\frac{P_m}{P_a} - \phi_m\right) + C_a \sin\left(\frac{P_p}{P_m}\right) + C'_a \sin\left(\frac{P_m}{P_a}\right) \quad (2.4)$$

P_p, P_m = bc ve ac kama yüzeyleri boyunca kamanın birim uzunluğuna etkiyen pasif kuvvetler

ϕ = zeminin sürtünme açısı

ϕ_m = mobilize edilmiş zemin sürtünme açısı ($\leq \phi$)

$$C_a = \text{bc kama yüzeyi boyunca adezyon} = \frac{cBx_1 \sin\left(\frac{P_p}{P_m}\right)}{\sin\left(\frac{P_p}{P_m} + \frac{P_m}{P_a}\right)}$$

$$C'_a = \text{ac kama yüzeyi boyunca adezyon} = \frac{mcBx_1 \sin\left(\frac{P_m}{P_a}\right)}{\sin\left(\frac{P_p}{P_m} + \frac{P_m}{P_a}\right)}$$

m = mobilizasyon faktörü (≤ 1)

c = kohezyon

$$\frac{Q_u}{BX_1} = \frac{1}{2} \gamma B N_{\gamma(e)} + \gamma D_f N_{q(e)} + c N_{c(e)}$$

(2.5)

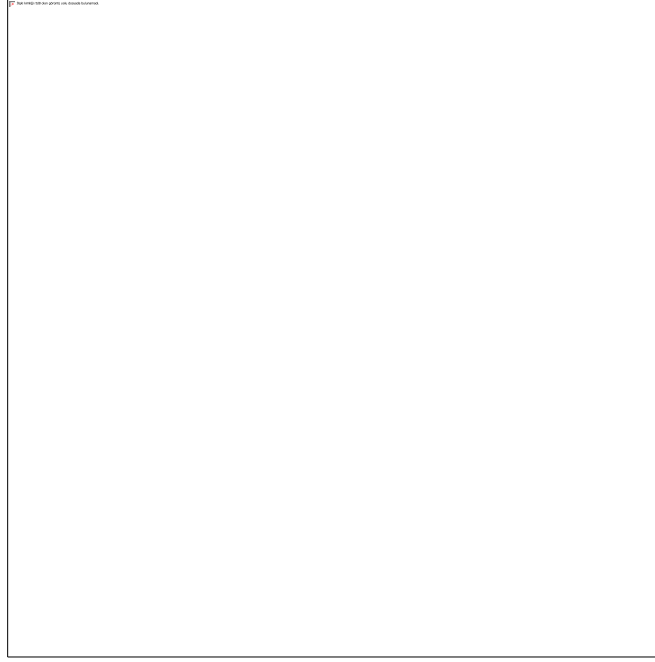
$N_{\gamma(e)}, N_{q(e)}, N_{c(e)}$ = sürekli temel eksantrik yüklemesi için taşıma kapasitesi faktörleri, e/B , ϕ ve temel temas faktörü x_1 yukarıda belirtilen taşıma kapasitesi faktörlerinin fonksiyonlarıdır. Taşıma gücü faktörlerini elde etmek için, Prakash ve Saran (1971) tarafından x_1 in değişimi Şekil 2.11c’de gösterildiği gibi kabul edilmiştir. $N_{\gamma(e)}, N_{q(e)}$ ve $N_{c(e)}$ ile ϕ ve e/B varyasyonları Şekil 2.12’de gösterilmektedir. Prakash ve Saran (1971) tarafından aynı zamanda güvenlik faktörü FS eşitliği için merkezi ve eksantrik yükleme koşullarında temel altındaki oturma ilişkileri verilmiştir.

$$\frac{S_e}{S_o} = 1.0 - 1.63 \left(\frac{e}{B} \right) - 2.63 \left(\frac{e}{B} \right)^2 + 5.83 \left(\frac{e}{B} \right)^3 \quad (2.6)$$

$$\frac{S_m}{S_o} = 1.0 - 2.31 \left(\frac{e}{B} \right) - 22.61 \left(\frac{e}{B} \right)^2 + 31.54 \left(\frac{e}{B} \right)^3 \quad (2.7)$$



Şekil 2.12. $N_{c(e)}, N_{q(e)}$ ve $N_{\gamma(e)}$ taşıma gücü faktörleri (Prakash ve Saran, 1971)



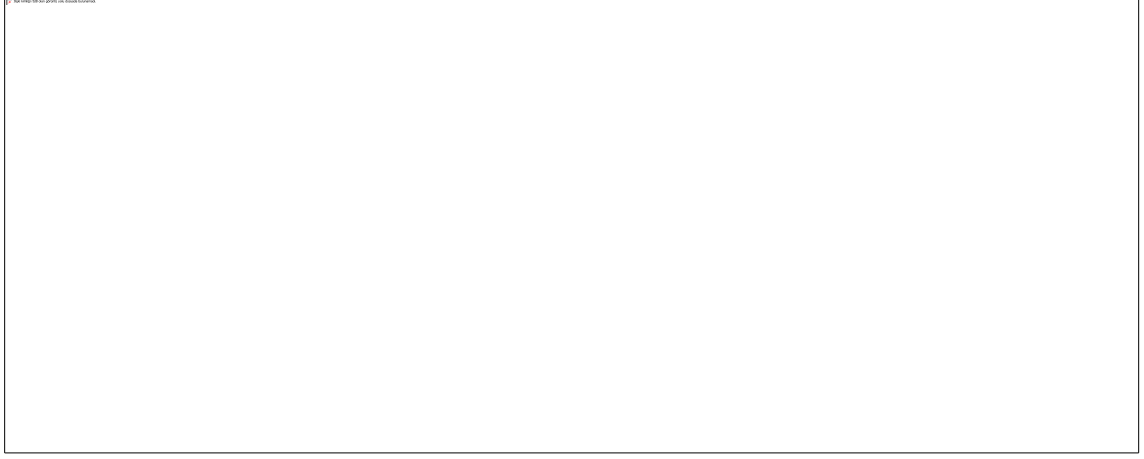
Şekil 2.13. Eşitlik 2.6 ve 2.7 için gösterimler (Prakash ve Saran, 1971)

2.6.2. Lutenegger ve Adams (1998)

Lutenegger ve Adams (1998) tarafından yapılan çalışmada sıkıştırılmış kum zemine oturan yüzeysel temellerin taşıma gücü ve yük-oturma davranışları yükleme deneyleri ile belirlenmiştir. Çalışmalarda;

- Temel genişliğinin nihai taşıma kapasitesi üzerindeki etkisi incelenmiştir.

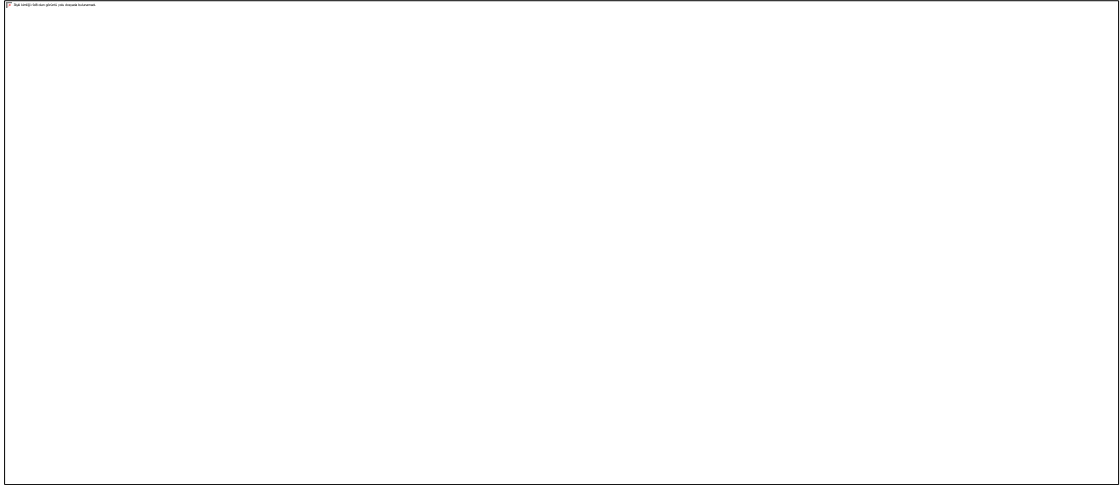
Gömülme derinliği (D_f) sabit tutulup, temel genişliği (B) değiştirilerek deneyler yapılmıştır. $D_f/B=0$ için yapılmış olan deney sonuçları Şekil 2.14’de verilmiştir. Relatif basıncın çok büyük olmadığı durumlarda temellere ait yükleme deney sonuçlarında çok fazla fark olmadığı görülmektedir.



Şekil 2.14. $D_f/B=0$ için temel yükleme deneyleri sonuçları (Lutenegger ve Adams, 1998)

- Gömülme derinliğinin nihai taşıma kapasitesi üzerindeki etkisi incelenmiştir.

Genişliği sabit tutularak derinliği artırılan temelin davranışı Şekil 2.15’de gösterilmiştir. Şekil 2.5a’da gösterilen üç deneyden elde edilen oturma eğrilerinde geleneksel taşıma kapasitesi teorisinin öngördüğü gibi davranışın derinlikle değiştiği görülmektedir. Şekil 2.15b’de gösterildiği gibi değişen gömülme oranında temel boyutuna göre göreceli oturmanın (s/B) basınç üzerindeki etkisi açıkça görülebilmektedir.



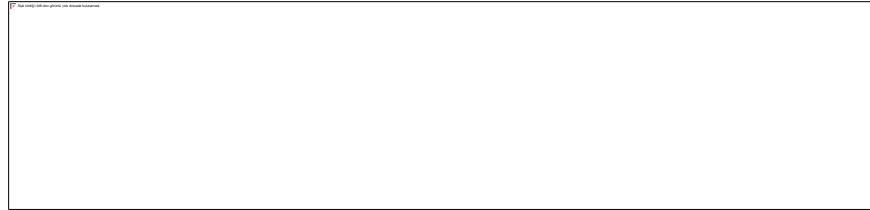
Şekil 2.15. Farklı gömülme derinlikleri için yükleme deney sonuçları (Lutenegger ve Adams, 1998)

Lutenegger ve Adams (1998) tarafından yapılan çalışma kapsamında 0, 0.5 ve 1 m olmak üzere üç farklı derinlikte ve 0.30, 0.61, 0.91 ve 1.22 m olmak üzere 4 farklı genişlikte temel kullanılarak deneyler yapılmıştır. Sunulan deney sonuçları ile gösterilen en önemli sonuç, kumdaki yüzeysel temellerin taşıma kapasitesi ve oturma ilişkileridir. Tasarım için yararlı olabileceği düşünülen basit bir model üzerinde yapılan deneylerin kumlar üzerindeki sığ temellerin davranışını tanımlamakta yararlı olabileceği sonuçlar da verilmiştir.

2.6.3. Ghazavi ve Mokhtari (2008)

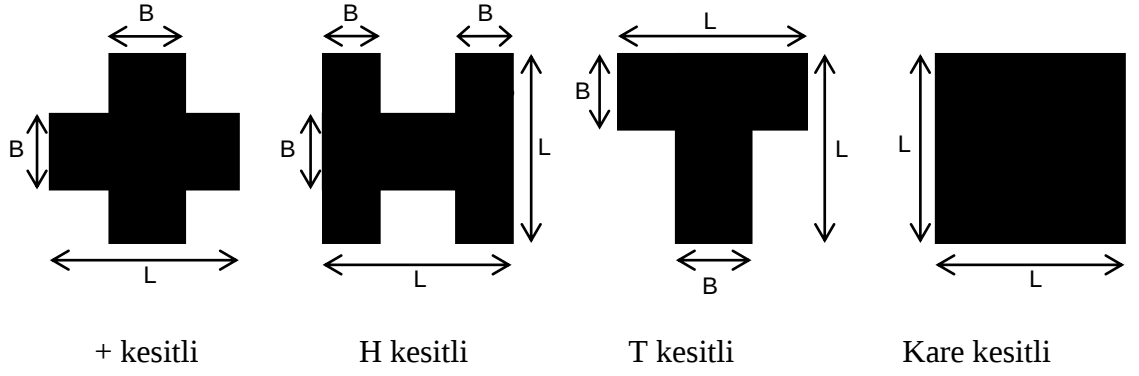
Ghazavi ve Hadiani (2005) tarafından Şekil 2.17’de gösterilen çeşitli geometrilerdeki model temeller üzerinde deneysel çalışmalar yapılmış ve deneysel verilere dayanan ampirik bir yaklaşım kullanılarak çok kenarlı temellerin taşıma gücü kapasitesi hesaplanmıştır. Deneylerinde + ve H şeklindeki model temel üzerine yük uygulanmıştır.

Çalışma sonuçlarına göre çok kenarlı temel sabit bir yüke tabi tutulduğunda, temelin her bir bölümü için Şekil 2.16’da verilen kesme bölgelerinin oluşacağı ve oluşan bu bölgeler nedeniyle zeminin daha fazla direnç göstereceği kabul edilmektedir. Çünkü bir bölümde oluşan kesme bölgesi diğer bölümlere pasif kuvvet uygulamaktadır.



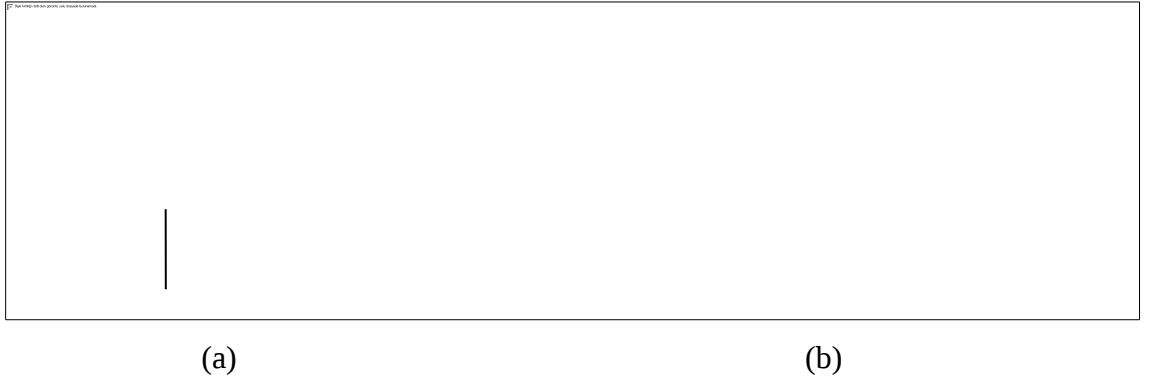
Şekil 2.16. Temel tabanı altında oluşan kesme bölgeleri (Ghazavi ve Mokhtari, 2008)

Ghazavi ve Mokhtari (2008) tarafından kum zemine oturan H ve + kesitli yüzeysel temellerin taşıma gücü kapasitesi incelenmiştir (Şekil 2.17). Bu amaçla üç boyutlu FLAC 3D analiz programı kullanılarak zemin-temel sisteminin yükleme sonucu oluşan göçme aşamalarının simülasyonları oluşturulmuştur. Sayısal analizleri doğrulamak için Ghazavi ve Hadiani (2005)’ye ait deneysel veriler kullanılmıştır.

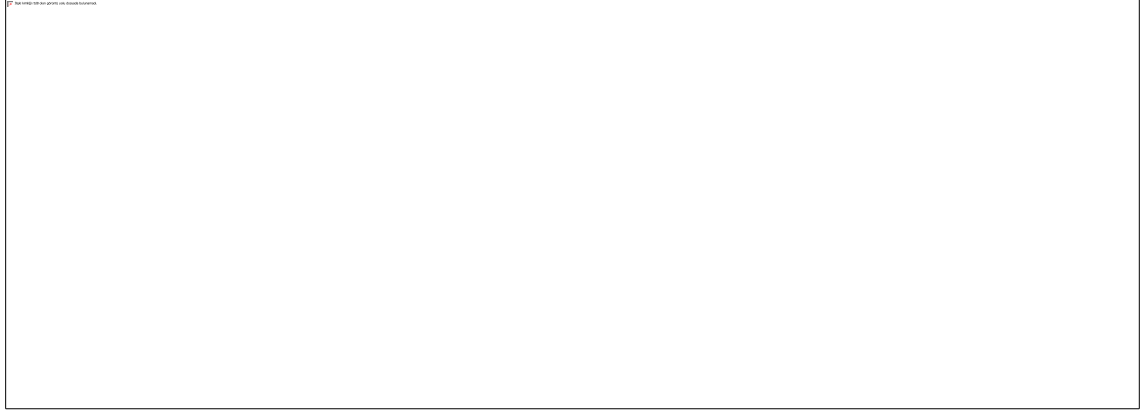


Şekil 2.17. Ghazavi ve Hadiani (2005) tarafından deneylerde kullanılan model temeller (Ghazavi ve Mokhtari, 2008)

Ghazavi ve Mokhtari (2008) tarafından yapılan çalışmada kesme bölgesindeki herhangi bir müdahalenin taşıma kapasitesinin artmasına yol açtığı kabul edilmiştir. Şekil 2.18a'da + temelde kesit alınan kısımlar, Şekil 2.18b'de + şeklindeki temelin kesme bölgesindeki engelleme etkisi gösterilmiştir. Şekil 2.19'da bloklar arası uzaklığın artmasından dolayı blokların birbirlerini etkileyemediği ve kesme bölgesindeki engelleme etkisinin azaldığı görülmektedir.



Şekil 2.18. Model şekli ve engelleme modundaki makaslama bölgeleri (Ghazavi ve Mokhtari, 2008)



(a)

(b)

Şekil 2.19. A-A ve B-B deplasman hatları (Ghazavi ve Mokhtari, 2008)

Ghazavi ve Mokhtari (2008) tarafından çok kenarlı temeller üzerindeki sayısal analiz sonuçları aynı alana sahip kare temeller üzerinde yapılan analiz sonuçları ile karşılaştırılmış ve çok kenarlı temellerin nihai taşıma kapasitesinin aynı genişlikteki kare temellere göre genellikle daha fazla olduğu gösterilmiştir.

2.6.4. Keskin ve ark. (2012)

Keskin ve Laman (2012) tarafından kum zemin üzerine oturan şerit temellerin taşıma kapasitesi sayısal ve teorik olarak araştırılmıştır. Bu amaçla, kum zemine oturan bir şerit temel modeli oluşturularak üç boyutlu Plaxis 3D bilgisayar programı ve literatürdeki mevcut teorik yöntem (Terzaghi Yöntemi) kullanılarak analizler gerçekleştirilmiştir. Sayısal analizlerde, farklı temel genişlikleri kullanılarak, temel genişliğinin, taşıma kapasitesi, q_u ve taşıma gücü katsayısına, N_γ etkisi incelenmiştir ve teorik yöntemle karşılaştırmalar yapılmıştır. Sayısal analiz sonuçlarından, temel genişliğinin artmasıyla şerit temelin taşıma kapasitesinin arttığı, taşıma kapasitesi katsayısının ise azaldığı görülmüştür.

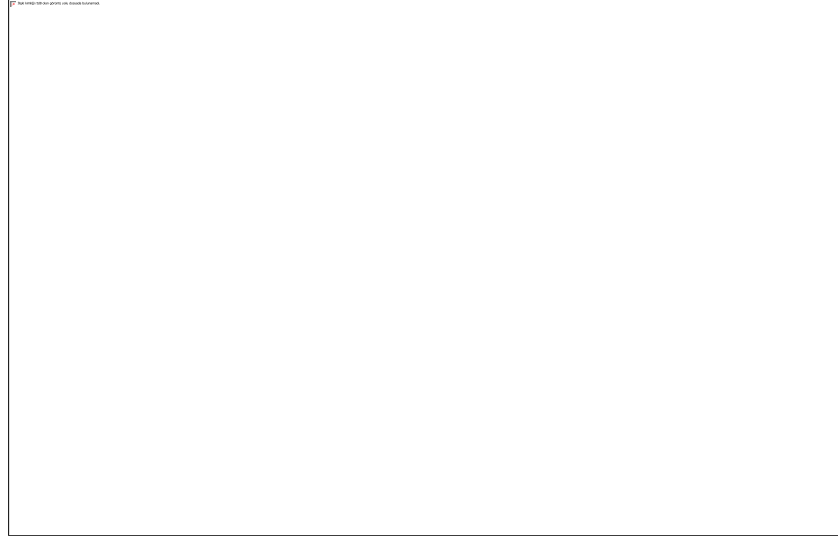
Keskin ve Laman (2012) tarafından yapılan analiz çalışmalarında; farklı temel genişlikleri ($B=1.00-1.25-1.50-1.75-2.00$ m) kullanılmış ve model temel, kiriş eleman olarak modellenmiştir. Analizlerde farklı genişliklerdeki model temeller üniform olarak yüklenmiştir. Sonlu elemanlar ağı orta sıklıkta oluşturulmuş, ayrıca temel altında ağ sıklaştırması yapılarak daha hassas çözüm elde edilmiştir. Sınır koşulları olarak, modele sayısal analiz programında mevcut standart sınır koşulları uygulanmıştır. Analizlerde

aşamalı çözüm gerçekleştirilmiş ve başlangıç gerilmeleri oluşturulduktan sonra temel ve yük aktif hale getirilerek plastik çözüm yapılmıştır. Sayısal analizlerde, yük – oturma eğrisinden belirgin bir göçme yükü elde edilemediğinden, diğer yöntemlere göre daha kesin ve objektif değerler veren 0.1B yöntemi kullanılmış ve temel genişliğinin %10'una karşılık gelen gerilme değeri nihai taşıma kapasitesi, q_u değeri olarak belirlenmiştir.

Keskin ve Laman (2012) tarafından yapılan çalışmanın sonucunda Şekil 2.20'de görüldüğü gibi temel genişliğinin artmasıyla taşıma kapasitesi değerlerinin de beklendiği gibi arttığı belirlenmiştir. Temel genişliğinin %10'una karşılık gelen oturma değerleri için elde edilen nihai taşıma kapasitesi değerleri ise Şekil 2.21 ve Çizelge 2.1'de teorik yöntem sonuçlarıyla birlikte verilmiştir. Şekil 2.21 ve Çizelge 2.1'de hem sayısal analiz hem de Terzaghi yöntemiyle elde edilen nihai taşıma kapasitesi, q_u değerlerinin temel genişliğinin artmasıyla birlikte arttığı görülmektedir.

Çizelge 2.1. Farklı temel genişlikleri için sayısal ve teorik q_u değerleri (Keskin ve Laman, 2012)

Temel Genişliği, B (m)	Sayısal Analiz q_u (kN/m²)	Terzaghi q_u (kN/m²)
1.00	1064	1106
1.25	1258	1383
1.50	1387	1660
1.75	1515	1936
2.00	1599	2213



Şekil 2.20. Farklı temel genişlikleri için taban basıncı – oturma eğrileri (Keskin ve Laman, 2012)



Şekil 2.21. Farklı temel genişlikleri için sayısal ve teorik q_u değerleri (Keskin ve Laman, 2012)

2.6.5. Davarcı (2013)

Davarcı (2013) tarafından yapılan çalışmada, donatısız-donatılı gevşek-sıkı kum zemine oturan çok kenarlı yüzeysel temellerin taşıma gücü ve oturma davranışı laboratuvar ortamında yapılan model deneylerle araştırılmıştır. Deneylerde temel elemanı olarak H, +, T ve kare kesitli model temeller, güçlendirme elemanı olarak da

geogrid donatı kullanılmıştır. Toplam 170 adet deneyin yapıldığı çalışmada temel geometrisi (H, +, T ve kare kesitli), zemin türü (gevşek-sıkı kum), geogrid donatı yerleşimi (ilk donatı derinliği, donatılar arası mesafe, donatı sayısı) gibi parametrelerin çok kenarlı yüzeysel temellere ait taşıma gücü ve oturma karakteristikleri üzerindeki etkileri araştırılmış ve göçme mekanizmaları tespit edilmiştir.

Davarcı (2013) tarafından yapılan çalışmada donatısız olarak gevşek ve sıkı kum zeminde yaptığı deneylerde, +, H, T ve kare kesitli çok kenarlı model temellerin taşıma gücü ve oturma davranışı ele almış ve toplamda 25'er adet deney yapılmıştır. Sonuçlarda, farklı geometriye ve yaklaşık aynı yüzey alanına sahip temellerin göçme yüklerinin birbirine yakın olduğu belirlenmiştir. Kullanılan tüm temel tipleri ve yapılan deney sonucu elde edilen göçme yükleri Çizelge 2.2 ve Çizelge 2.3'de verilmiştir. D; deneyi, yanındaki numara da deney sayısını ifade etmektedir. B; temel genişliği, L; temel uzunluğu, A; alan, Q_u ; göçme yükü olarak verilmiştir.

Çizelge 2.2. Donatısız gevşek kum zeminde elde edilen deney sonuçları (Davarcı, 2013)

(+ Kesitli)							
Gevşek Kum							
Deney	B (cm)	L (cm)	A (cm²)	A (m²)	Q_u (N)	Q_u (kN)	q_u (kPa)
D1	3	10.0	36	0.0036	121	0.121	34
D2	4	12.5	84	0.0084	290	0.290	35
D3	3	15.0	81	0.0081	325	0.325	40
D4	4	15.0	104	0.0104	455	0.455	44
D5	5	15.0	125	0.0125	546	0.546	44
D6	6	15.0	144	0.0144	783	0.783	54
D7	7	15.0	161	0.0161	1005	1.005	62
(H Kesitli)							
Gevşek Kum							
Deney	B (cm)	L (cm)	A (cm²)	A (m²)	Q_u (N)	Q_u (kN)	q_u (kPa)
D8	3	10.0	72	0.0072	239	0.239	33.19
D9	4	12.5	118	0.0118	576	0.576	48.81
D10	4	15.0	148	0.0148	824	0.824	55.68
D11	5	15.0	175	0.0175	1276	1.276	72.91
D12	6	15.0	198	0.0198	1446	1.446	73.03
(T Kesitli)							
Gevşek Kum							
Deney	B (cm)	L (cm)	A (cm²)	A (m²)	Q_u (N)	Q_u (kN)	q_u (kPa)
D13	3	10.0	51	0.0051	119	0.119	23.33
D14	4	12.5	118	0.0118	243	0.243	20.59
D15	3	15.0	81	0.0081	310	0.310	38.27
D16	4	15.0	104	0.0104	370	0.370	35.58
D17	5	15.0	125	0.0125	611	0.611	48.88
D18	6	15.0	144	0.0144	723	0.723	50.21
D19	7	15.0	161	0.0161	990	0.990	61.49
(Kare Kesitli)							
Gevşek Kum							
Deney	B (cm)	L (cm)	A (cm²)	A (m²)	Q_u (N)	Q_u (kN)	q_u (kPa)
D20	5	5.0	25	0.0025	100	0.100	40.00
D21	10	10.0	100	0.0100	603	0.603	60.30
D22	15	15.0	225	0.0225	1651	1.651	73.38
D23	20	20.0	400	0.0400	2632	2.632	65.80
D24	25	25.0	625	0.0625	3549	3.549	56.78
D25	30	30.0	900	0.0900	5219	5.219	57.99

Çizelge 2.3. Donatısız sıkı kum zeminde yapılan deneylerden elde edilen sonuçları (Davarcı, 2013)

(+ Kesitli)							
Sıkı Kum							
Deney	B (cm)	L (cm)	A (cm²)	A (m²)	Q_u (N)	Q_u (kN)	q_u (kPa)
D86	3	10.0	36	0.0036	676	0.676	188
D87	4	12.5	84	0.0084	1268	1.268	151
D88	3	15.0	81	0.0081	1355	1.355	167
D89	4	15.0	104	0.0104	2119	2.119	204
D90	5	15.0	125	0.0125	2890	2.890	231
D91	6	15.0	144	0.0144	3468	3.468	241
D92	7	15.0	161	0.0161	4063	4.063	252
(H Kesitli)							
Sıkı Kum							
Deney	B (cm)	L (cm)	A (cm²)	A (m²)	Q_u (N)	Q_u (kN)	q_u (kPa)
D93	3	10.0	72	0.0072	524	0.524	72.78
D94	4	12.5	118	0.0118	1351	1.351	114.49
D95	4	15.0	148	0.0148	1673	1.673	113.04
D96	5	15.0	175	0.0175	3253	3.253	185.89
D97	6	15.0	198	0.0198	3606	3.606	182.12
(T Kesitli)							
Sıkı Kum							
Deney	B (cm)	L (cm)	A (cm²)	A (m²)	Q_u (N)	Q_u (kN)	q_u (kPa)
D98	3	10.0	51	0.0051	940	0.940	184.31
D99	4	12.5	118	0.0118	2043	2.043	173.14
D100	3	15.0	81	0.0081	1729	1.729	213.46
D101	4	15.0	104	0.0104	2424	2.424	233.08
D102	5	15.0	125	0.0125	3713	3.713	297.04
D103	6	15.0	144	0.0144	4131	4.131	286.88
D104	7	15.0	161	0.0161	5922	5.922	367.83
(Kare Kesitli)							
Sıkı Kum							
Deney	B (cm)	L (cm)	A (cm²)	A (m²)	Q_u (N)	Q_u (kN)	q_u (kPa)
D105	5	5.0	25	0.0025	205	0.205	82.00
D106	10	10.0	100	0.0100	1318	1.318	131.80
D107	15	15.0	225	0.0225	4305	4.305	191.33
D108	20	20.0	400	0.0400	7569	7.569	189.23
D109	25	25.0	625	0.0625	10306	10.306	164.90
D110	30	30.0	900	0.0900	13278	13.278	147.53

Davarcı (2013) tarafından yapılan çalışmada, geogrid donatı ilavesinin gevşek ve sıkı kum zeminin taşıma gücünü artırdığı, oturma miktarını ise azalttığı ve deney sonuçlarından elde edilen değerlerin literatür verileriyle de uyumlu olduğu görülmüştür. Farklı geometride ancak yaklaşık aynı yüzey alanına sahip çok kenarlı yüzeysel temellerin göçme yükleri arasında belirgin bir fark olmadığı belirlenmiştir.

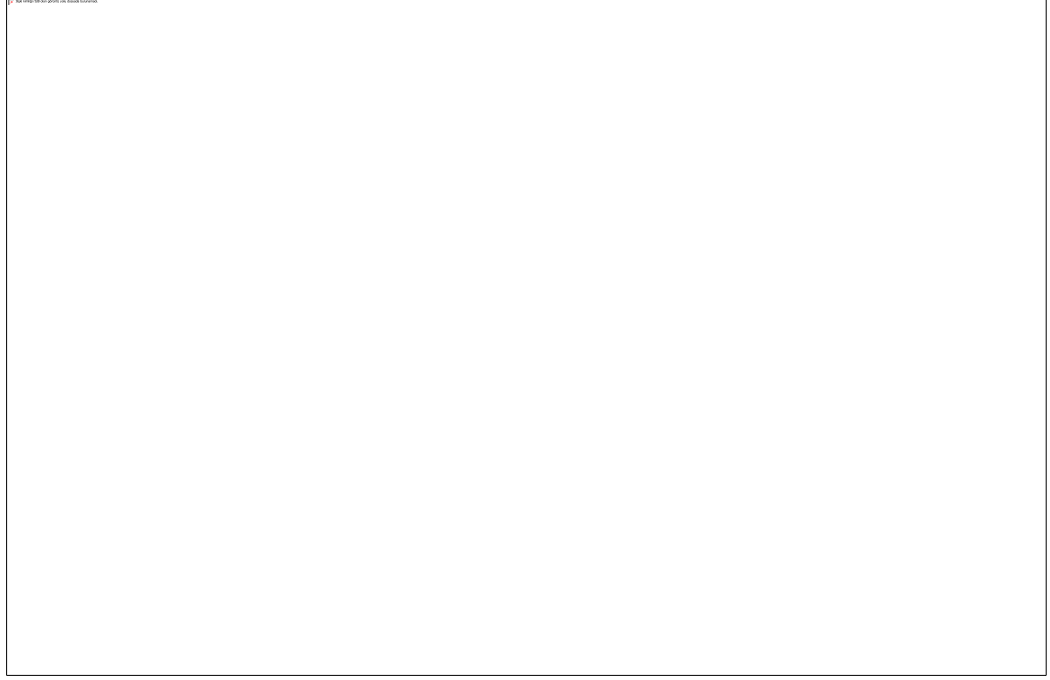
3. MATERYAL ve YÖNTEM

Bu çalışmada, gevşek ve sıkı kum zemine oturan farklı geometriye sahip çok kenarlı temellerin (+, H, T ve kare) taşıma gücü, oturma ve gerilme davranışları PLAXIS sonlu elemanlar yöntemiyle analiz edilmiştir. Analizlerin doğruluğu ve tutarlılığını belirleyebilmek için Davarcı (2013) tarafından Mustafa Kemal Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Geoteknik Laboratuvarı'nda yapılmış olan deneyler modellenmeye çalışılmış, uyumluluğun belirlenmesinin ardından parametrik çalışmalara geçilmiştir.

3.1. Sonlu Elemanlar Yöntemi

Son yıllarda, bilgisayar teknolojisindeki gelişmelere paralel olarak teorik analizlerde sayısal çözümlerin önemi artmıştır. En yaygın olarak kullanılan sayısal çözüm yöntemlerinden birisi sonlu elemanlar yöntemidir. Bu yöntemde, sürekli ortamlardan oluşan sistemler üzerinde, sonlu eleman ağı ile hayali düğümler oluşturulur. Kodlama tekniği ile sistem kütle ve rijittik matrisleri oluşturularak sisteme ait hareket denklemi elde edilir. Sistem hareket denklemi de uygun bir yöntem ile çözülerek, deplasmanlar ve gerilmeler hesaplanmaktadır (Demir, 2006).

Sonlu elemanlar yönteminin ana fikri; Şekil 3.1'de görüldüğü gibi analiz edilecek problem geometrisini basit geometrik şekle sahip çok sayıdaki küçük elemanlara ayırmaktır. Sonlu eleman adı verilen bu küçük bölgelerin birleşimi sonlu elemanlar ağı (mesh) olarak adlandırılır. Sonlu elemanlar ağını oluşturan elemanlar birbirlerine elemanların kenarlarında yer alan düğüm noktaları (node) aracılığı ile bağlıdır. Analiz edilecek sürekli ortamın sonlu elemanlara ayrılması ile sonsuz sayıda serbestlik derecesine sahip sürekli fiziksel model ortamı sonlu sayıda serbestlik derecesine sahip ayrıklaştırılmış model ile temsil edilmektedir. Bu yöntem; inşaat mühendisliği uygulamalarındaki tüm yapıların ve temel sistemlerinin tasarım ve analizlerinde yaygın olarak kullanılmaktadır (Emirler, 2013).



Şekil 3.1. Sonlu elemanlar yöntemi

Sonlu elemanlar yöntemi diferansiyel denklemlerle ifade edilen mühendislik problemlerinin analizi için geliştirilen sayısal bir çözüm yöntemidir. Bu yöntemde sürekli bir ortam sonlu elemanlara bölünerek her bir eleman için çeşitli denklemler yazılmakta ve bunlar integre edilerek sistem denklemleri elde edilmektedir. Sonuçta sürekli bir ortam için göz önüne alınan diferansiyel denklem, lineer bir denklem takımına indirgenmektedir. Bilgisayar yardımı ile çözülebilir (hız ve optimizasyon olanağı) olması, geliştirilen formülasyonun bir çok probleme uygulanabilir olması, karmaşık geometri, yükleme, sınır koşulları ve malzeme durumunu dikkate alıyor olması, seçilen birincil bilinmeyenler (yer değiştirme, akım potansiyeli vs) ile bunlara bağımlı ikincil bilinmeyenleri (gerilme, şekil değiştirme, akım miktarı, hız vs) birlikte ele alıyor olması ve bütünlük problemlerin [gerilme-şekil değiştirme (statik) ve konsolidasyon (dinamik) gibi] çözümünde kolaylık sağlaması sonlu elemanlar yönteminin avantajları olarak sıralanmaktadır. Bilgisayar kapasitesine bağımlılığı (bellek ve cpu hızı) ve yaklaşık bir yöntem olmasından dolayı gerçek çözüme çok yakın sonuçların ancak yeterli eleman kullanılarak elde edilebiliyor olması ise, sonlu elemanlar yönteminin dezavantajları arasında sayılabilmektedir.

3.2. Sayısal Analiz Programı

PLAXIS (Finite Element Code for Soil and Rock Analysis), geoteknik mühendisliğindeki deformasyon ve stabilite problemlerinin, sonlu elemanlar yöntemi ile analiz edilebilmesi için tasarlanmış bir bilgisayar programıdır. Program, geoteknik mühendisliği uygulamalarına yönelik olarak geliştirilmiştir. Analizlerde, problemler iki boyutlu olarak eksensel simetrik veya düzlem deformasyon geometri koşullarında analiz edilmektedir. PLAXIS, çok yönlü ve karmaşık bir yapı arz eden geoteknik uygulamaların analizi için aşağıda verilmiş olan bazı önemli özelliklere sahiptir (Brinkgreve ve Broere, 2006):

1. Problemin çözüm aşamasında geometrik model oluşturulurken, ortamın zemin yapısı, mevcut yük durumu ve sınır şartları kolayca tanımlanmaktadır.
2. Zemin ortamı 2 boyutlu üçgen elemanlar yardımıyla tanımlanmaktadır.
3. Programda, duvar, plaka ve temel gibi yapı elemanlarını kolayca tanımlayabilecek kiriş elemanları mevcuttur.
4. Program, zemin davranışlarını modellemek için birden fazla zemin modeline sahiptir (Demir, 2006).

3.2.1. Sonlu Elemanlar Yönteminde Hesaplama Aşamaları

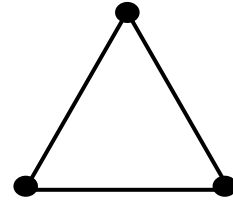
Fiziksel bir problemin sonlu elemanlar yöntemi ile analizi için izlenen hesaplama aşamaları ana hatları ile özetlenmiştir. İncelenen problem geometrisi, basit geometrik şekillere sahip elemanlar kullanılarak küçük bölgelere ayrılır. Sonlu eleman adı verilen bu küçük bölgelerin her biri birbirlerine düğüm noktaları aracılığı ile bağlıdır. Düz yüzeyli elemanlar için düğüm noktaları, genellikle, elemanın köşelerine yerleştirilmektedir. Eğrisel yüzeye sahip elemanlarda ise, her kenarın orta noktasına da düğüm noktaları eklenmektedir. Sonlu elemanlar ağı oluşturulurken geometrisi bozulmuş ya da uzun, ince elemanların kullanılmasından kaçınılmalıdır. Şekil 3.2’de görüldüğü gibi sonlu eleman bir, iki veya üç boyutlu olabilir. Şekil 3.3’de de düğüm noktaları ve eleman boyutlarına ait örnekler gösterilmiştir.



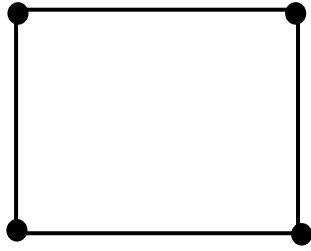
Şekil 3.2. Problem geometrisinin sonlu elemanlara ayrılması



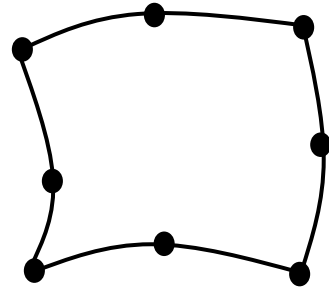
2 Düğümlü 1 Boyutlu Eleman



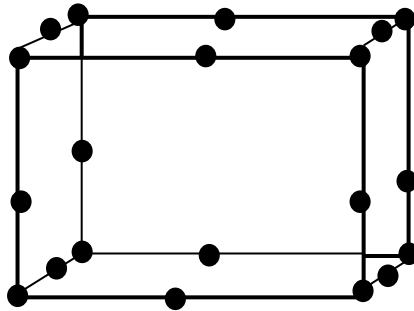
3 Düğümlü 2 Boyutlu Üçgen Eleman



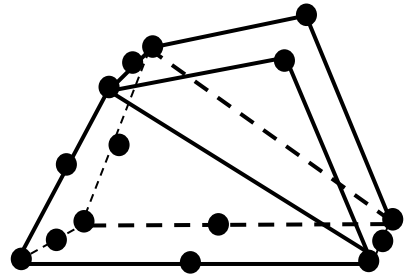
4 Düğümlü 2 Boyutlu
Dörtgen Eleman



8 Düğümlü 2 Boyutlu
Dört Kenarlı Eleman



20 Düğümlü 3 Boyutlu
Dörtgen Prizmatik Eleman



15 Düğümlü 3 Boyutlu
Kama Eleman

Şekil 3.3. Sonlu eleman örnekleri

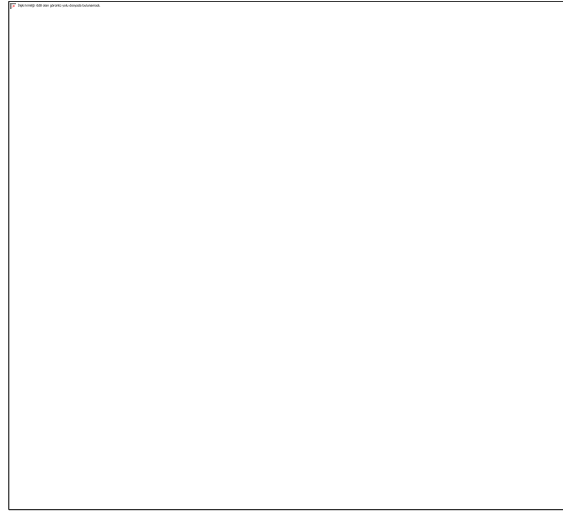
Şekil 3.4’de görüldüğü gibi her bir düğüm noktası birbirinden bağımsız altı farklı yönde hareket edebilmektedir. Bu hareketlerden üçü ötelenme, üçü de dönme hareketidir. Düğüm noktalarının hareket edebildiği doğrultu sayısı düğüm noktası serbestlik derecesi olarak adlandırılmaktadır. Bir düğüm noktasının hareket edebildiği doğrultuların birleşimi düğüm noktası deplasman vektörünü oluşturur.

$$\{u\} = \{u_x, u_y, u_z, \theta_x, \theta_y, \theta_z\} \quad (3.1)$$

Bu eşitlikte yer alan;

u ; ötelenme hareketini,

θ ; dönme hareketini temsil etmektedir



Şekil 3.4. Düğüm noktası serbestlik dereceleri

Bir problemin sonlu elemanlar yöntemi ile analizi; deplasman yöntemi, kuvvet yöntemi ya da karma yöntemlerden birisi kullanılarak gerçekleştirilir. Geoteknik mühendisliğindeki problemlerin çoğunluğu deplasman yöntemi kullanılarak çözümlenmektedir. Deplasman yönteminde; bilinmeyen deplasman olup gerilme ve birim şekil değiştirmeler ikincil büyüklükler olarak deplasmanların tanımlanmasına bağlı olarak elde edilirler. Bilinmeyen büyüklük olan deplasmanların bir sonlu elemandaki değişimi interpolasyon fonksiyonları kullanılarak tanımlanmaktadır. İnterpolasyon fonksiyonları olarak genellikle polinomlar seçilmektedir. Bir sonlu

eleman ve bu sonlu elemanı çevreleyen düğüm noktaları arasındaki ilişki Eşitlik 3.2 kullanılarak tanımlanmaktadır (Emirler, 2013).

$$[k]_e \{u\}_e = \{f\}_e \quad (3.2)$$

Yukarıdaki eşitlikte eleman deplasman vektörü $\{u\}_e$ bilinmeyen olup uygulanan kuvvetler etkisinde düğüm noktalarının nasıl hareket edeceğini tanımlamaktadır. Eleman rijitlik matrisi $[k]_e$, eleman özellikleri, malzeme özellikleri ve eleman geometrisi kullanılarak elde edilir. Eleman yük vektörü $\{f\}_e$ ise eleman üzerinde etkili olan yükleri tanımlamaktadır.

Her bir elemana ait eleman rijitlik matrislerinin ve eleman yük vektörlerinin bir araya getirilip toplanması sonucu sisteme ait global rijitlik matrisi ve global yük vektörü elde edilmiş olur. Şekil 3.5’den de görüldüğü gibi bu işlemin sonucunda fiziksel problemin davranışını idare eden diferansiyel denklem lineer bir denklem takımına indirgenir.

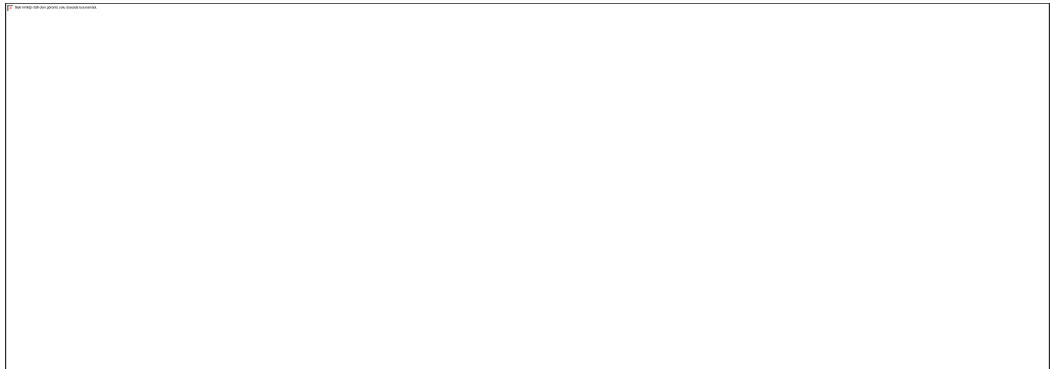
$$[K] \{U\} = \{F\} \quad (3.3)$$

Bu eşitlikte yer alan;

$[K]$; sistem rijitlik matrisi,

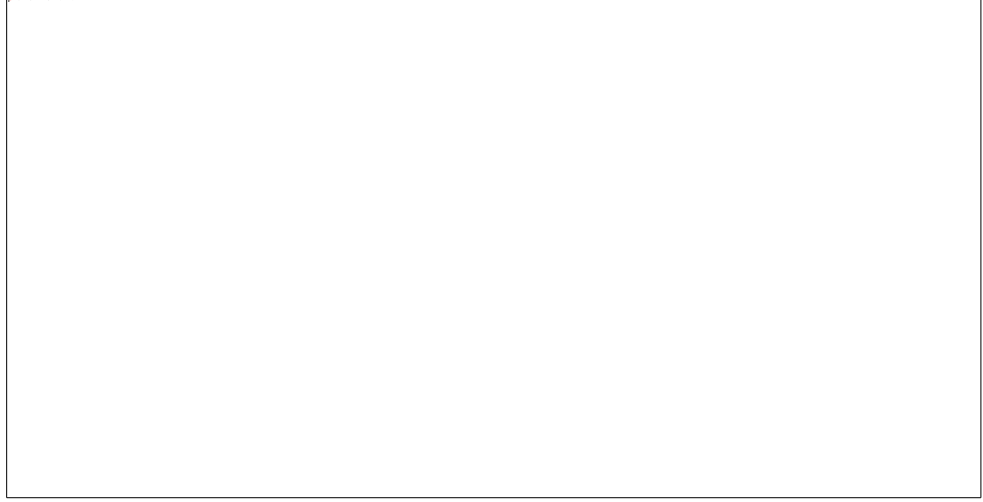
$\{F\}$; sistem yük vektörü,

$\{U\}$; deplasman vektörüdür.



Şekil 3.5. Global matris eşitliklerinin elde edilmesi

Şekil 3.6’da görüldüğü gibi model hareketinin engellendiği doğrultuları ifade eden sınır şartları, problem geometrisine uygulanır. Bu işlem matematiksel olarak, global matris eşitliğinde düğüm noktasının hareketinin engellendiği doğrultulara karşılık gelen satır ve sütunların global matris eşitliklerinden çıkarılması yolu ile yapılmaktadır.



Şekil 3.6. Sınır şartlarının probleme uygulanması

Analiz aşamasında ise; global matris eşitlikleri çözümlenerek her bir düğüm noktasındaki deplasmanlar elde edilir. Elde edilen düğüm noktası deplasmanları kullanılarak her bir sonlu elemandaki gerilmeler ve birim şekil değiştirmeler hesaplanır. Analizler sonucunda elde edilmiş olan büyük miktardaki veri değerlendirilerek tasarım amaçları için anlaşılır bir kullanıma dönüştürülür.

3.3. Zemin Modelleri

Sayısal analiz programında, yukarıda sözü edildiği gibi, zemin davranışını modellemek amacıyla kullanılan dört farklı zemin modeli aşağıda kısaca özetlenmiştir.

3.3.1. Lineer Elastik (LE) Zemin Modeli

Bu modelde, zemin davranışının Hooke yasasına uyduğu ve zeminin izotropik lineer elastik bir malzeme olduğu kabul edilir. Zemin tanımlamak için elastisite

modülü, E ve poisson oranı, μ değerleri kullanılır. Bu model, kaya gibi rijit ve büyük zemin kütlelerini modellemek için daha elverişlidir (Demir, 2006).

3.3.2. Mohr-Coulomb (MC) Zemin Modeli

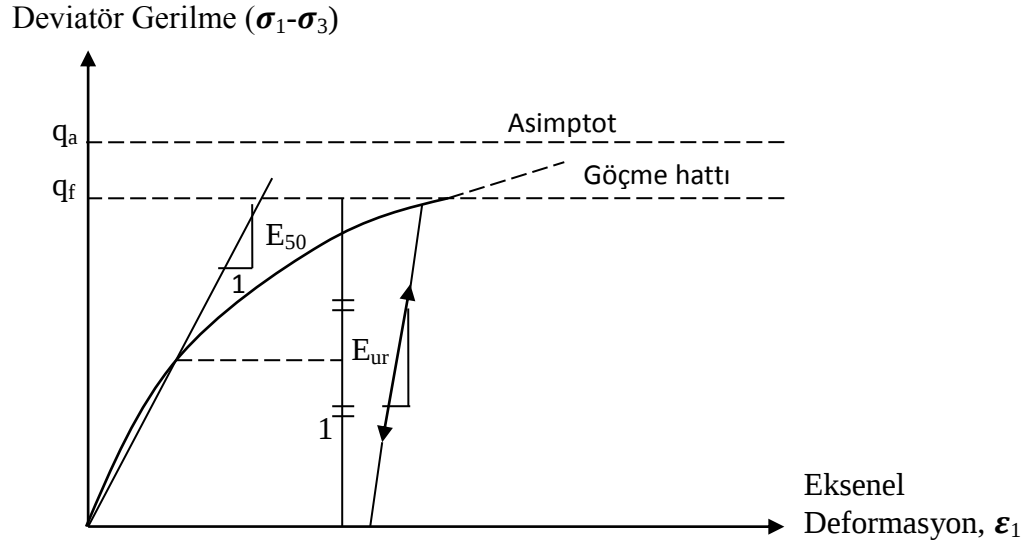
Bu model, elasto-plastik bir zemin modelidir. Bu modelde, zeminin, elastisite modülü, E, poisson oranı, ν , kohezyonu, c, sürtünme açısı, ϕ , ve dilatasyon açısı gibi 5 ayrı parametre kullanılmaktadır. Zemin rijitliği için kullanılan E parametresi, tüm zemin tabakaları için sabittir.

3.3.3. Pekleşen Zemin (HS) Modeli

Farklı tipteki zemin davranışını modellemekte kullanılan bir zemin modelidir. Mohr- Coulomb modeline göre çok daha gelişmiş bir modeldir. MC modelinde olduğu gibi gerilme seviyesi kohezyon, sürtünme açısı ve dilatasyon açısı ile sınırlandırılmıştır. HS model, gerilme bağımlı rijitlik modülünü dikkate almaktadır. Yani, zemin rijitliği basınçla birlikte artmaktadır. HS zemin modeli, drenajlı üç eksenli basınç deneyinde gözlenen eksenel deformasyon-deviatorik gerilme ilişkisinin yaklaşık hiperbol şeklinde olması esasına dayanmaktadır (Şekil 3.7). HS model, hiperbolik zemin modelinin yerini almış olmakla beraber arasında önemli farklar vardır. Bu farklardan ilki, modelde elastisite teorisinden çok plastisite teorisinin kullanılmasıdır. İkinci fark, modelin zemin dilatasyonunu da kapsamayı, üçüncü fark ise, bir akma başlığı (yield cap) içermesidir.

Modelin bazı temel karakteristik özellikleri aşağıda özetlenmiştir:

- Gerilme bağımlı rijitlik (giriş parametresi m),
- Deviatorik yükleme nedeniyle oluşan plastik deformasyonlar (giriş parametresi E_{50}^{ref}),
- Sıkışma nedeniyle oluşan plastik deformasyonlar (giriş parametresi E_{oed}^{ref}),
- Elastik boşaltma/yükleme (giriş parametresi E_{ur}^{ref}),
- Mohr-Coulomb modeline göre göçme (c, ϕ).



Şekil 3.7. Standart bir drenajlı üç eksenli basınç deneyinde hiperbolik gerilme-şekil değiştirme ilişkisi

HS model formülasyonundaki temel düşünce, üç eksenli basınç deneyinden elde edilen düşey deformasyon (ϵ_1) ve deviatorik gerilme (q) arasındaki hiperbolik ilişkidir (Şekil 3.7). Modelde bu hiperbol denklemini;

$$-\epsilon_1 = \frac{1}{2E_{50}} \frac{q}{1-q/q_a} \quad (q < q_f \text{ için}) \quad (3.4)$$

şeklinde ifade edilmektedir. Buradaki q_a , kayma mukavemetinin asimptot kaldığı değerdir. E_{50} parametresi ise Eşitlik 3.5’de verilen, ilk yükleme sırasındaki gerilmeye bağlı rijitlik modülüdür:

$$E_{50} = E_{50}^{ref} \left(\frac{c \cos \phi - \sigma'_3 \sin \phi}{c \cos \phi + p^{ref} \sin \phi} \right)^m \quad (3.5)$$

Buradaki E_{50}^{ref} , referans çevre basıncı, p^{ref} değerine karşılık gelen referans rijitlik modülüdür. Rijitlik modülü, üç eksenli basınç deneyindeki çevre basıncı olan küçük asal gerilme, σ'_3 değerine bağlıdır. Basınç olması nedeniyle σ'_3 değerinin işareti negatiftir. Modelde gerilme seviyesi üs değeri m ile kontrol edilmektedir. Göçme anındaki deviatorik gerilme q_f ve deviatorik gerilmenin asimptot kaldığı q_a değeri modelde aşağıdaki bağıntılarla tanımlanmaktadır:

$$q_f = (c \cot \phi - \sigma'_3) \frac{2 \sin \phi}{1 - \sin \phi} \quad (3.6)$$

$$q_a = \frac{q_f}{R_f} \quad (3.7)$$

q_f değeri, c ve ϕ değerleri kullanılarak Mohr-Coulomb göçme kriterinden hesaplanmaktadır. Dolayısıyla, $q=q_f$ olduğunda Mohr-Coulomb modeline göre göçme meydana gelir ve tam plastik akma oluşur. q_f ve q_a arasındaki oran ise göçme oranı (R_f) olarak tanımlanmıştır. R_f değerinin her zaman için 1'den küçük olduğu açıkça görülmektedir.

Modelde, boşaltma–yükleme rijitlik modülü için ise, aşağıdaki bağıntı kullanılmaktadır:

$$E_{ur} = E_{ur}^{ref} \left(\frac{c \cos \phi - \sigma'_3 \sin \phi}{c \cos \phi + p^{ref} \sin \phi} \right)^m \quad (3.8)$$

E_{ur}^{ref} , referans çevre basıncı, p^{ref} , değerindeki referans Young modülüdür.

3.3.4. Yumuşak Zemin Sünme (SSC) Modeli

Zemin mekaniğinde normal konsolide killeri, killi siltler ve turba zeminler yumuşak zemin olarak kabul edilmektedir. Bu tür zeminler, yüksek mertebedeki sıkışabilirlik özelliğine bağlı olarak, farklı özellikler göstermektedirler. HS model, tüm zeminler için uygun bir model olmasına rağmen yumuşak zeminlerdeki büzülme ve gerilme gevşemesi gibi viskoz etkiler ile normal konsolide killerde gözlenen zamana bağlı sıkışma davranışını dikkate almamaktadır. Bu nedenle, bu tür zeminlerde SSC modeli kullanılır. Özellikle, temel ve dolgulardaki zamana bağlı oturma problemleri ile tüneller ve derin kazı gibi zemindeki yük boşalması problemlerinde bu model kullanılmaktadır.

3.4. PLAXIS 3D Foundation Programı

Plaxis 3D Foundation programı, özellikle, temel yapılarının üç boyutlu deformasyon analizlerinin gerçekleştirilmesi için geliştirilmiş üç boyutlu bir sonlu elemanlar programıdır. Sonlu elemanlar analizinde, Davarcı (2013) tarafından sunulan deneysel veriler kullanılmış ve analizlerde, deneysel çalışmada izlenen programa benzer şekilde, çok kenarlı model temellerin, farklı sıklıktaki taşıma kapasitesi, oturma ve gerilme karakteristikleri araştırılmıştır.

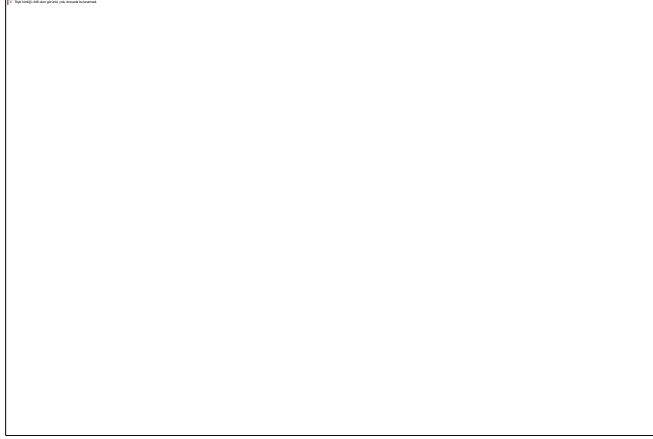
Programda deney kasasının (70x50x50) geometrik modeli üç boyutlu olarak oluşturulmuştur. Zemin ortamı 15 düğümlü üçgen elemanlarla modellenmiştir. Deney ortamı sonlu elemanlara ayrılırken ağ sıklığı olarak ince (fine) kullanılmıştır. Model temeller, lineer elastik malzeme modeli kullanılarak modellenmiştir. Analizlerde kum zeminin davranışı pekleşen zemin modeli ile modellenmiştir.

Davarcı (2013) tarafından deneysel çalışmalarda kullanılmış olan deney düzeneği, yükleme koşulları ve malzeme özellikleri göz önüne alınarak kum zemine oturan çok kenarlı yüzeysel temellerin taşıma gücü, oturma ve gerilme davranışını belirlemek için Plaxis 3D Foundation programı kullanılarak modellenmesi ve analiz edilmesi sırasında izlenen adımlar aşağıda açıklanmıştır.

3.4.1. Çalışma Düzlemlerinin Oluşturulması

Probleme ait üç boyutlu geometrik model oluşturulurken öncelikle workplane olarak adlandırılan çalışma düzlemleri tanımlanır. Çalışma düzlemleri, farklı y koordinatlarına sahip yatay düzlemlerdir. Şekil 3.8’de görüldüğü gibi belirli düşey derinliklerde geometrik modelin üstten görünümünü temsil ederler. Her bir çalışma düzlemi yatay doğrultularda aynı dış sınırlara sahip olmalarına karşın aralarındaki düşey mesafe tanımlanan y koordinatlarına göre değişmektedir. Herhangi bir çalışma düzleminde bir geometrik doğru ya da cluster olarak adlandırılan belirlenmiş bir alan tanımlandığında bunlar diğer tüm çalışma düzlemlerinde de görülür. Yapısal nesneler, tanımlanmış oldukları çalışma düzlemi ile o çalışma düzleminin altında yer alan çalışma düzlemi arasında oluşturulmaktadır. Çalışma düzlemleri; hesaplama aşamasında, zemini, yapısal elemanları ve uygulanan yükleri aktif veya pasif hale getirmek için

kullanılırlar. Çalışma düzlemleri zemin tabakalarının oluşturulmasında kullanılmazlar. Çalışma düzlemlerinin yatay doğrultularda uzanan dış sınırları ise, model deney kasasının uzunluk ve genişliğine bağlı olarak tanımlanmıştır (Emirler, 2013).

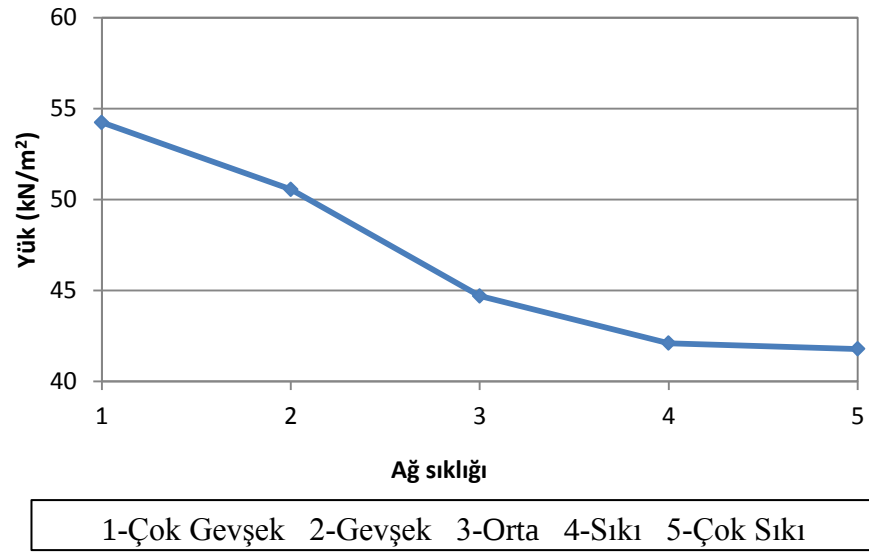


Şekil 3.8. Çalışma düzlemlerinin temsili gösterimi

3.4.2. Sonlu Elemanlar Ağının Oluşturulması

PLAXIS’de sonlu elemanlara ayırma işlemi otomatik olarak gerçekleştirilmekte ayrıca manuel olarak istenilen bölgelerde ağ sıkılaştırılması yapılabilmektedir. Analizlerde, sonlu eleman ağı oluşturulurken, sonuçların etkilenmediği en uygun ağ yapısı (mesh) araştırılmıştır. Bu amaçla, deney modeli üzerinde farklı ağ durumları göz önüne alınarak bir seri analiz gerçekleştirilmiş ve taşıma gücü kapasitesi değerleri karşılaştırılmıştır. Analizlerde, PLAXIS’de mevcut çok kaba (very coarse), kaba (coarse), orta (medium), sıkı (fine) ve çok sıkı (very fine) ağ seçenekleri kullanılmıştır. Analizler B=4; L=15 cm genişlikte + temel model plakası üzerinde ve $\gamma_k=15.44 \text{ kN/m}^3$ durumunda araştırılmıştır.

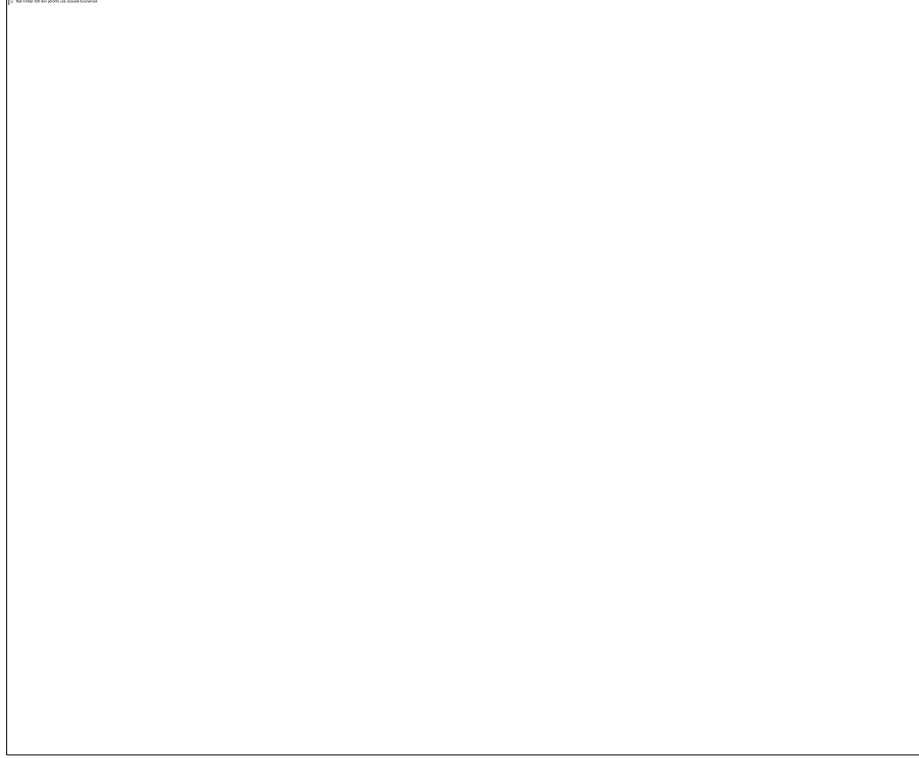
Ağ analizinden, ağ etkisinin, sıkı ve çok sıkı ağ durumlarında oldukça azaldığı görülmüş ve analizlerde sonlu elemanlar ağı sıkı (fine) seçeneğiyle oluşturulmuştur. Ağ analizinden elde edilen sonuçlar, Şekil 3.9’da görülmektedir.



Şekil 3.9. Ağ sıklığının taşıma kapasitesine etkisi

3.4.3. Zemin Profilinin Elde Edilmesi

Zemin profilinin oluşturulmasında borehole olarak adlandırılan sondaj kuyuları kullanılmaktadır. Zemin içerisinde çok sayıda sondaj kuyusu kullanılarak farklı seviyelerde ve farklı parametrik özelliklere sahip zemin tabakaları oluşturulabilir. Şekil 3.10'dan da görüldüğü gibi sondaj kuyuları, yer altı su seviyesi, tabaka kalınlıkları, tabaka sayısı, boşluk suyu basınçlarının dağılımı ve başlangıç gerilme durumu ile ilgili bilgiler içermektedir. Sondaj kuyuları arasında kalan bölgelerde zemin tabakaları sondaj kuyularında tanımlanmış olan zemin profillerine göre interpolate edilmektedir.



Şekil 3.10. Borehole sondaj kuyusu

3.4.4. Malzeme Özelliklerinin Tanımlanması

Borehole sondaj kuyusu tanımlanarak oluşturulan zemin modelinin özellikleri ve modellemede kullanılan yapısal elemanların malzeme özellikleri, program bünyesinde yer alan malzeme veri seti kullanılarak tanımlanmaktadır. Program bünyesinde yer alan elemanlar; zemin ve ara yüzey elemanları, gömülü kazıklar, kirişler, duvarlar, döşemeler ve ankrajlardır. Model zemin, zemin ve ara yüzey elemanları için kullanılan malzeme veri seti ile tanımlanırken temel malzemesi ise döşeme için kullanılan malzeme veri setinde temel malzemesine ait özelliklerin girilmesi yolu ile tanımlanmaktadır.

Sayısal analizlerde kullanılan gevşek zemine ait değerler Çizelge 3.1’de gösterilmiştir.

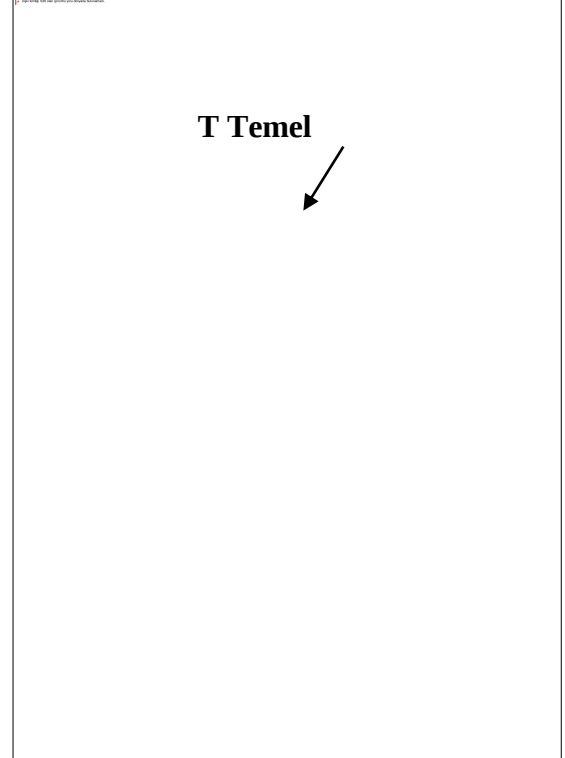
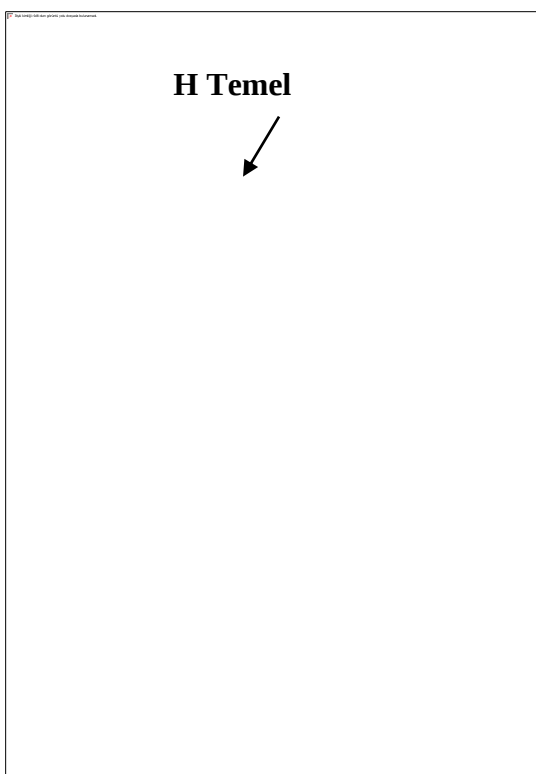
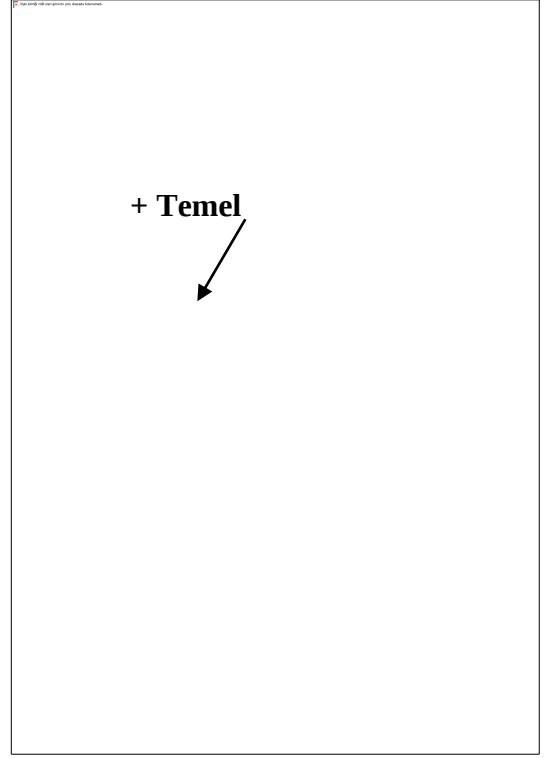
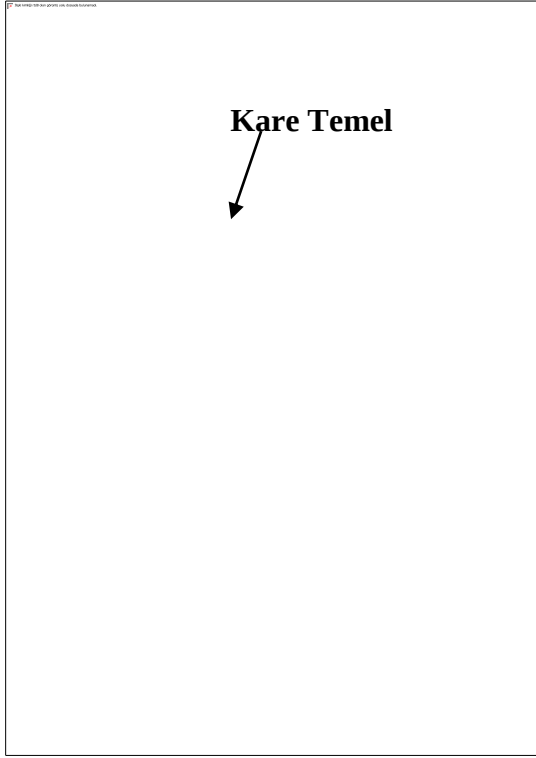
Çizelge 3.1. Gevşek kum zemin için HS model parametreleri

Parametre Adı	Simge	Birim	Değer
Birim hacim ağırlığı	γ	kN/m ³	15.44
Üç eksenli yükleme rijitliği	E_{50}	kN/m ²	10000
Üç eksenli yükleme boşaltma rijitliği	E_{ur}	kN/m ²	10000
Ödometre yükleme rijitliği	E_{oed}	kN/m ²	24000
Kohezyon	c	kN/m ²	1.0×10^{-5}
Kayma mukavemet açısı	ϕ	(°)	36.500
Poisson oranı	ν	-	0.200
Zemin basınç katsayısı	K_0	-	0.412

3.4.5. Temel Elemanının Oluşturulması

Zemin kütlesi içerisinde çizgi (line) elemanlar tanımlanarak, temel elemanını temsil eden hacimsel bir bölge belirlenmekte ve bu bölgeye temel malzemesine ait malzeme özellikleri atanmaktadır.

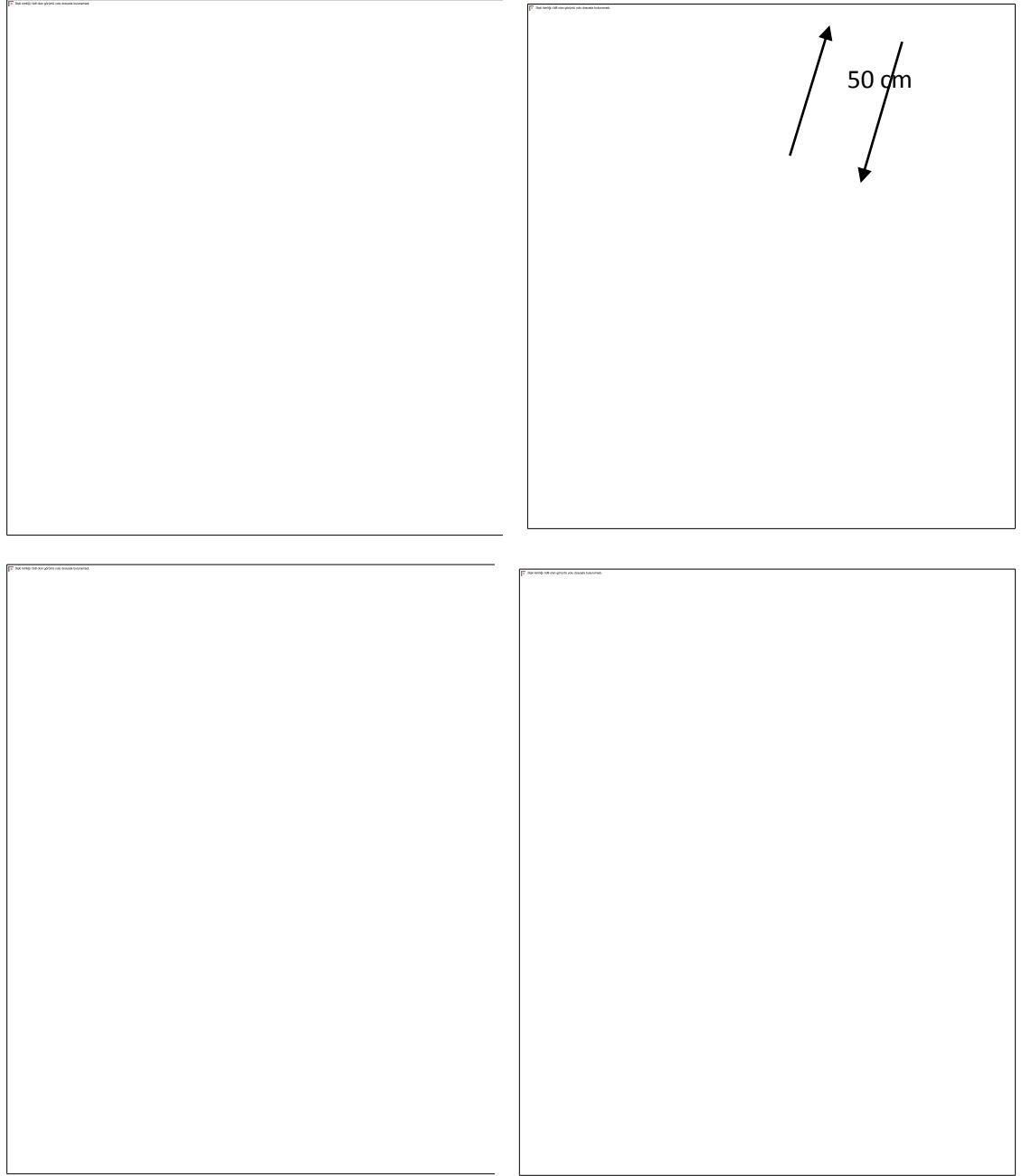
Analizlerde geometrik modelin genişliği, deneylerde kullanılan temel modeller simetrik olduğundan dolayı analiz süresini kısaltmak için kare, H ve + temellerin 1/4'ü, T temellerin ise tamamı modellenmiştir (Şekil 3.11). Kullanılan temel modelinin elastisite modülü $E=21 \times 10^7$ dir.



Şekil 3.11. Model temellere ait zemin ortamının sonlu elemanlar ağı

3.4.6. Yükün Uygulanması

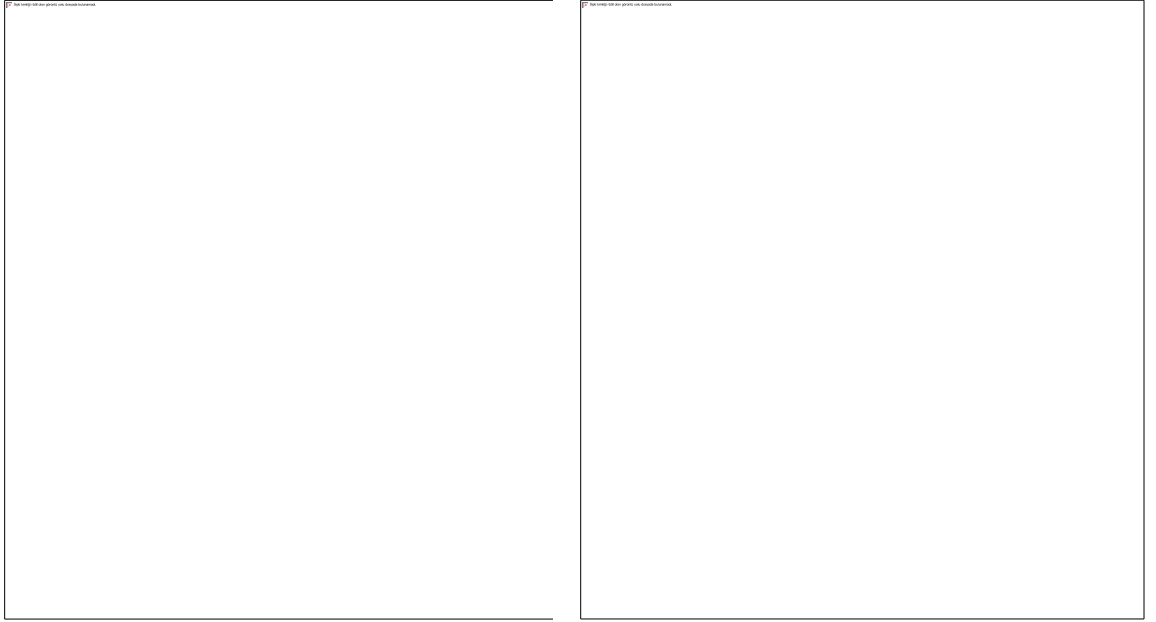
Plaxis 3D Foundation programında uygulanabilecek yükleme tipleri; yatay düzleme etkiyen yayılı yük, düşey düzleme etkiyen yayılı yük, şerit yk ve tekil yük şeklindedir. Model deney çalışmalarında, temel plakasına uygulanan çekme kuvveti, y doğrultusunda etkiyen yayılı yük olarak modellenmiştir.



şekil 3.12. Yükleme sonucunda zeminde oluşan deformasyon görünümleri

3.4.6. Hesaplamalar

Analizlerde çözüm iki aşamalı olarak gerçekleştirilmiştir. İlk aşamada zemin ağırlığından dolayı oluşan başlangıç gerilmeleri oluşturulmuş, ikinci aşamada ise temel plakası ve yük aktif hale getirilerek plastik çözüm yapılmıştır.



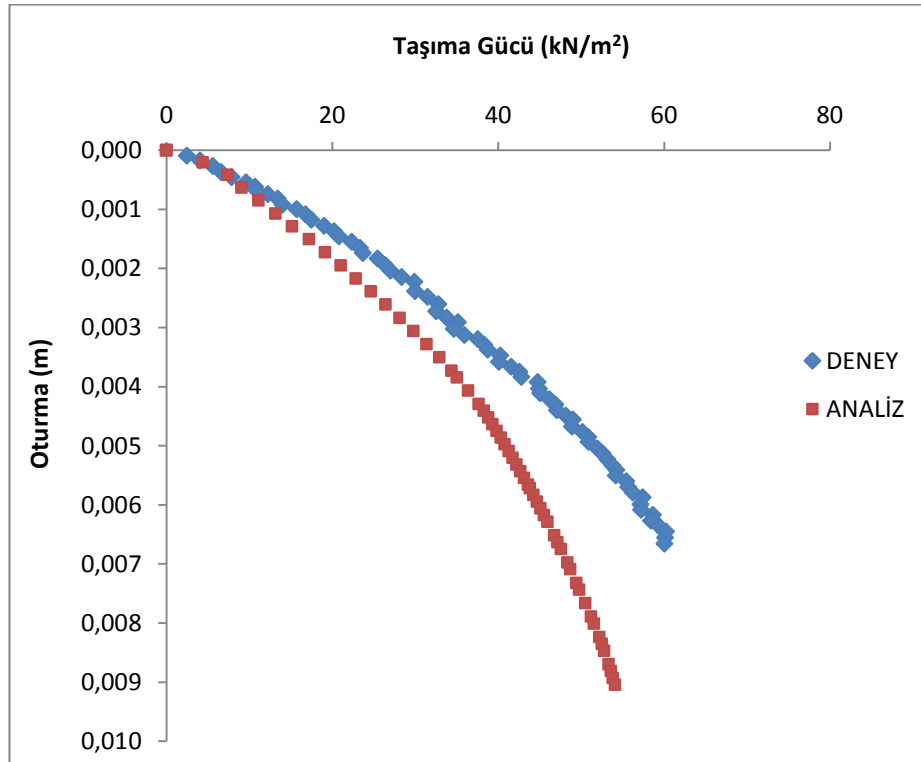
Şekil 3.13. Oturma görünümleri

4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA

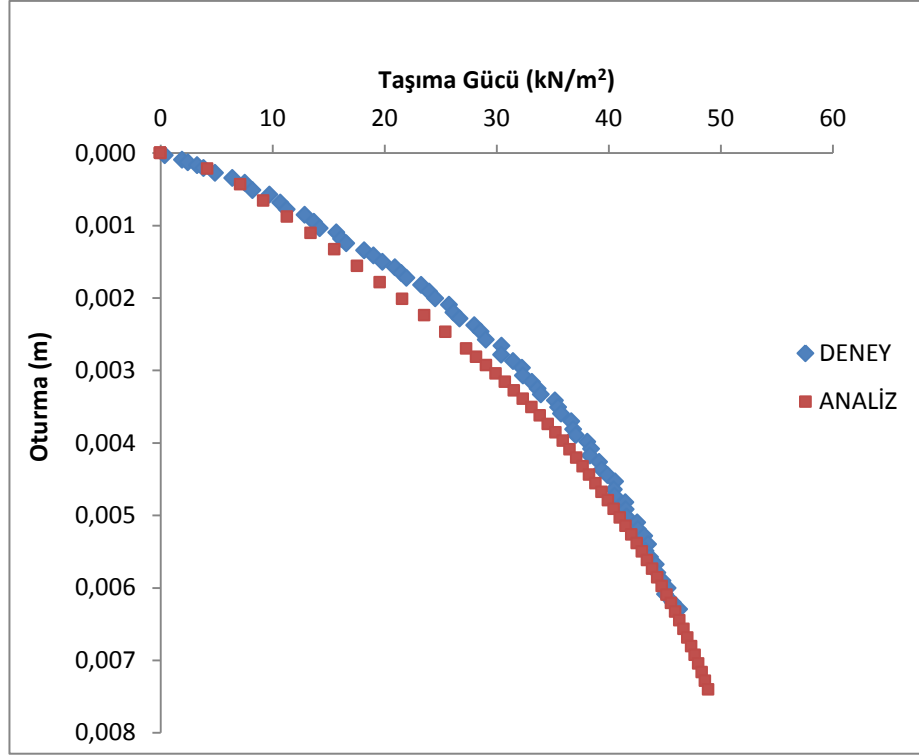
Bu bölümde, PLAXIS 3D Foundation bilgisayar programı kullanılarak çok kenarlı model temeller için elde edilen sayısal sonuçlar, Davarcı (2013) tarafından yapılan deneysel sonuçlar ile karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırmayla kullanılan parametrelerin tutarlılığı doğrulanmış ve ardından parametrik çalışmalara geçilmiştir.

4.1. Sayısal Analiz ve Deney Sonuçlarının Karşılaştırılması

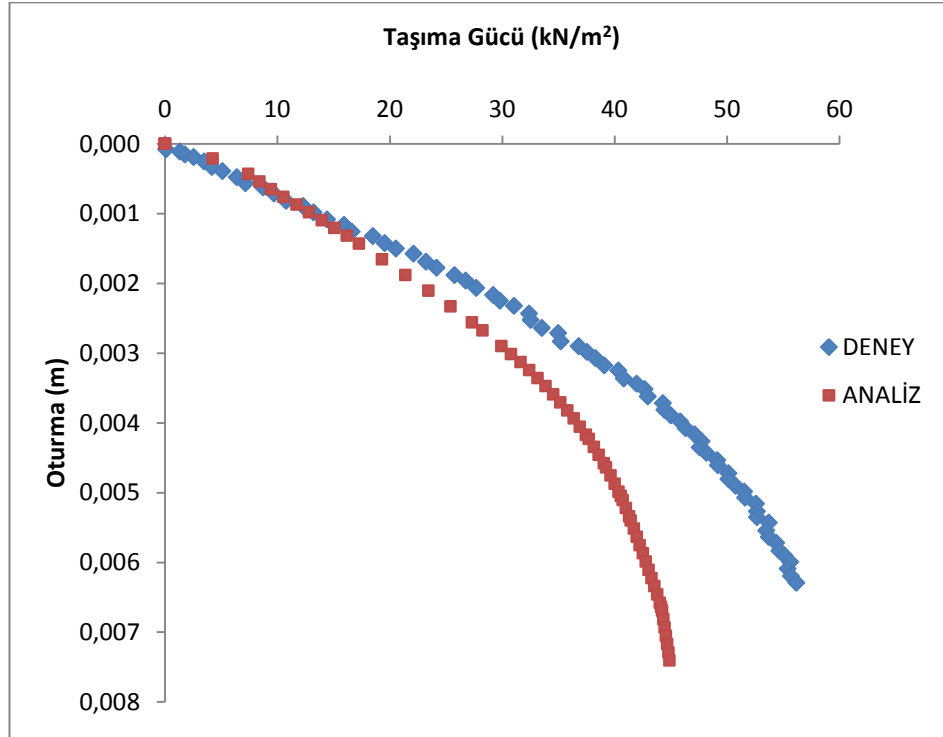
Davarcı (2013) tarafından çok kenarlı yüzeysel model temeller üzerinde laboratuvar ortamında sıkı ve gevşek zeminde yapılan deneyler bilgisayar programıyla modellenmiş ve deney sonuçları ile analiz sonuçları karşılaştırılmıştır. Sıkı zeminde model temellere ait deney sonuçları ile analiz sonuçları, gerçek ortam koşulları tam olarak yansıtlamadığı için ortak parametrelerde uyum yakalanamamıştır. Gevşek kum zeminde yapılan model temellere ait deney ve analiz sonuçlarının karşılaştırılması Şekil 4.1 ve Şekil 4.2 arasındaki grafiklerde gösterilmektedir.



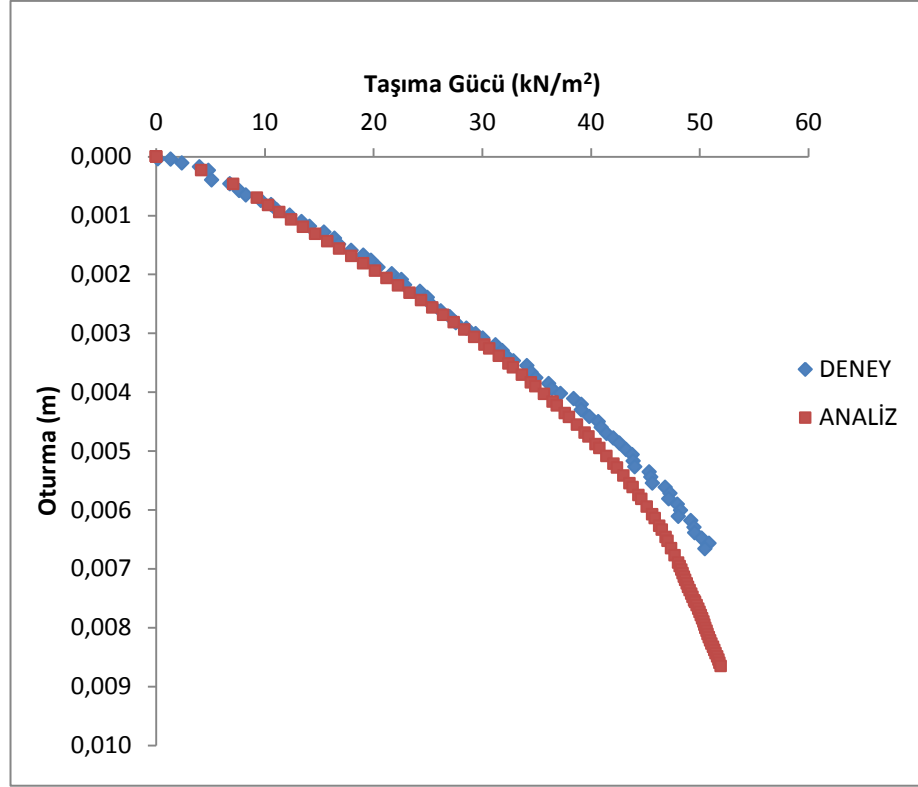
Şekil 4.1. Kare temeğe ait deney ve analiz sonuçlarının karşılaştırılması



Şekil 4.2. (+) temele ait deney ve analiz sonuçlarının karşılaştırılması



Şekil 4.3. H temele ait deney ve analiz sonuçlarının karşılaştırılması



Şekil 4.4. T temele ait deney ve analiz sonuçlarının karşılaştırılması

Grafiklerde kare, +, H ve T temele ait deney sonuçları analiz sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Yapılan karşılaştırmalarda, deney ve sayısal analiz sonuçlarına ait eğrilerin birbirleriyle uyumlu oldukları ve zemin davranışının benzerlik gösterdiği görülmüştür. Bu uyumun sağlanmasıyla birlikte parametrik çalışmalara geçilmiştir.

4.2. Parametrik Çalışmalar

Deney sonuçları ile sayısal analiz sonuçlarının tutarlılığının belirlenmesi ardından gevşek zeminde parametrik çalışmalara geçilmiştir. Parametrik çalışmalarda, deneylerde kullanılan temel modellerinin katları alınarak model boyutları belirlenmiştir (Çizelge 4.1). Yapılan parametrik çalışmalar sonucunda, her bir temel kendi içerisinde alan, uzunluk ve genişliğin taşıma gücüne etkisi yönünden incelenmiştir. Ayrıca çalışmalar sonunda yaklaşık olarak aynı alana sahip kare temel ile çok kenarlı temellerin taşıma kapasiteleri karşılaştırılmıştır.

Çizelge 4.1. Çalışmalarda kullanılan temel boyutları

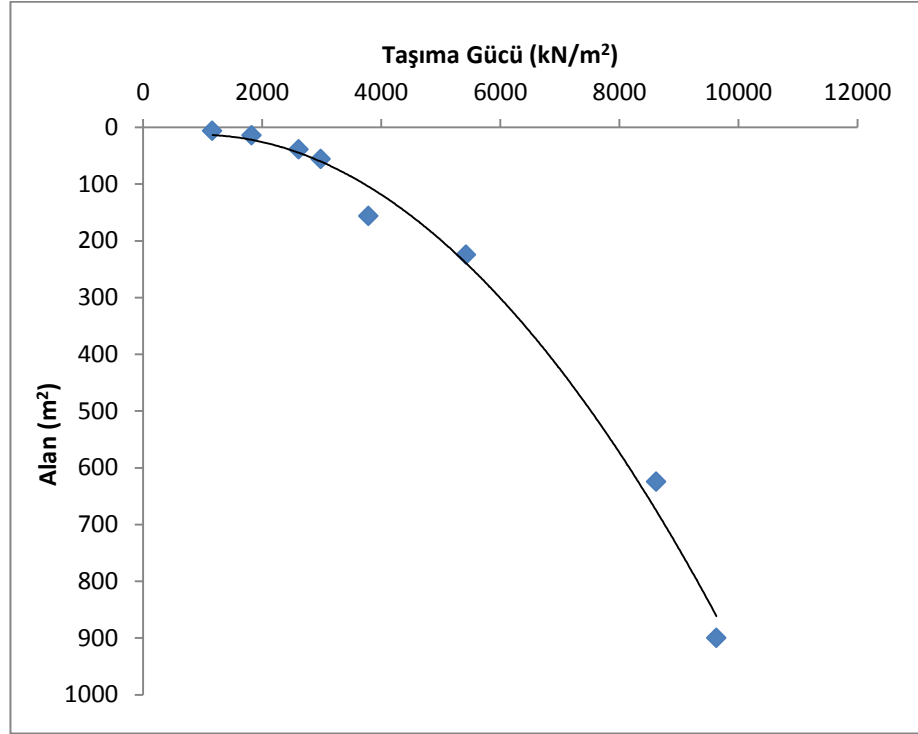
KARE TEMEL		
B (m)	L (m)	A (m²)
2.50	2.50	6.25
3.75	3.75	14.06
5.00	5.00	25.00
6.25	6.25	39.06
7.50	7.50	56.25
10.00	10.00	100.00
12.50	12.50	156.25
15.00	15.00	225.00
25.00	25.00	625.00

H TEMEL		
B (m)	L (m)	A (m²)
0.75	2.50	4.50
1.00	3.75	9.25
1.25	3.75	10.94
1.50	3.75	12.38
1.50	5.00	18.00
2.00	7.50	37.00
2.50	7.50	43.75
3.00	7.50	49.50
3.00	10.00	72.00
4.00	15.00	148.00
5.000	15.000	175.00
6.00	15.00	198.00
6.00	20.00	288.00
8.00	30.00	592.00
10.00	30.00	700.00

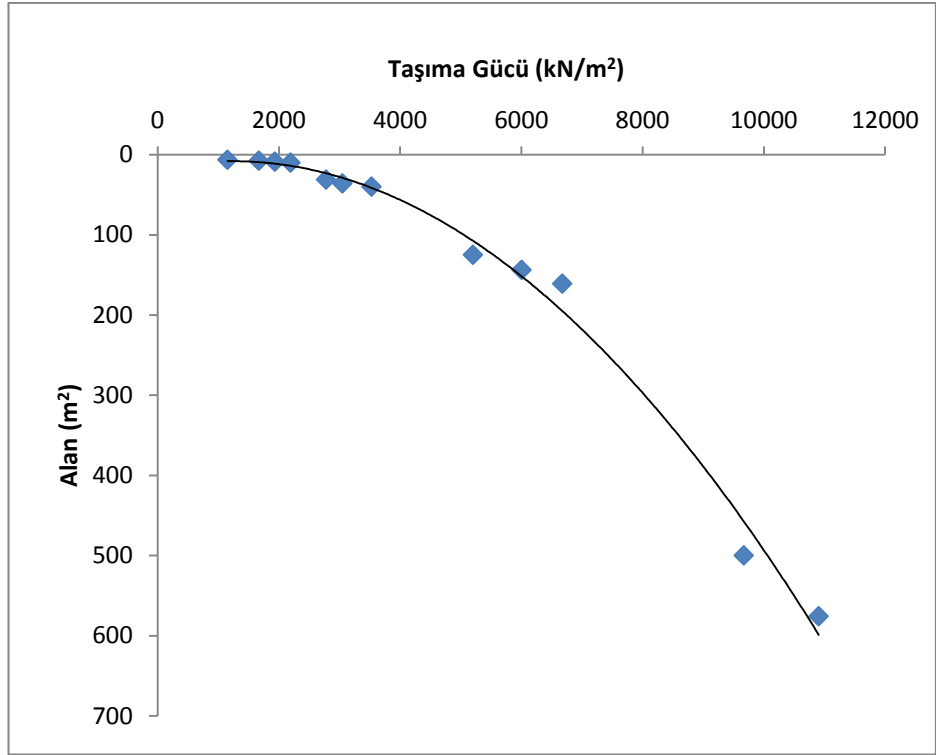
(+) TEMEL		
B (m)	L (m)	A (m²)
1.00	3.75	6.50
1.25	3.75	7.81
1.50	3.75	9.00
1.75	3.75	10.06
1.50	5.00	12.75
1.50	7.50	20.25
2.00	7.50	26.00
2.50	7.50	31.25
3.00	7.50	36.00
3.50	7.50	40.25
3.00	10.00	51.00
3.00	15.00	81.00
4.00	15.00	104.00
5.00	15.00	125.00
6.00	15.00	144.00
7.00	15.00	161.00
6.00	30.00	324.00
8.00	30.00	416.00
10.00	30.00	500.00

T TEMEL		
B (m)	L (m)	A (m²)
1.00	3.75	6.50
1.25	3.75	7.81
1.50	3.75	9.00
1.75	3.75	10.06
1.50	5.00	12.75
1.50	7.50	20.25
2.00	7.50	26.00
2.50	7.50	31.25
3.00	7.50	36.00
3.50	7.50	40.25
3.00	10.00	51.00
3.00	15.00	81.00
4.00	15.00	104.00
5.00	15.00	125.00
6.00	15.00	144.00
7.00	15.00	161.00
6.00	20.00	204.00
8.00	30.00	416.00
10.00	30.00	500.00

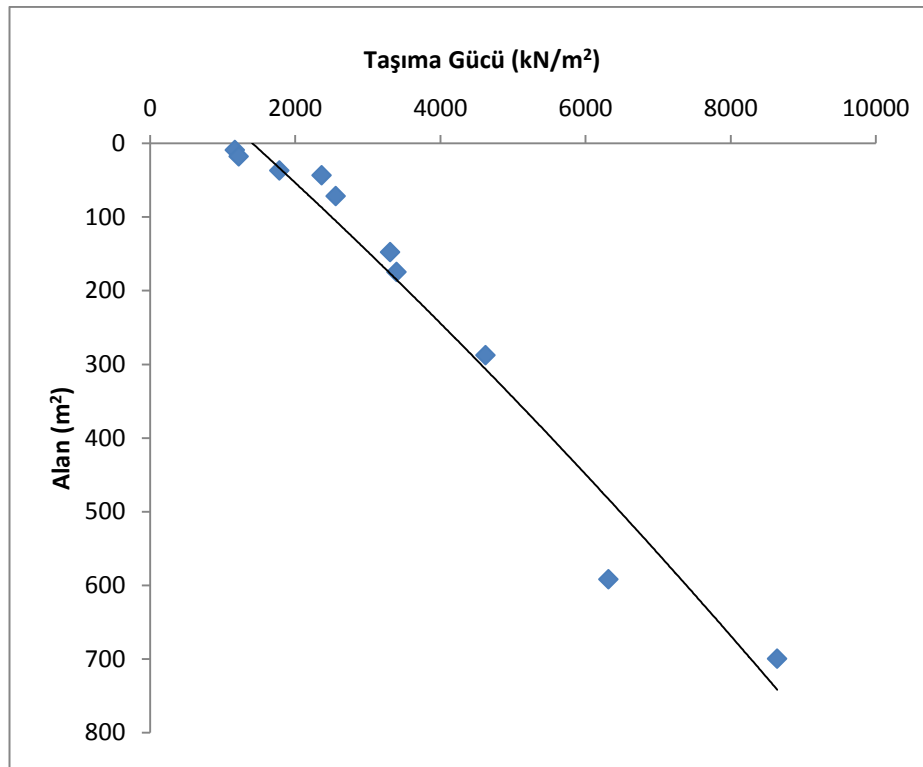
Sayısal analizler sonucunda her bir temel modeli için elde edilen taşıma gücü değerlerinin, temel alanıyla olan ilişkileri Şekil 4.5, Şekil 4.6, Şekil 4.7 ve Şekil 4.8’de gösterilmiştir.



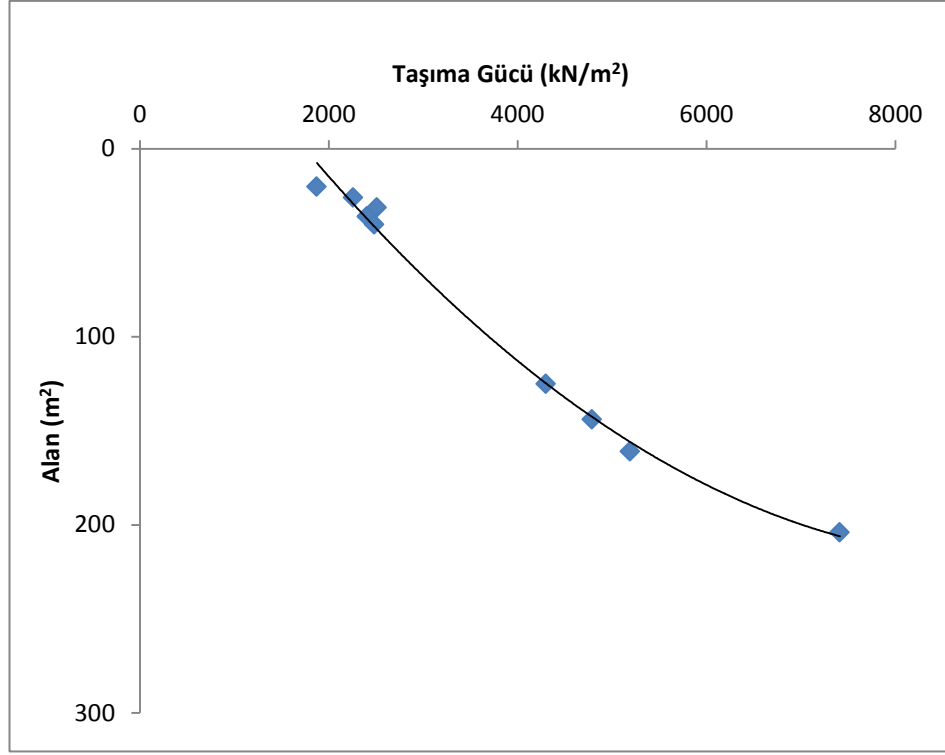
Şekil 4.5. Kare temele ait alan ve taşıma gücü değişimleri



Şekil 4.6.. (+) temele ait alan ve taşıma gücü değişimleri



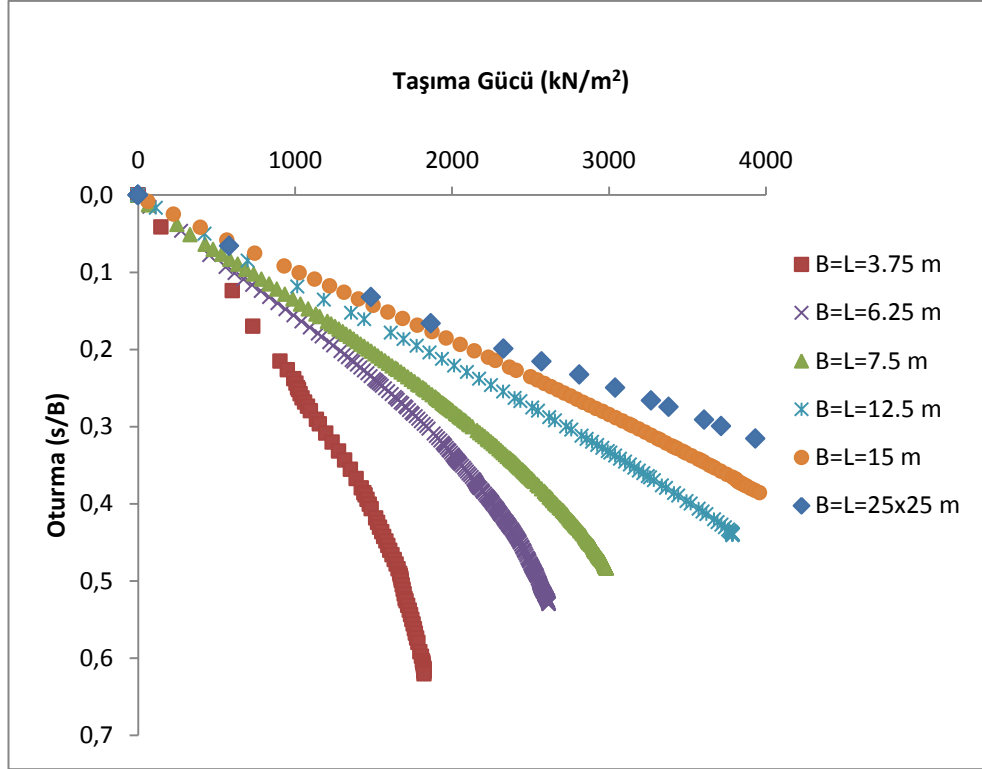
Şekil 4.7. H temele ait alan ve taşıma gücü değişimleri



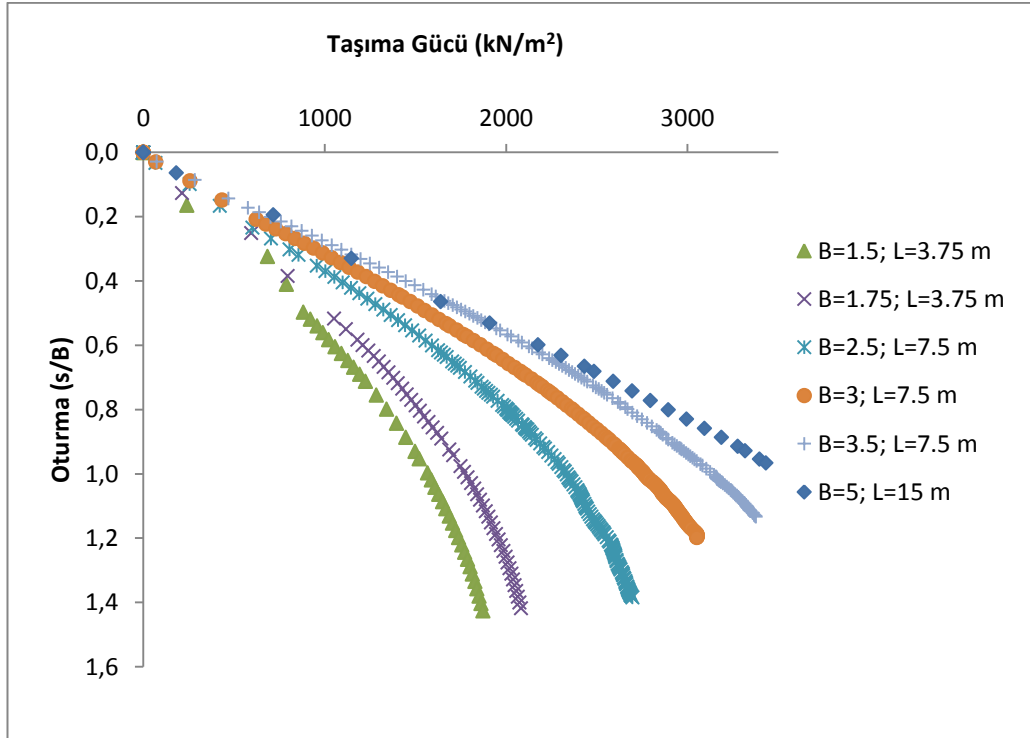
Şekil 4.8. T temele ait alan ve taşıma gücü değişimleri

Her bir temel modeli için yapılan analiz sonuçlarında, yüzey alan arttıkça taşıma gücü kapasitesinin arttığı yukarıdaki grafiklerde gösterilmiştir. Bu karşılaştırmalar literatürde yer alan, alan arttıkça taşıma gücü kapasitesi artar kabulünü doğrulamaktadır. Çok kenarlı temeller de, kare temelden beklenen davranışı göstermişler ve alanları arttıkça taşıma gücü değerlerinin de arttığı analizler sonucunda yapılan karşılaştırmalarda görülmüştür.

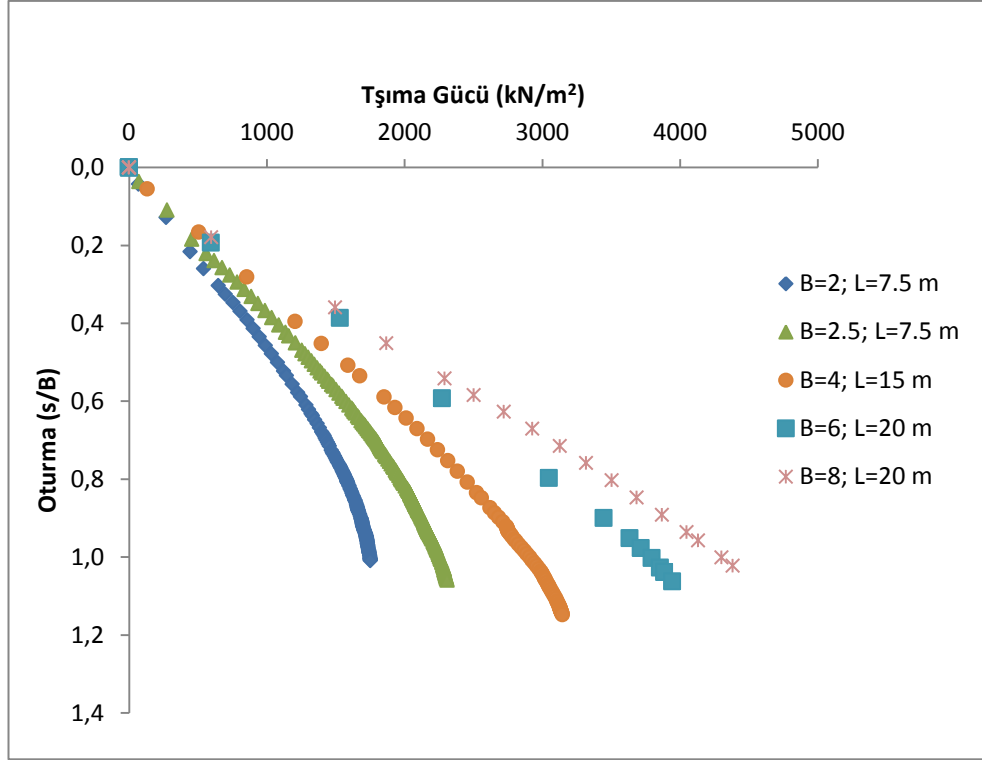
Çalışmada, her bir model temel için farklı boyutlarda yapılan analiz sonuçları Şekil 4.9, Şekil 4.10, Şekil 4.11 ve Şekil 4.12’de gösterilmiştir. Grafik sonuçlarına göre aynı geometrik modele sahip farklı boyutlardaki her bir temel için uzunluk veya genişliğin artmasıyla taşıma gücü değerleri artmaktadır.



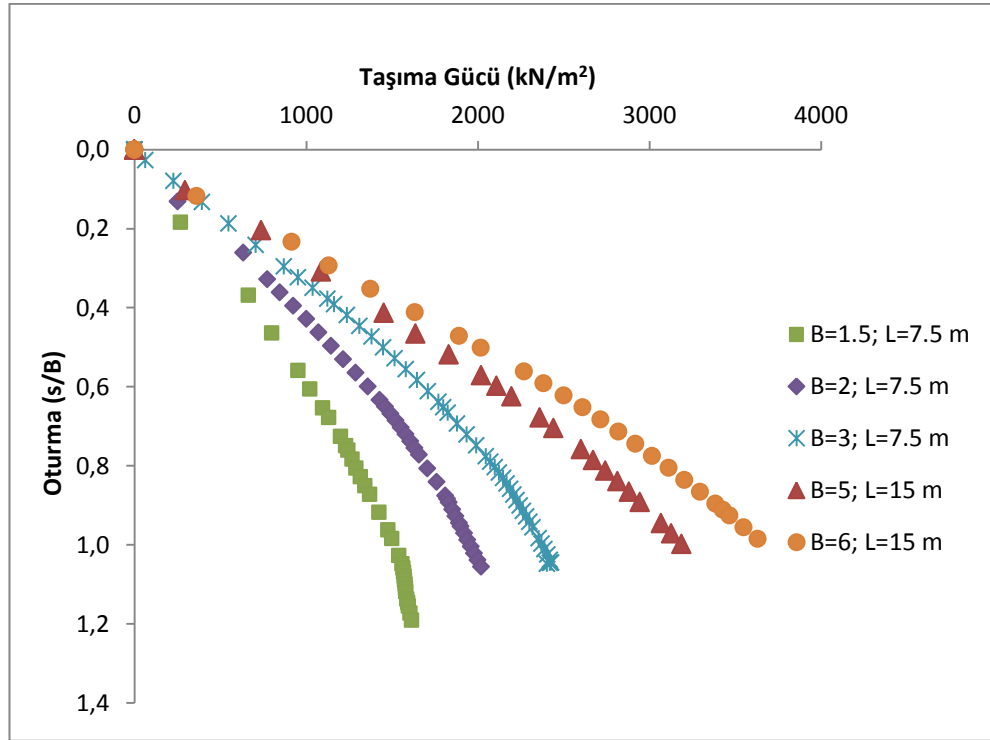
Şekil 4.9. Kare temele ait taşıma gücü ve s/B grafiği



Şekil 4.10. (+) temele ait taşıma gücü ve s/B grafiği



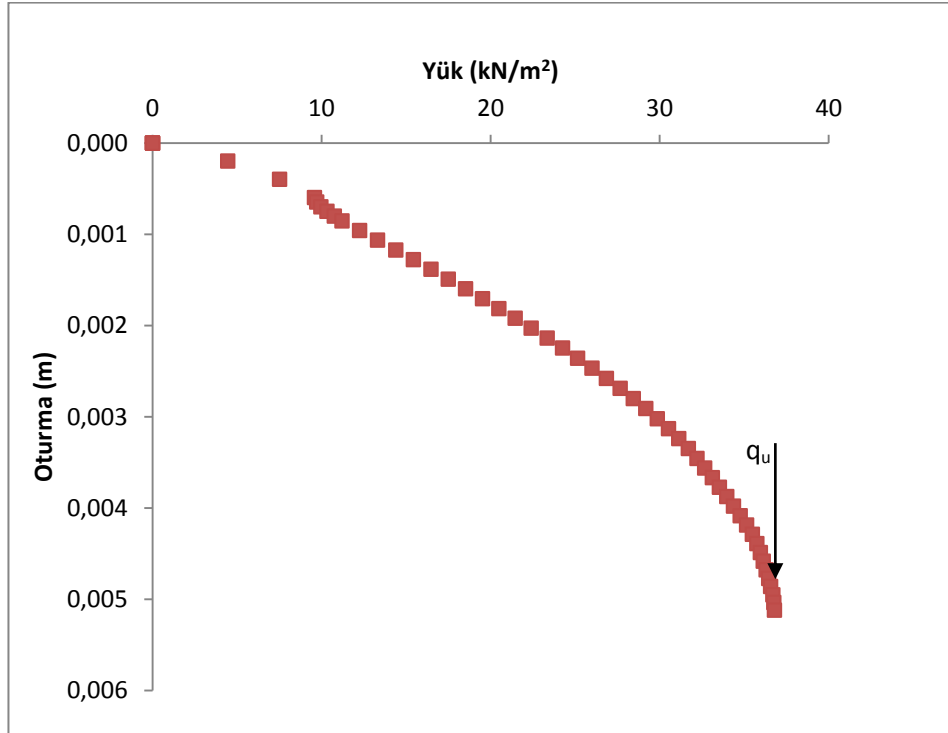
Şekil 4.11. H temele ait taşıma gücü ve s/B grafiği



Şekil 4.12. T temele ait taşıma gücü ve s/B değerleri

Şekil 4.9, Şekil 4.10, Şekil 4.11 ve Şekil 4.12 ‘de uzunluğun ve genişliğin artmasıyla taşıma gücünün arttığı, aynı zamanda aynı uzunluktaki çok kenarlı temeller için L/B oranının azalmasıyla temellerde yaklaşık olarak aynı deplasman değerlerinde daha fazla taşıma gücüne sahip olduğu görülmektedir. Bunun nedeni ise, L/B oranının azalmasıyla modelin kare temel modeline yaklaşmasıdır.

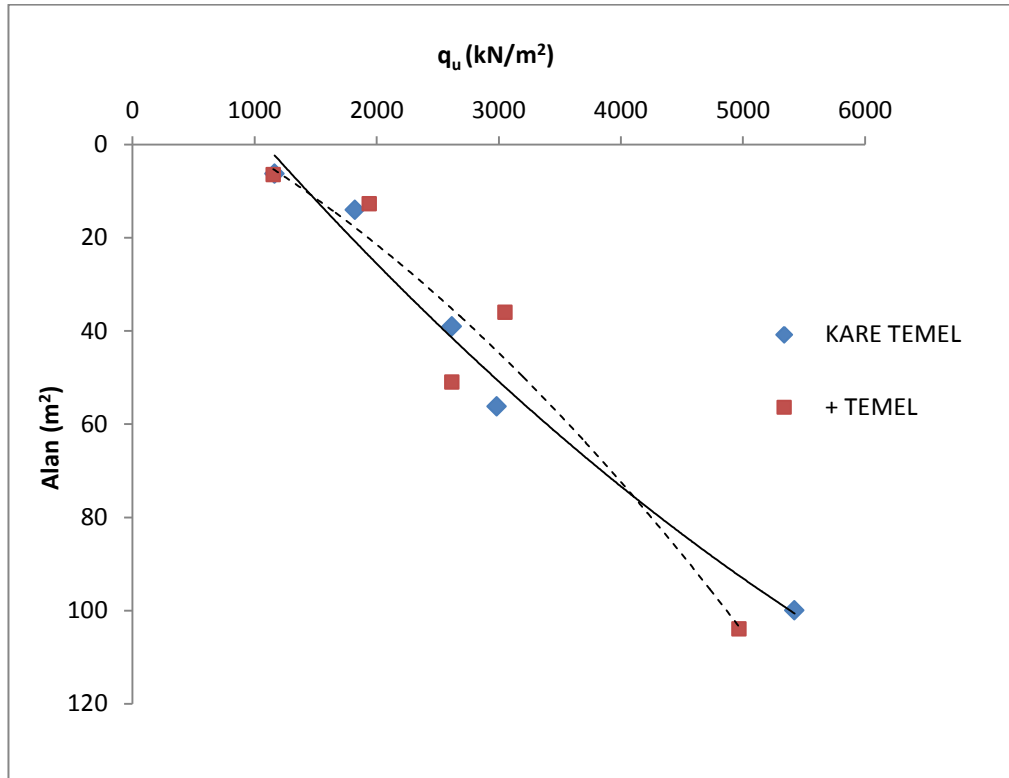
Çok kenarlı her bir model temelin farklı boyutları için elde edilen analiz sonuçları yaklaşık olarak aynı alana sahip kare temellerin analiz sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır. Sayısal analiz sonuçlarına göre nihai taşıma gücü değerleri bulunurken yük-oturma eğrileri üzerinde yükün sabit kaldığı ve oturma değerlerinin artmaya devam ettiği noktalardaki değerler nihai taşıma gücü değerleri olarak belirlenmiştir (Şekil 4.13). Analizler gevşek zemindeki temeller üzerinde yapıldığı için eğrilerin büyük çoğunluğunda hiçbir dönme olmamış ve son yük değeri nihai taşıma gücü değeri olarak alınmıştır. Çizelge 4.2, Çizelge 4.3 ve Çizelge 4.4’de, yaklaşık olarak aynı alana sahip kare temel ve çok kenarlı temellere ait temel boyutları, alanları ve q_u değerleri yer almaktadır. Kare temel ve çok kenarlı temeller arasında yapılan bu karşılaştırmaların sonuçları ise Şekil 4.14, Şekil 4.15 ve Şekil 4.16’da grafik olarak yer almaktadır.



Şekil 4.13. q_u değerinin belirlenmesi

Çizelge 4.2. Kare ve (+) temele ait temel boyutları, alanları ve q_u değerleri

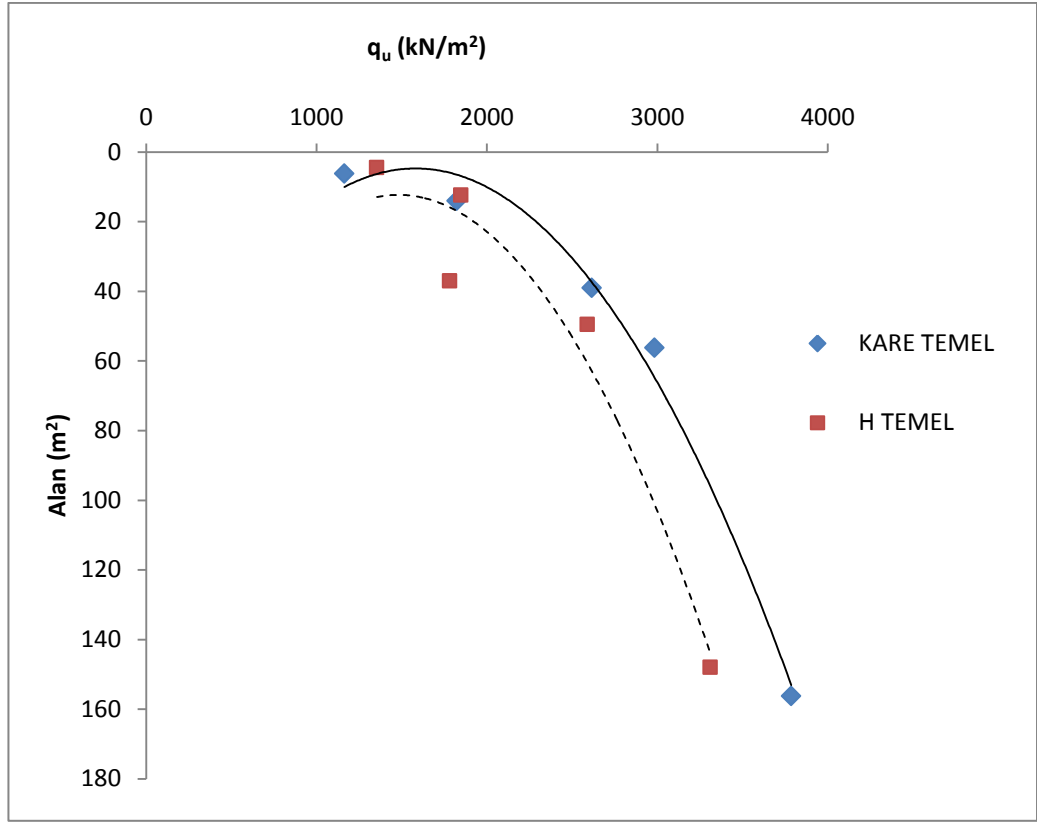
KARE TEMEL				(+) TEMEL			
B (m)	L (m)	A (m ²)	q_u (kN/m ²)	B (m)	L (m)	A (m ²)	q_u (kN/m ²)
2.50	2.50	6.25	1163.893	1.00	3.75	6.50	1153.639
3.75	3.75	14.06	1822.770	1.50	5.00	12.75	1939.689
6.25	6.25	39.06	2616.831	3.00	7.50	36.00	3052.183
7.50	7.50	56.25	2984.166	3.00	10.00	51.00	2616.451
10.00	10.00	100.00	5423.122	4.00	15.00	104.00	4968.929



Şekil 4.14. Kare temel ve (+) temelin karşılaştırması

Çizelge 4.3. Kare ve H temele ait temel boyutları, alanları ve q_u değerleri

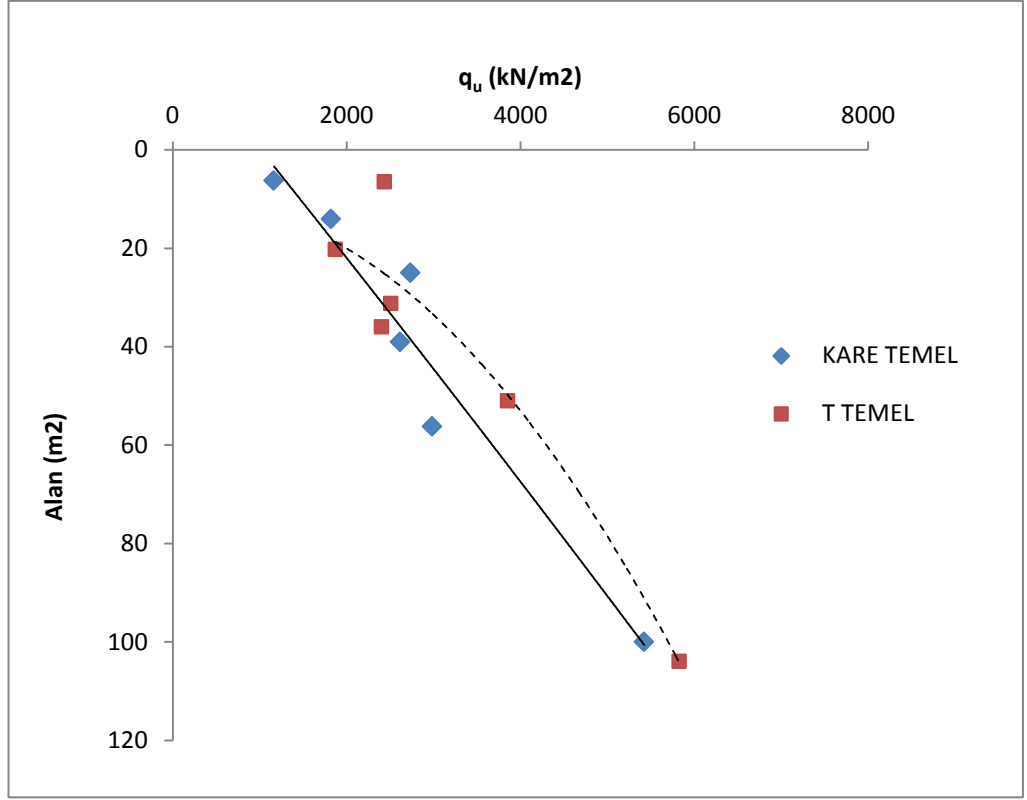
KARE TEMEL				H TEMEL			
B (m)	L (m)	A (m ²)	q_u (kN/m ²)	B (m)	L (m)	A (m ²)	q_u (kN/m ²)
2.50	2.50	6.25	1163.893	0.75	2.50	4.50	1354.747
3.75	3.75	14.06	1822.774	1.50	3.75	12.38	1848.507
6.25	6.25	39.06	2616.831	2.00	7.50	37.00	1783.056
7.50	7.50	56.25	2984.166	3.00	7.50	49.50	2590.784
12.50	12.50	156.25	3786.043	4.00	15.00	148.00	3312.134



Şekil 4.15. Kare temel ve H temelin karşılaştırması

Çizelge 4.4. Kare ve T temele ait temel boyutları, alanları ve q_u değerleri

KARE TEMEL				T TEMEL			
B (m)	L (m)	A (m ²)	q_u (kN/m ²)	B (m)	L (m)	A (m ²)	q_u (kN/m ²)
2.50	2.50	6.25	1163.893	1.00	3.75	6.50	2436.085
3.75	3.75	14.06	1822.774	1.50	7.50	20.25	1873.475
5.00	5.00	25.00	2734.512	2.50	7.50	31.25	2511.555
6.25	6.25	39.06	2616.831	3.00	7.50	36.00	2404.925
7.50	7.50	56.25	2984.166	3.00	10.00	51.00	3853.912
10.00	10.00	100.00	5423.122	4.00	15.00	104.00	5827.734



Şekil 4.16. Kare temel ve T temelin karşılaştırması

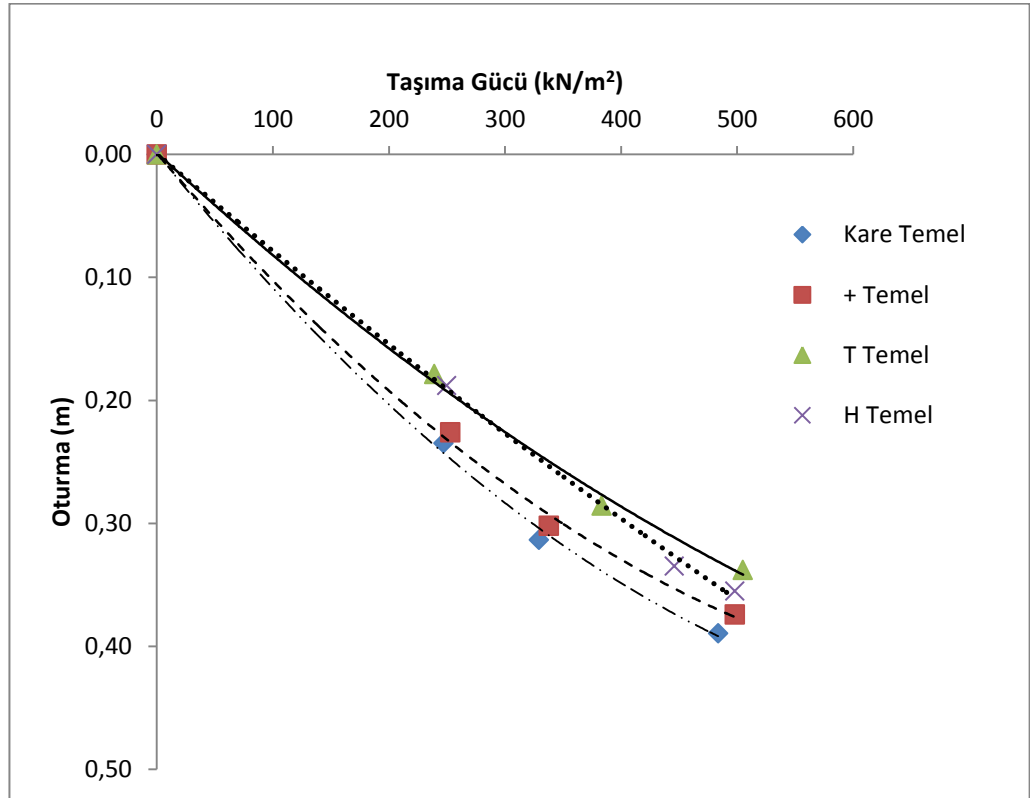
Şekil 4.14, Şekil 4.15 ve Şekil 4.16'daki grafiklerde görüldüğü gibi yapılan karşılaştırmalarda değerler birbirlerine oldukça yakındır. Kare temel ile yaklaşık olarak aynı alana sahip çok kenarlı temellerin taşıma gücü kapasitelerinin birbirine yakın sonuçlar verdiği görülmektedir. Çok kenarlı temel üzerine uygulanan yük, temelin her bir kanadı altında kesme bölgeleri oluşmasına neden olmuştur. Bu kesme bölgelerinin birbirlerini etkilemesinden dolayı zemin daha fazla direnç göstermiş ve çok kenarlı temellerin taşıma gücü değerleri artmıştır.

4.3. Oturma Analizleri

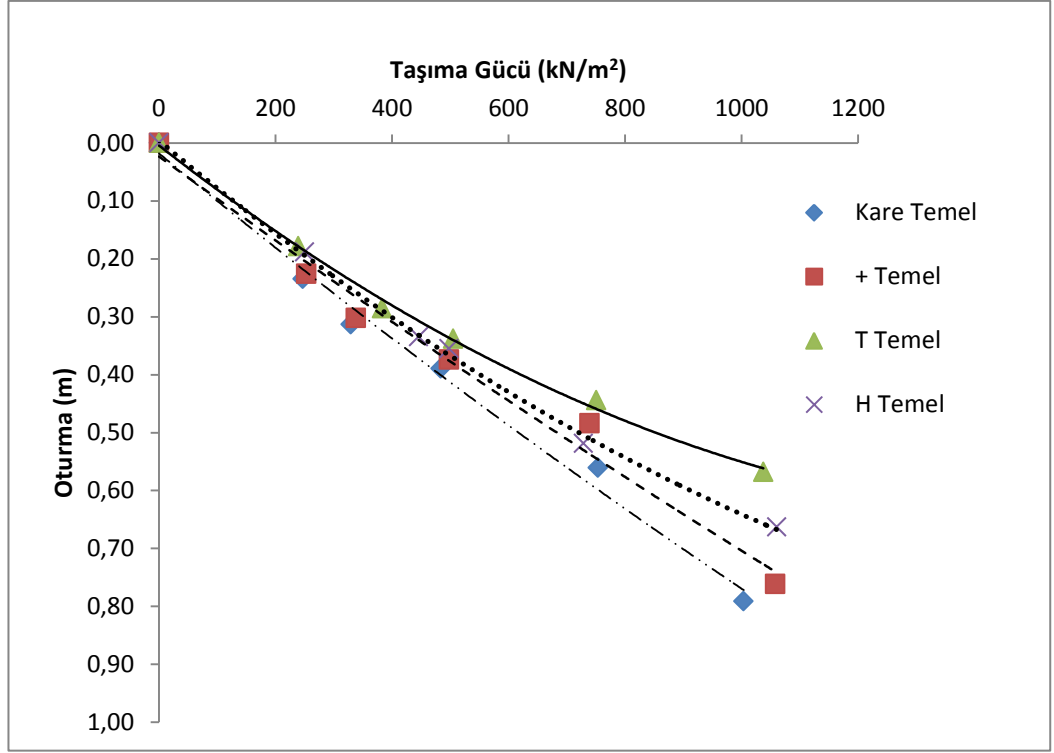
Oturma analizlerini incelemek için her bir temel türüne ait sabit bir yük altındaki oturma değerleri karşılaştırılmıştır. Yaklaşık olarak aynı yüzey alanına sahip temellerde $q=500 \text{ kN/m}^2$ ve $q=1000 \text{ kN/m}^2$ lik yükler için oturma değerleri belirlenerek grafik halinde aşağıda verilmiştir. Bu karşılaştırmada kullanılan temel modelleri, ebatları ve alanları Çizelge 4.5'de gösterilmiştir.

Çizelge 4.5. Kullanılan temel modelleri, boyutları ve alanları

Temel Modeli	Genişlik, B (m)	Uzunluk, L (m)	Alan A (m ²)
Kare Temel	2.50	2.50	6.25
(+) Temel	1.00	3.75	6.50
T Temel	1.00	3.75	6.50
H Temel	0.75	2.50	4.50



Şekil 4.17. $q_u=500 \text{ kN/m}^2$ için temellerin oturma ilişkisi



Şekil 4.18. $q_u=1000 \text{ kN/m}^2$ için temellerin oturma ilişkisi

Şekil 4.17 ve Şekil 4.18’de ki grafiklerde yaklaşık olarak aynı yüzey alanına sahip temeller için ortak bir yük değerinde oluşan oturma miktarları karşılaştırmaktadır. Grafiklerde görüldüğü gibi aynı yük altında çok kenarlı temellerde meydana gelen oturma miktarları kare temele göre biraz daha azdır.

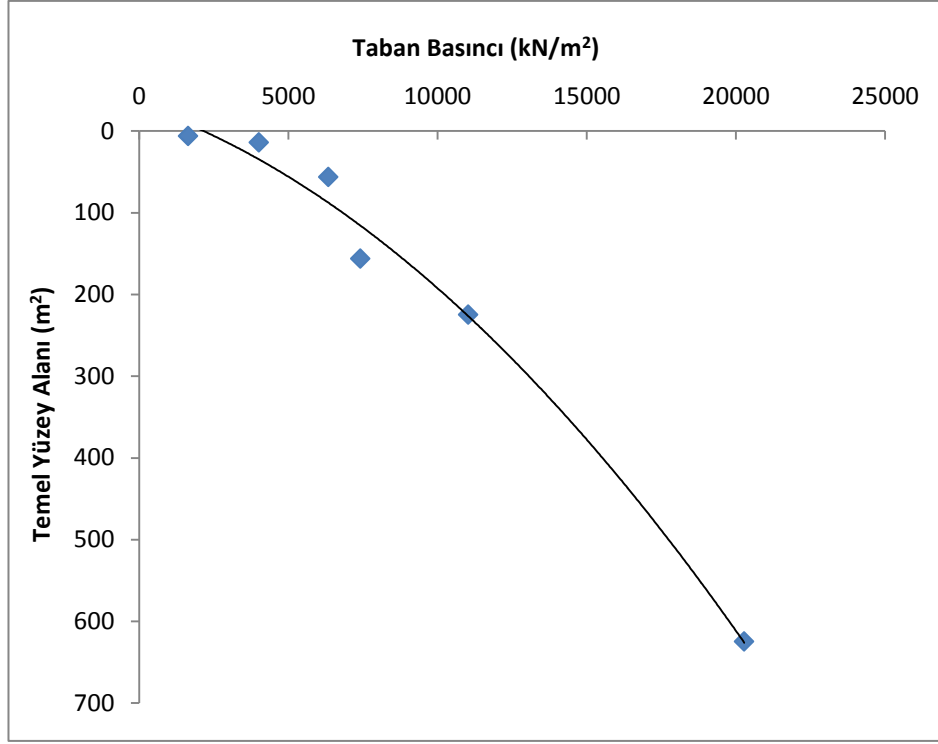
Çizelge 4.6’ de kare ve çok kenarlı temellere ait farklı yükleme durumlarında elde edilen oturma miktarları verilmektedir. Çizelgede de görüldüğü gibi her bir yükleme kademesinde oluşan oturma miktarlarında kare temel altında oluşana oturma miktarı çok kenarlı temellerden daha fazla olmaktadır. Şekil 4.17, Şekil 4.18 ve Çizelge 4.6’daki sonuçlara göre çok kenarlı temellerin taşıma gücü, aynı yüzey alanına sahip kare temelin taşıma gücüyle yaklaşık olarak aynı olduğu görülmektedir.

Çizelge 4.6. Farklı yükleme durumlarında elde edilen oturma miktarları

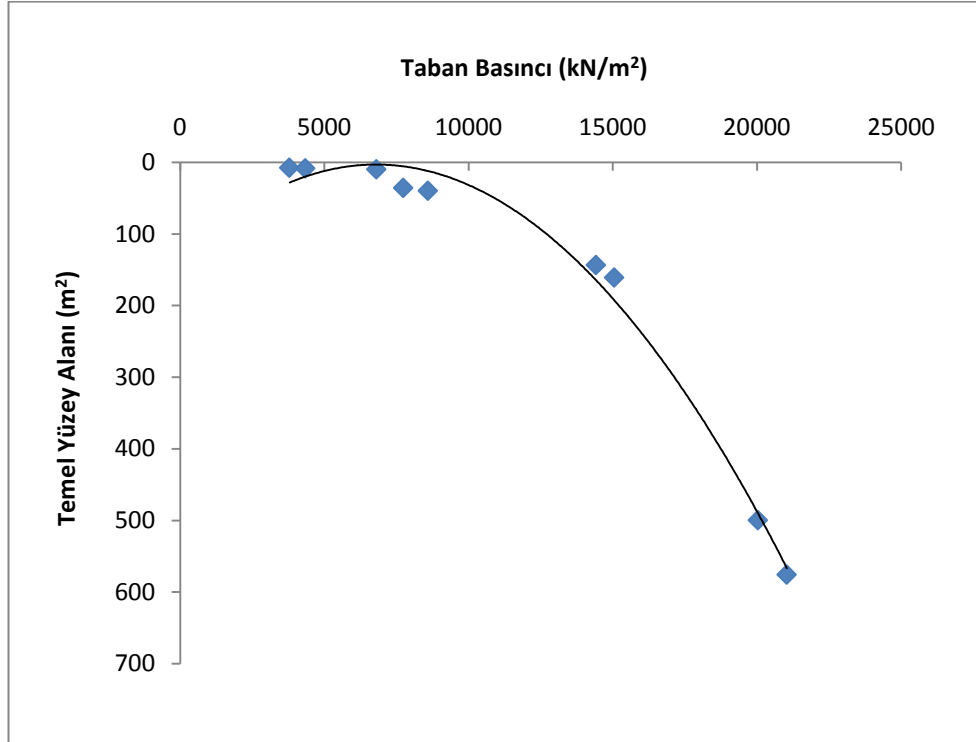
Temel Modeli	Alan A (m ²)	Oturma miktarları (mm)			
		q= 250kPa	q= 500kPa	q= 750kPa	q= 1000kPa
Kare Temel	6.25	235	390	561	791
(+) Temel	6.50	226	370	484	761
T Temel	6.50	191	338	444	568
H Temel	4.50	198	355	522	663

4.4. Gerilme Analizleri

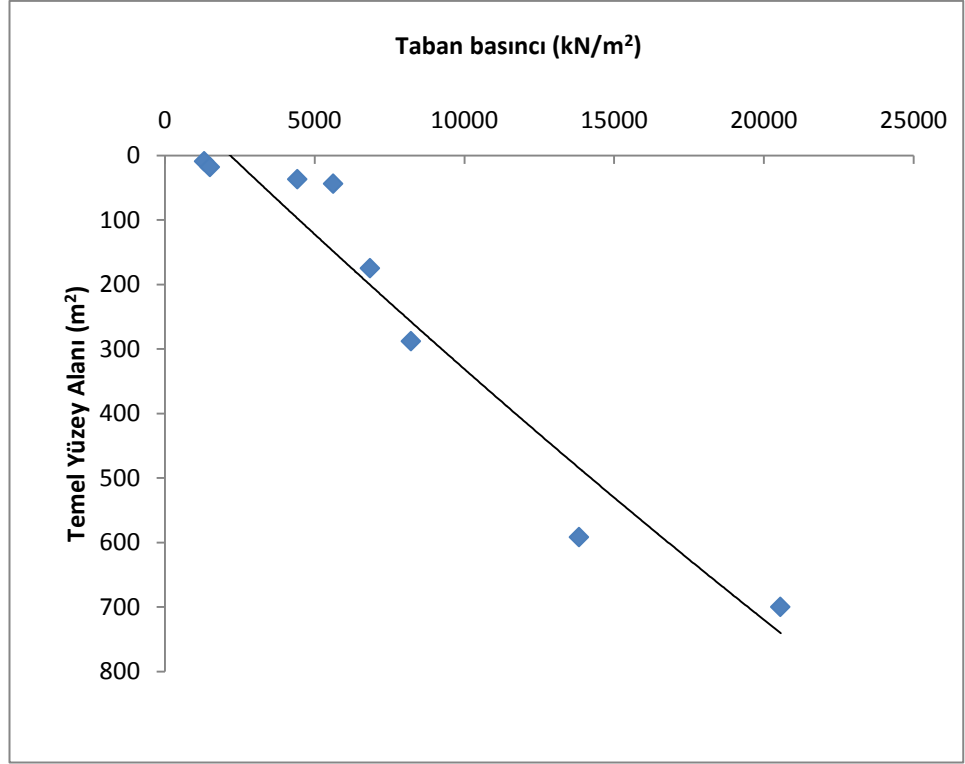
Yapılan sayısal analizler sonucunda kare ve çok kenarlı temeller alan - taşıma gücü kapasitesi, yük-deplasman değerleri bakımından karşılaştırılmıştır. Kare ve çok kenarlı temellere ait analiz sonuçlarına göre temelin tam altında oluşan gerilme değerleri de incelenmiştir. Her bir temel için analizler sonucunda oluşan toplam gerilme değerler okunmuştur. Zeminde içerisinde yeraltı su seviyesi tanımlanmadığı için okunan bu toplam gerilme değerleri, düşey doğrultudaki toplam efektif gerilme değerlerine (σ_{zz}) eşit olmaktadır. Gerilme değerlerine ait grafikler Şekil 4.19, Şekil 4.20, Şekil 4.21 ve Şekil 4.22’de verilmiştir.



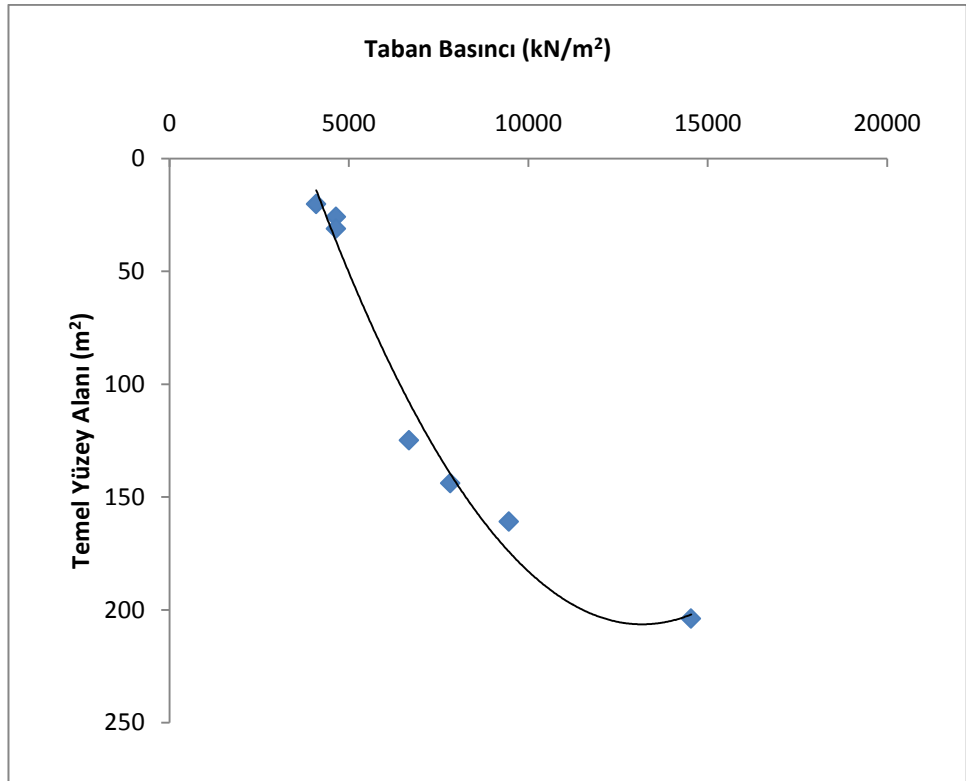
Şekil 4.19. Kare temele ait düşey gerilme-temel yüzey alanı ilişkisi



Şekil 4.20. + temele ait düşey gerilme-temel yüzey alanı ilişkisi



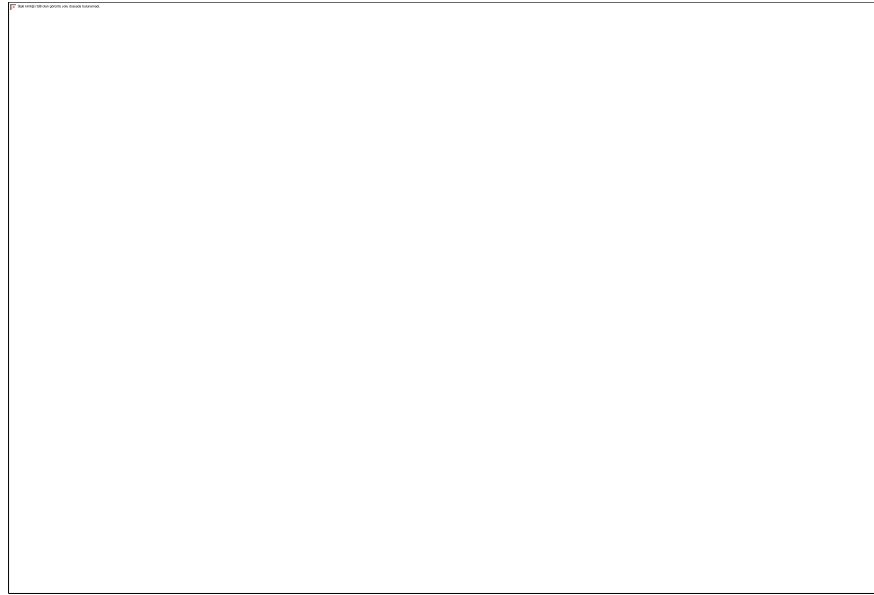
Şekil 4.21. H temeale ait düşey gerilme-temel yüzey alanı ilişkisi



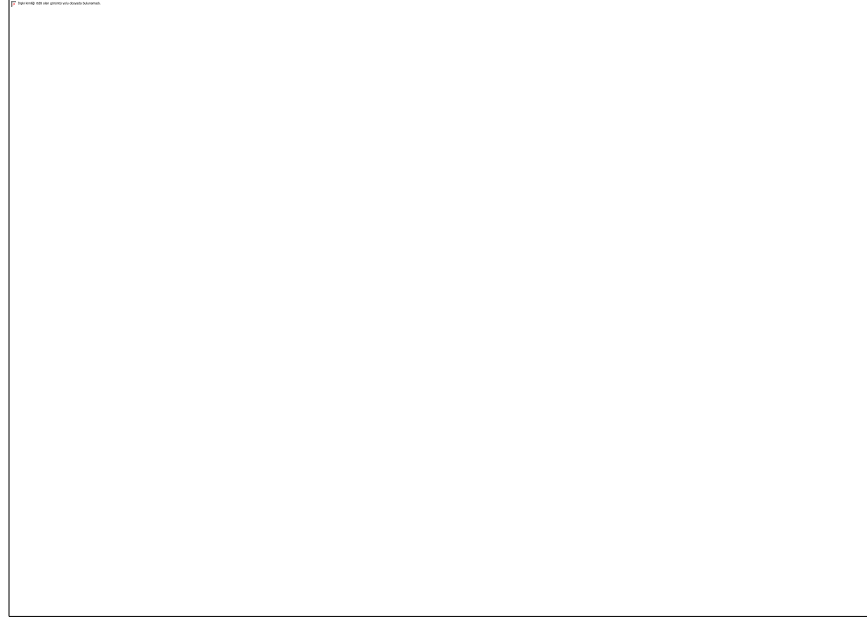
Şekil 4.22. T temeale ait düşey gerilme-temel yüzey alanı ilişkisi

Yukarıda verilen grafiklerde de görüldüğü gibi sayısal analiz sonuçları alan arttıkça temel altında oluşan düşey gerilme değerlerinin arttığını göstermektedir. Çok kenarlı temellerde, kare temelde beklenen gibi bir davranış gözlenmiştir ve çok kenarlı temellerde de alan arttıkça temel altında oluşan düşey gerilmeler artmıştır.

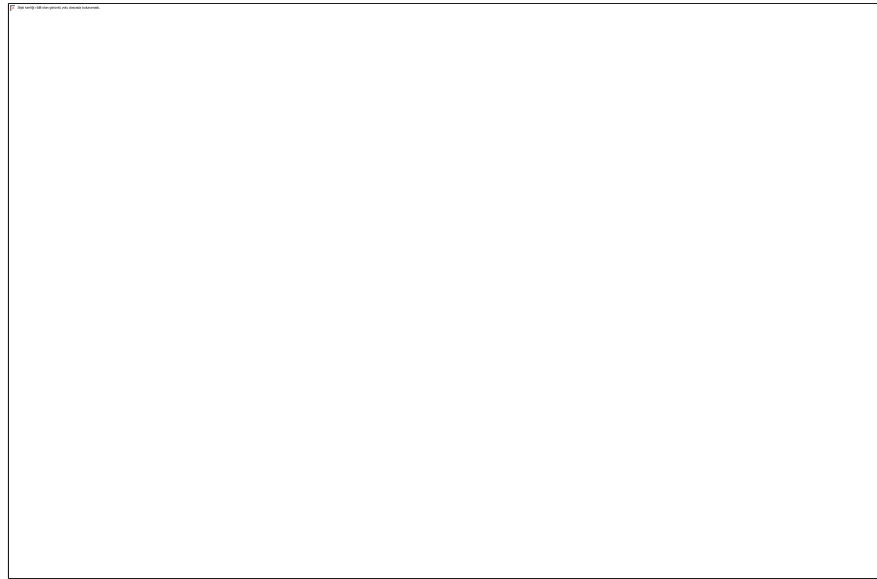
Zemin yüzeyinde uygulanan bir yükten dolayı zemin kütlesi içindeki noktalarda gerilme artışları meydana geleceği bilinmektedir. Zemin yüzeyine uygulanan bir yükten dolayı, zemine aktarılan düşey gerilmelerin şiddeti derinliğe bağlı olarak değişmektedir. Zeminde oluşan bu gerilmelerin şiddeti derinlik arttıkça azalmaktadır. Temele uygulanan yük nedeniyle, zeminde oluşan gerilme kuvvetlerinin derinliğe bağlı olarak değişimleri aşağıdaki şekillerde gösterilmektedir. Gerilme analizleri için $B=5$; $L=15$ cm uzunluğundaki T model temele ait gerilme dağılımı gösterilmiştir. Model deneylerde kullanılan kasa derinliği 50cm'dir. Şekillerde verilen gerilme dağılımları 1cm, 3cm, 5cm, 10cm, 15cm, 20cm ve 25cm derinliklerinden alınmıştır.



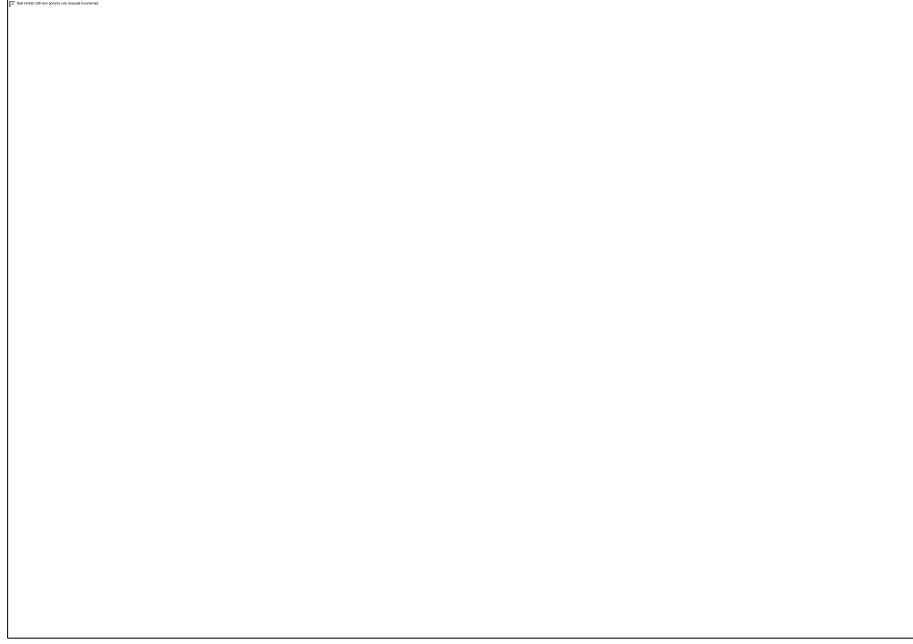
Şekil 4.23. T temele ait 1cm derinlikteki gerilme dağılımı



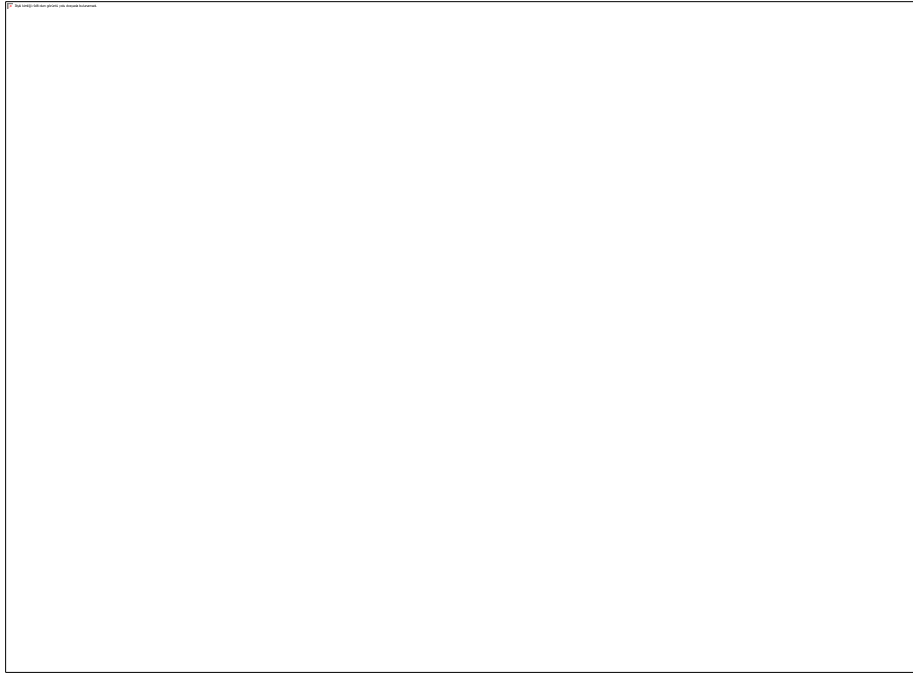
Şekil 4.24. T temeale ait 3cm derinlikteki gerilme dağılımı



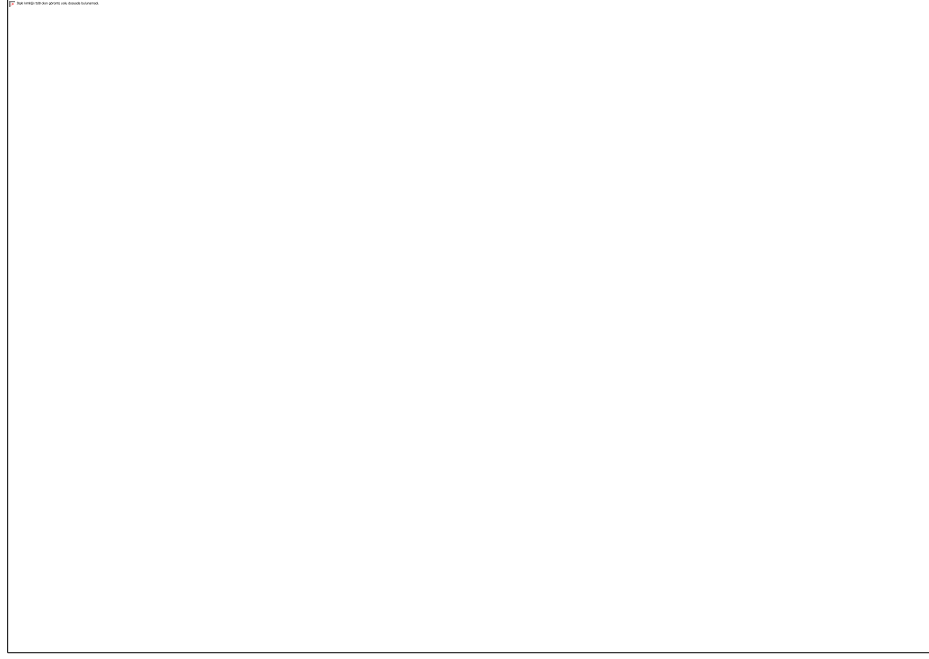
Şekil 4.25. T temeale ait 5cm derinlikteki gerilme dağılımı



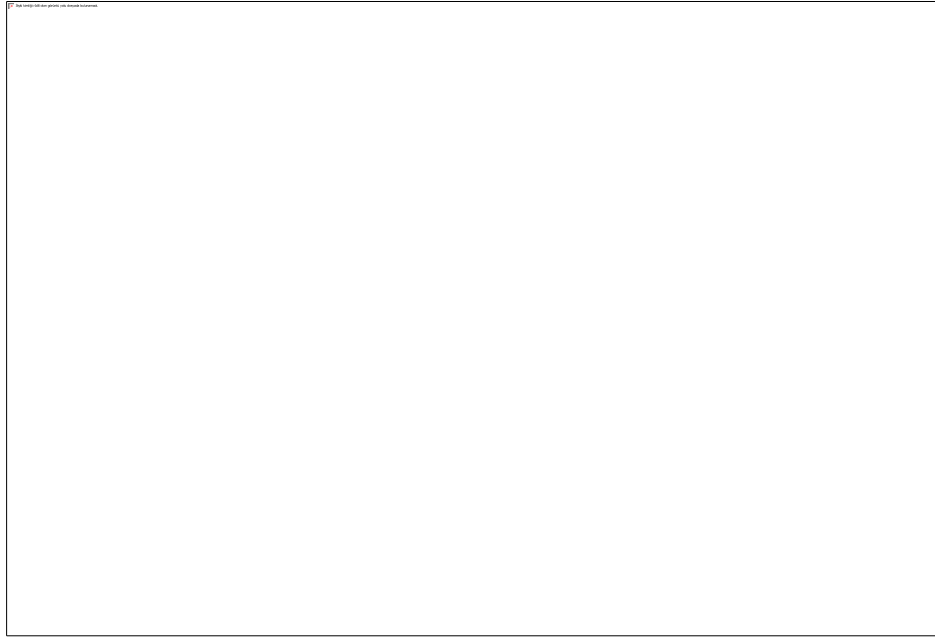
Şekil 4.26. T temeale ait 10cm derinlikteki gerilme dağılımı



Şekil 4.27. T temeale ait 15cm derinlikteki gerilme dağılımı



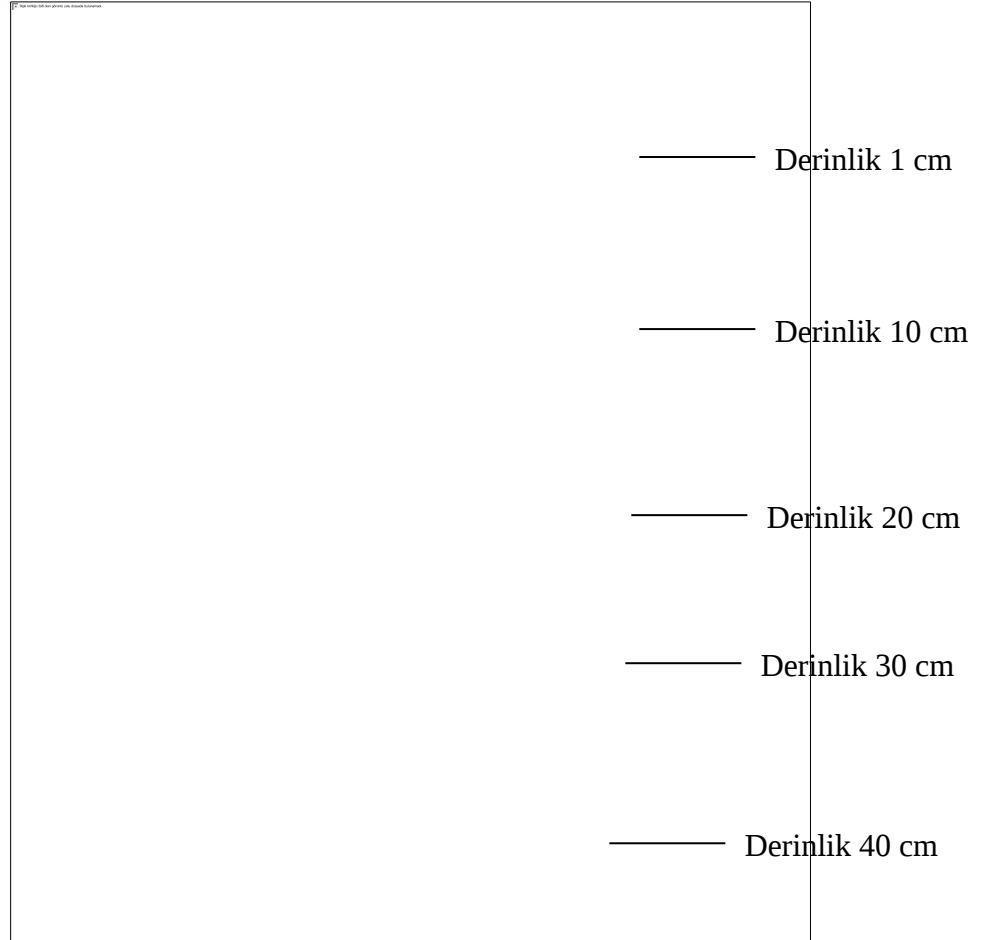
Şekil 4.28. T temele ait 20cm derinlikteki gerilme dağılımı



Şekil 4.29. T temele ait 25cm derinlikteki gerilme dağılımı

Model temele uygulanan düşey yükten dolayı, temel altında oluşan farklı derinliklerdeki düşey gerilmeler yukarıdaki şekillerde gösterilmektedir. Derinlik arttıkça gerilmelerin etkilediği bölgenin genişlediği ve bununla beraber gerilme şiddetinin

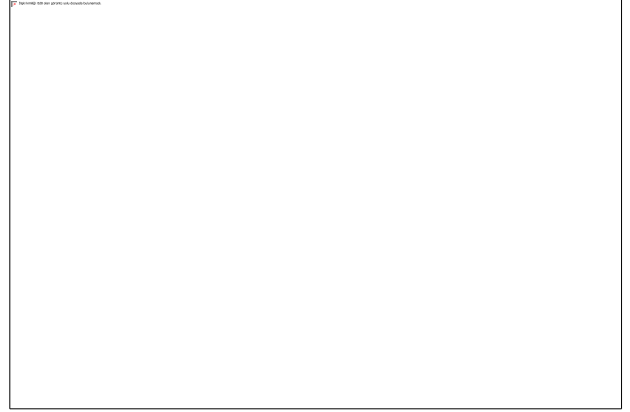
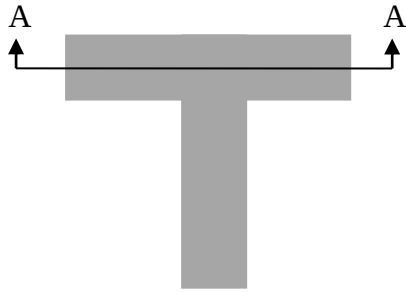
derinlik artıkça azaldığı görülmektedir. Şekil 4.30'da + temel altında 1cm, 10cm 20cm, 30cm ve 40cm derinliklerde yatay düzlemde ki gerilme dağılımları seri halde gösterilmektedir.



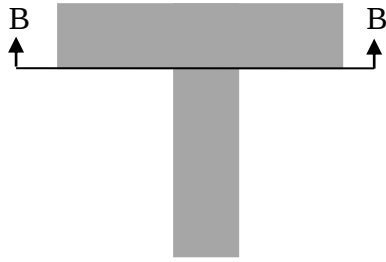
Şekil 4.30. + temel altında farklı derinliklerde oluşan gerilme dağılımları

T temel ve + temelin yatay düzlemdeki gerilme dağılımlarını gösteren şekillerden de anlaşıldığı gibi yükün etki noktasından yanlara doğru gidildikçe aynı düzlemdeki düşey gerilme değerleri azalmaktadır.

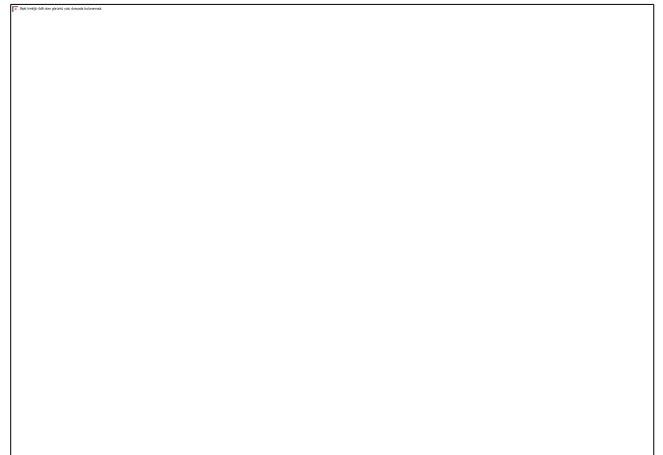
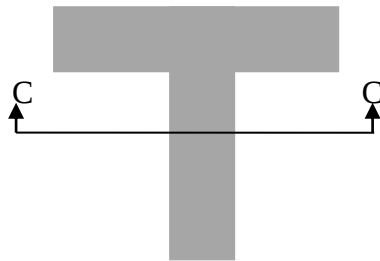
T temel ve + temel altında düşey düzlemde oluşan gerilmeler ise Şekil 4.31, Şekil 4.32, Şekil 4.33, Şekil 4.34, Şekil 4.35 ve Şekil 4.36'da gösterilmiştir. Model temellerden alınan kesitler ve düşey düzlemde oluşan gerilmeler de şekillerde gösterilmektedir.



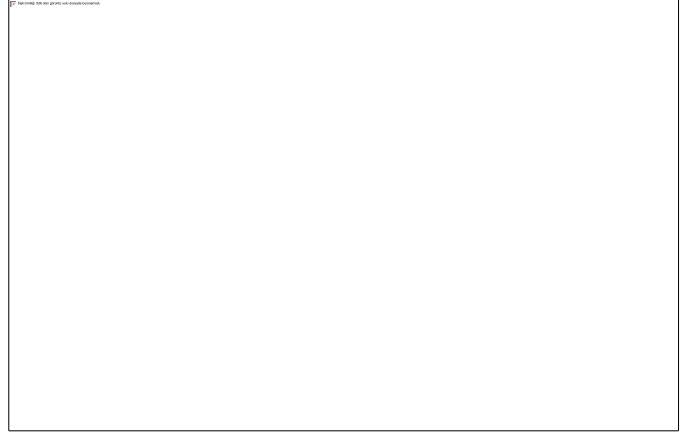
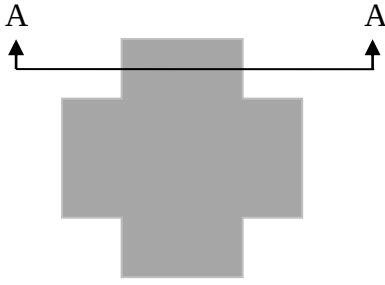
Şekil 4.31. T temeale ait A-A kesitindeki düşey gerilmeler



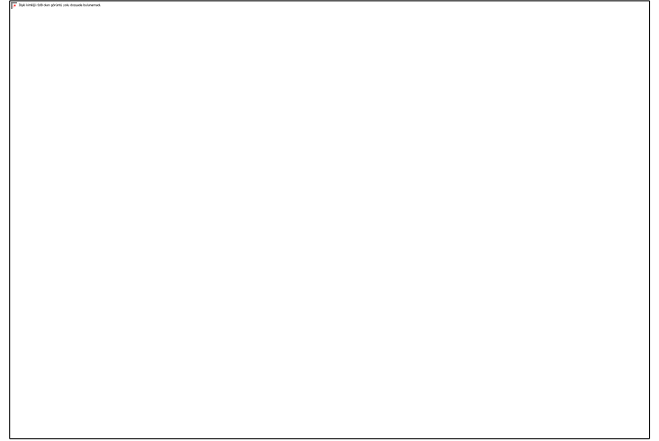
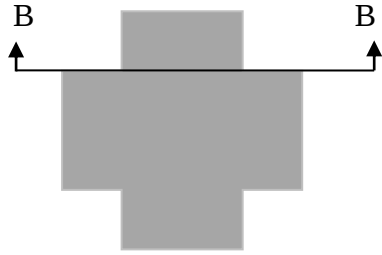
Şekil 4.32. T temeale ait B-B kesitindeki düşey gerilmeler



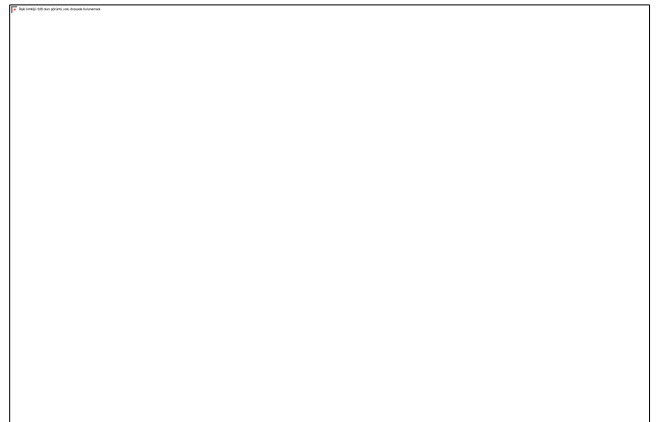
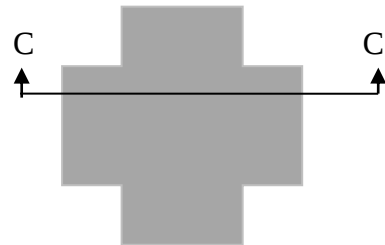
Şekil 4.33. T temeale ait C-C kesitindeki düşey gerilmeler



Şekil 4.34. + temele ait A-A kesitindeki düşey gerilmeler



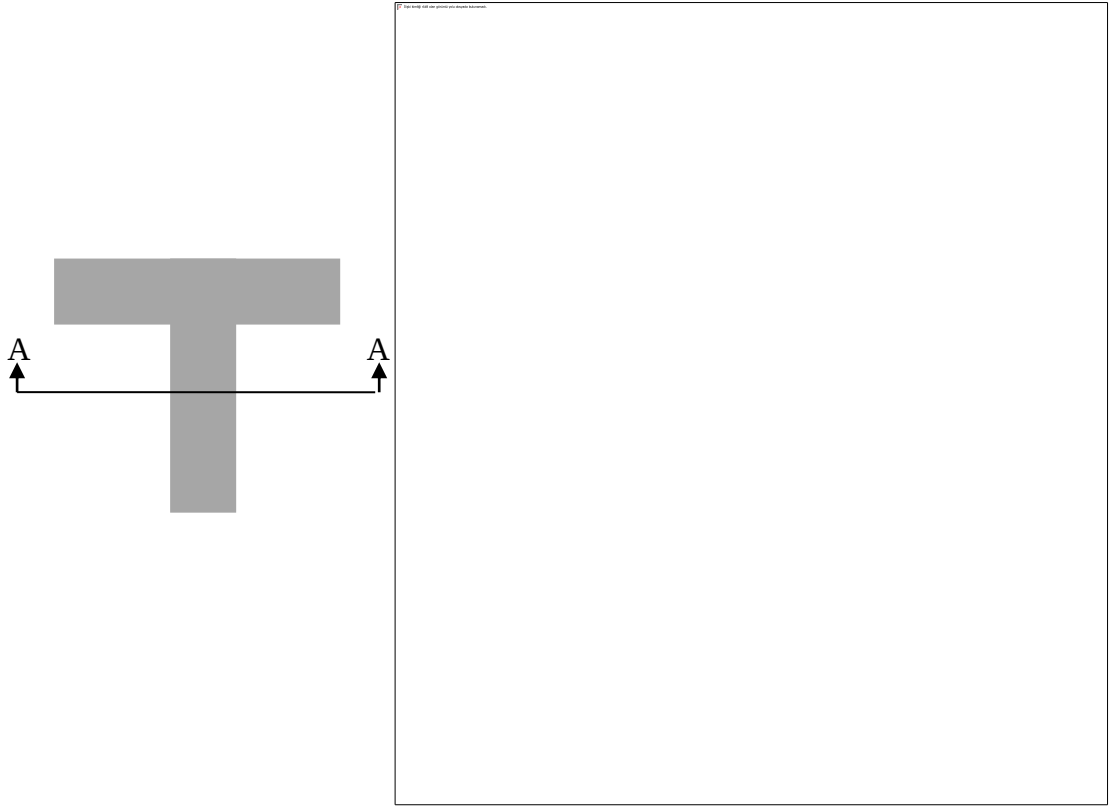
Şekil 4.35. + temele ait B-B kesitindeki düşey gerilmeler



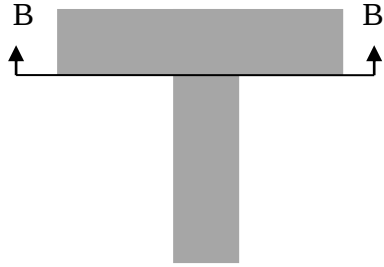
Şekil 4.36. + temele ait C-C kesitindeki düşey gerilmeler

T temel ve + temel için verilen düşey gerilmelere ait şekillerde, temel altın oluşan izobarlar açıkça görülmektedir. Temel tabanından itibaren derinlik artıkça oluşan izobar eğrileri genişlemekte ve oluşan bu eğrilerin yoğunluğu azalmaktadır. Bu durum literatürle uyumludur (Keskin, 2004).

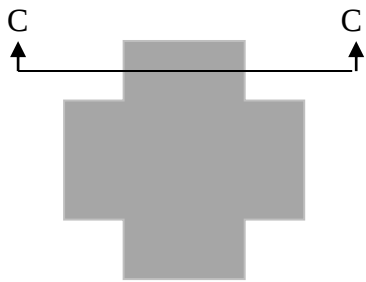
Aşağıda verilen şekillerde ise T temel ve + temelden alınan kesitler ve bu kesitlerdeki deplasman hatları gösterilmektedir. Şekil 4.37 ve Şekil 4.39’da kanatların uç noktalarına doğru alınan kesit görünümünde kanatlar altında Terzaghi’nin önerdiği gibi göçme yüzeylerinin olduğu, kanat birleşim yerlerinden alınan Şekil 4.38 ve Şekil 4.40’daki deplasman görünümünde ise her bir kanat altında oluşan göçme yüzeyleri ve bu göçme yüzeylerinin birbirlerini etkilediği görülmektedir.



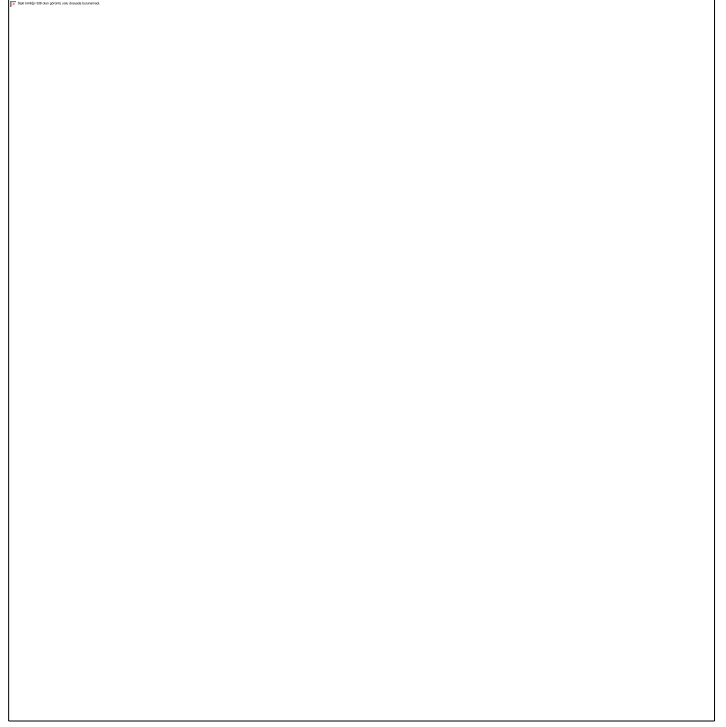
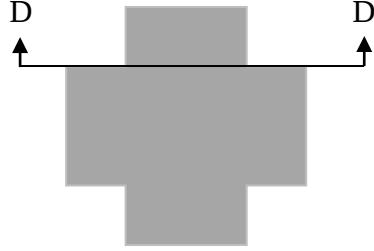
Şekil 4.37. T temele ait A-A kesitinde oluşan deplasman hattı



Şekil 4.38. T temeale ait B-B kesitinde oluşan deplasman hattı



Şekil 4.39. + temeale ait C-C kesitinde oluşan deplasman hattı



Şekil 4.40. + temele ait D-D kesitinde oluşan deplasman hattı

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, kum zemine oturan çok kenarlı (kare, +, T ve H) yüzeysel temellerin taşıma gücü, oturma ve gerilme davranışları sonlu elemanlar yöntemiyle analiz edilmiştir. Analizlerde sonlu elemanlar yöntemi esasına dayanan PLAXIS 3D Foundation bilgisayar programı kullanılarak zemin-temel sisteminin yükleme sonucu oluşan göçme aşamaları simülasyonu oluşturulmuştur. Kum zemin davranışının modellenmesinde Pekleşen Zemin Modeli (Hardening Soil Model) kullanılmıştır. Çalışmada elde edilen sonuçlar aşağıda sıralanmıştır;

1. Her bir temel modeli için temel yüzey alanı arttıkça taşıma gücü kapasitesinin arttığı, çok kenarlı temellerin de kare temelden beklenen davranışı gösterdikleri ve yüzey alanları arttıkça taşıma gücü değerlerinin de arttığı belirlenmiştir.
2. Aynı geometrik modele sahip farklı boyutlardaki her bir temel için uzunluk veya genişliğin artmasıyla taşıma gücü kapasitesi değerlerinin arttığı tespit edilmiştir.
3. Çok kenarlı temelerde L/B oranının azalmasıyla modelin kare temel modeline benzediği ve L/B oranının azalmasıyla temeller yaklaşık olarak aynı oturma değerlerinde daha fazla taşıma gücüne sahip olduğu gözlenmiştir.
4. Kare temel ile yaklaşık olarak aynı alana sahip çok kenarlı temellerin taşıma gücünde birbirine yakın sonuçlar elde edilmiştir.
5. Yapılan gerilme analizlerinde çok kenarlı temelerde, kare temelde beklenen davranışın gözlemlendiği ve çok kenarlı temelerde de yüzey alan arttıkça temel altında oluşan düşey gerilmelerin arttığı belirlenmiştir.
6. Yatay düzlemde yükün etki noktasından yanlara doğru gidildikçe aynı düzlemdeki düşey gerilme değerlerinin azaldığı tespit edilmiştir.
7. T temel ve + temelin kanat uç noktalarına doğru alınan kesit görünümünde kanatlar altında Terzaghi'nin önerdiği gibi göçme yüzeylerinin olduğu, kanat birleşim yerlerinden alınan deplasman görünümünde ise her bir kanat altında oluşan göçme yüzeyleri ve bu göçme yüzeylerinin birbirlerini etkilediği görülmüştür.

Bu tez çalışması sonrası aşağıdaki öneriler değerlendirilebilir;

- Sayısal analizlerde çok kenarlı temellerin altına güçlendirme elemanları yerleştirilerek analiz sonuçlarıyla deney sonuçları arasında karşılaştırma yapılabilir.

- Kum zeminde yapılan bu çalışmalar kil zeminler ve tabakalı zeminler içinde yapılabilir.
- Çok kenarlı temelerde maliyet araştırması yapılarak mimari açıdan uygun olması durumunda uygulamalarda kullanılabilir.

KAYNAKLAR

- Bağrıaçık, B., 2010. Zeminlerdeki gerilme durumlarının deneysel ve teorik olarak incelenmesi. Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yüksek Lisans Tezi, Adana
- Bransby, M.F., Randolph, M.F., 1999. The effect of embedment depth on the undrained response of skirted foundations to combined loadin. **Soils and Foundations**, 39(4), 19-34.
- Bransby, M.F., Randolph, M.F., 1999. The effect of skirted foundation shape on response to combined v-m-h loadings. **International Journal of Offshore and Polar Engineering**, 9(3), 214-218.
- Brinkgreve, R.B.J. ve Broere, W. 2006. Plaxis finite element code for soil and rock analysis. 3D Foundation–Version 2.1.
- Davarcı, B., 2013. Donatılı kum zemine oturan çok kenarlı yüzeysel temellerin analizi. Mustafa Kemal Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yüksek Lisans Tezi, Hatay.
- Davarcı, B., Örnek, M. and Türedi Y., 2014. Model studies of multi-edge footings on geogrid-reinforced sand. **European Journal of Environmental and Civil Engineering**, 18(2), 190-205.
- Demir, A., 2006. Temel mühendisliğinde çekme dayanımının irdelenmesi ve kazıklı temellerin çekme dayanımının analizi. Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yüksek Lisans Tezi, Adana
- Emirler, B., 2013. Grup ankrajların çekme kapasitesinin incelenmesi. Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yüksek Lisans Tezi, Adana
- Ghazavi, M., Hadiani, N., 2005. Bearing capacity of multi-edge foundations, m.s. thesis. Department of Civil Engineering, K.N.T. University of Technology, Tehran, Iran.
- Ghazavi, M., Mokhtari, S., 2008. Numerical investigation of load-settlement characteristics of multi-edge shallow foundations. **The 12th International Conference of International Association for Computer Methods and Advances in Geomechanics (IACMAG)**, Goa, India.
- Kanıt, R., 2003. **Temel inşaatı**. Gazi Kitabevi Tic. Ltd. Şti., Ankara, 102-105.
- Keskin, S., 2004. Zeminlerde oluşan ilave düşey gerilmelerin değişik yöntemlerle irdelenmesi. Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yüksek Lisans Tezi, Adana
- Keskin, S., Laman M., Uğur, S. ve Bildik S., 2012. Kuma oturan yüzeysel temellerde temel boyutunun taşıma kapasitesine etkisi. **Çukurova Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi**, 27(2), 37-45.
- Kurian, N.P., 2006. **Shell foundations: geometry, analysis, design and construction**. Alpha Science Intl Ltd.
- Lutenegger, A., Adams, M.T., 1998, Bearing capacity of footings on compacted sand. **Fourth Intentational Conference on Case Histories in Geotechnical Engineering**, St. Louis, Missouri
- Örnek M., 2009. Yumuşak kil zeminlerin geogrid donatı ile güçlendirilmesi. Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Doktora Tezi, Adana.
- Özaydın, K., 1989. **Zemin mekaniği**. MEYA Matbaacılık ve Yayıncılık, İstanbul, 395s.
- Özüdoğru, K., Tan, O., Aksoy, İ.H., 1996. **Çözümlü problemlerle zemin mekaniği**. Birsen Yayınevi, İstanbul, 160s.

- Prakash, S., Saran S., 1971. Bearing capacity of eccentrically loaded footings. **Journal Soil Mechanics and Foundations Division**, American Society of Civil Engineers Vol.7814, No. SM-1 pp. 95-188.
- Tani, K., Craig, W.H., 1995. Bearing capacity of circular foundations on soft clay of strength increasing with depth. **Soils and Foundations**, 35(4), 21–35.
- Uncuoğlu, E., 2009. Kohezyonsuz zeminlerdeki kazıkların yatay yük ve moment etkisi altındaki davranışlarının analizi., Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, Adana.
- Uzuner, B.A., 1998. **Çözümlü problemlerle temel zemin mekaniği**. Teknik Yayınevi, Ankara, 376s.
- Watson, P.G., Randolph, M.F., 1997. Vertical capacity of caisson foundations in calcareous sediments. **7th International Offshore and Polar Engineering Conference**, ISOPE-97, Honolulu, Hawaii, USA, International Society of Offshore and Polar Engineers, 2, 784-790.
- Yıldız, A., 2002. Donatılı zeminler üzerine oturan yüzeysel temellerin analizi. Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Doktora Tezi, Adana.

ÖZGEÇMİŞ

Yazar, 1991 yılında Karaman'ın Ayrancı ilçesinde doğdu. İlk, orta ve lise eğitimini Ayrancı'da tamamladı. 2008 yılında Çukurova Üniversitesi Mimarlık Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümünü kazandı ve 2012 yılında İnşaat Mühendisi olarak mezun oldu. Aynı yıl, Mustafa Kemal Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı'nda yüksek lisansa başladı.