

**T.C.
PAMUKKALE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**TEKİL KAZIKLARIN SONLU ELEMANLAR İLE ANALİZİ
VE ANALİTİK YÖNTEMLERLE KARŞILAŞTIRILMASI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

CELAL ÜNAL

DENİZLİ, MAYIS - 2019

T.C.
PAMUKKALE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI



TEKİL KAZIKLARIN SONLU ELEMANLAR İLE ANALİZİ
VE ANALİTİK YÖNTEMLERLE KARŞILAŞTIRILMASI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

CELAL ÜNAL

DENİZLİ, MAYIS - 2019

KABUL VE ONAY SAYFASI

CELAL ÜNAL tarafından hazırlanan “TEKİL KAZIKLARIN SONLU ELEMANLAR İLE ANALİZİ VE ANALİTİK YÖNTEMLERLE KARŞILAŞTIRILMASI” adlı tez çalışmasının savunma sınavı 29.05.2019 tarihinde yapılmış olup aşağıda verilen jüri tarafından oy birliği / oy çokluğu ile Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı Yüksek Lisans Tezi olarak kabul edilmiştir.

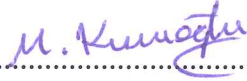
Jüri Üyeleri

İmza

Danışman
Doç. Dr. Devrim ALKAYA



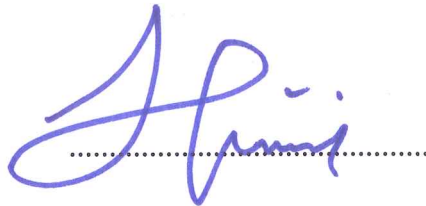
Üye
Dr. Öğr. Üyesi Mehmet KURUOĞLU



Üye
Dr. Öğr. Üyesi Engin NACAROĞLU



Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun 19/06/2019 tarih ve ...25/19... sayılı kararıyla onaylanmıştır.



Prof. Dr. Uğur YÜCEL

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

Bu tezin tasarımı, hazırlanması, yürütülmesi, araştırmalarının yapılması ve bulgularının analizlerinde bilimsel etiğe ve akademik kurallara özenle riayet edildiğini; bu çalışmanın doğrudan birincil ürünü olmayan bulguların, verilerin ve materyallerin bilimsel etiğe uygun olarak kaynak gösterildiğini ve alıntı yapılan çalışmalara atfedildiğine beyan ederim.

CELAL ÜNAL



ÖZET

TEKİL KAZIKLARIN SONLU ELEMANLAR İLE ANALİZİ VE ANALİTİK YÖNTEMLERLE KARŞILAŞTIRILMASI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

CELAL ÜNAL

PAMUKKALE ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

(TEZ DANIŞMANI:DOÇ.DR. DEVRİM ALKAYA)

DENİZLİ, MAYIS - 2019

Bilim ve teknolojiye yaşanan gelişmeler ile birlikte mühendislik teknolojisi de her geçen gün gelişmekte, özellikle sayısal modelleme konusunda bizlere büyük faydalar sağlamaktadır. Şüphesiz “Sonlu Elemanlar Yöntemi” bunların başında gelmektedir. Öte yandan özellikle büyük kentlerde nüfus yoğunluğunda yaşanan hızlı artışla beraber gelen ihtiyaçları karşılamak için yüksek yapılar, köprü ve viyadükler, çeşitli su ve kıyı yapıları vb. gibi birçok alan da inşaat faaliyetleri yürütülmektedir. Bu tarz yapılarda, üst yapıdan zemine çok büyük mertebede yükler aktarılmakta, zeminin bu yükleri güvenli bir biçimde taşıyabilmesi gerekmektedir. Yüzeye yakın bölgelerin taşıma kapasitesi ve oturmalar yönünden elverişsiz olması oluşan yükleri derinlerde ki sağlam tabakaya aktarmak için kazık uygulamasını zaruri kılmaktadır.

Bu çalışmada kazık çeşitleri ve kullanım alanlarına değinilmiş, farklı yükleme şekilleri altındaki tekil bir kazığın ve kazık grubunun taşıma gücü hesabı, meydana gelen oturmalar, kazık zemin ilişkisi, geliştirilen bir kazık programı ile analiz edilmiş, elde edilen veriler sonlu elemanlar analiz yöntemleriyle kıyaslanmış ve sonuçları irdelenmiştir.

ANAHTAR KELİMELEER:Tekil kazık, Taşıma Gücü, Plaxis, Sonlu Elemanlar

ABSTRACT

ANALYSIS OF SINGLE PILES WITH FINITE ELEMENTS METHOD AND COMPARISON WITH ANALYTICAL METHODS

MSC THESIS

CELAL ÜNAL

**PAMUKKALE UNIVERSITY INSTITUTE OF SCIENCE
CIVIL ENGINEERING**

(SUPERVISOR:DEVİRİM ALKAYA, PH.D.)

DENİZLİ, MAY 2019

With the development in science and technology, engineering technology is also developing day by day, and it gives us great benefits especially in numerical modeling. For instance, "Finite Element Method" is one of these. Construction activities are being carried out in many areas such as high buildings, bridges and viaducts, coastal structures etc. to meet the needs that are experienced with the rapid increase in population density, especially in big cities. In such structures, loads are transferred from the superstructure to the soil. The soil must be able to carry these loads safely. The bearing capacity of the area close to the surface and the unfavorable direction of the settlements make the pile application necessary to transfer the loads to the deep layers. In this study pile types and usage areas were mentioned. The load strength calculation of a single pile and pile group under different loading shapes and the pile ground relationship was analyzed with a developed pile program. The data were compared with the finite element analysis methods and their results were evaluated.

KEYWORDS: Single Pile, Bearing Capacity, Plaxis, Finite Elements Method |

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET.....	i
ABSTRACT	ii
İÇİNDEKİLER	iii
ŞEKİL LİSTESİ.....	vi
TABLO LİSTESİ	x
SEMBOL LİSTESİ	xii
ÖNSÖZ.....	xiv
1. GİRİŞ.....	1
2. KAZIK ÇEŞİTLERİ VE YAPIM TEKNİKLERİ.....	2
2.1 Kazık Çeşitleri	4
2.1.1 Ahşap Kazıklar	5
2.1.2 Betonarme Kazıklar	6
2.1.3 Çelik Kazıklar	8
2.1.4 Kompozit (Karmaşık) Kazıklar	9
2.2 Kazık Seçiminde Etkili Faktörler	9
3. KAZIKLARDA TAŞIMA GÜCÜ.....	10
3.1 Genel	10
3.2 Kohezyonsuz Zeminlerde Kazık Taşıma Gücü Hesabı.....	14
3.2.1 Çevre Sürtünmesi.....	14
3.2.1.1 Beta (β) Metodu	15
3.2.2 Uç Direnci.....	17
3.3 Kohezyonlu Zeminlerde Kazık Taşıma Gücü Hesabı	18
3.3.1 Çevre Sürtünmesi.....	18
3.3.1.1 Alfa (α) Yöntemi	18
3.3.1.2 Lamda (λ) Yöntemi	20
3.3.2 Uç Direnci.....	22
3.4 Taşıma Gücünün SPT ve CPT Verileri İle Hesaplanması	22
3.5 Kazık Yükleme Deneyleri	24
3.6 Kazıklarda Oturma Hesabı	25
3.7 Negatif Çevre Sürtünmesi	27
4. YANAL YÜK ETKİSİNDEKİ KAZIKLAR	29
4.1 Genel	29
4.2 Yanal Kazık Tasarımında Yatak Katsayısı ve Zemin Yayıları	29
4.2.1 Sabit Yatak Katsayısına Göre Tasarım.....	35
4.2.2 Doğrusal Olarak Artan Yatak Katsayısına Göre Tasarım	36
4.3 Broms Yöntemi	36
4.3.1 Kohezyonlu Zeminlerin İncelenmesi.....	36
4.3.1.1 Yer değiştirmeler.....	37
4.3.1.2 Kazık Yanal Direnci.....	38
4.3.2 Kohezyonsuz Zeminlerin İncelenmesi.....	45
4.3.2.1 Yer değiştirmeler.....	45

4.3.2.2	Kazık Yanal Direnci.....	46
5.	KAZIKLARDA GRUP ETKİSİ	53
5.1	Converse-Labarre Formülü	53
5.2	Terzaghi Blok Yaklaşımı.....	55
5.3	Tomlinson Yaklaşımı	57
5.4	Kazık Grubunda Konsolidasyon Oturması.....	58
5.5	Basit Oturma Hesabı Yöntemi	59
6.	KAZIK ANALİZİNDE RİJİTLİK MATRİSİ.....	61
6.1	Genel	61
6.2	Rijitlik Kavramı.....	62
6.3	Düzlem Çerçeve Sistemler	64
6.3.1	Düzlem Çerçeve Bir Elemanın Eleman Eksen Takımı Rijitlik Matrisi	65
6.3.1	Düzlem Çerçeve Bir Elemanın Genel Eksen Takımı Rijitlik Matrisi	68
7.	ANALİZLERDE KULLANILAN PROGRAMLAR.....	77
7.1	Plaxis 2D Sonlu Elemanlar Programı.....	77
7.1.1	Genel Özellikler	77
7.1.1.1	Noktalar.....	78
7.1.1.2	Çizgiler.....	78
7.1.1.3	Hücreler.....	78
7.1.1.4	Elemanlar	78
7.1.1.5	Düğüm Noktaları.....	78
7.1.1.6	Gerilme Noktaları.....	79
7.1.2	Programın Tanıtılması	79
7.1.2.1	Programı başlatma.....	80
7.1.2.2	Geometri Modelinin Oluşturulması	82
7.1.2.2.1	Geometri Çizgisi	84
7.1.2.2.2	Kirişler	85
7.1.2.2.3	Kiriş Mafsalları	85
7.1.2.2.4	Geotekstiller.....	85
7.1.2.2.5	Ara Yüzeyler.....	85
7.1.2.2.6	Sabitlemeler	86
7.1.2.2.7	Kuvvetler	86
7.1.2.2.8	Malzemenin Tanımlanması.....	86
7.2	Kazık Analiz Programı	96
7.2.1	Genel Bilgiler.....	97
7.2.2	Programın Tanıtılması	97
8.	MODELLEME VE ANALİZ.....	104
8.1	Kohezyonlu Zeminde Teşkil Edilen Tekil Kazığın Yatay ve Düşey	
Yükler Altında Analizi (YASS: -30m).....	104	
8.1.1	Plaxis İle Analiz.....	104
8.1.2	Kazık Programı İle Analiz	112
8.2	Kohezyonlu Zeminde Teşkil Edilen Tekil Kazığın Yatay ve Düşey	
Yükler Altında Analizi (YASS:-10m).....	118	
8.2.1	Plaxis İle Analiz.....	118
8.2.2	Kazık Programı İle Analiz	126
8.3	Kohezyonsuz Zeminde Teşkil Edilen Tekil Kazığın Yatay ve Düşey	
Yükler Altında Analizi (YASS:-30m).....	132	
8.3.1	Plaxis İle Analiz.....	132

8.3.2	Kazık Programı İle Analiz	140
8.4	Kohezyonsuz Zeminde Teşkil Edilen Tekil Kazığın Yatay ve Düşey Yükler Altında Analizi (YASS:-10m).....	147
8.4.1	Plaxis İle Analiz.....	147
8.4.2	Kazık Programı İle Analiz	155
8.5	Kohezyonlu Zeminde Teşkil Edilen Tekil Kazığın Yatay ve Düşey Yük Etkisi Altında Analizi (YASS= 0.00m).....	161
8.5.1	Plaxis İle Analiz.....	161
8.5.1	Kazık Programı İle Analiz	164
8.6	Kohezyonsuz Zeminde Teşkil Edilen Tekil Kazığın Yatay ve Düşey Yük Etkisi Altında Analizi (YASS= 0.00m).....	166
8.6.1	Plaxis İle Analiz.....	166
8.6.2	Kazık Programı İle Analiz	168
8.7	Kazık Grubu Analizi	171
8.7.1.1	Plaxis İle Analiz	173
8.7.1.2	Kazık Programı İle Analiz	177
8.8	Analiz Sonuçlarının Karşılaştırılması.....	179
9.	SONUÇ VE ÖNERİLER	182
10.	KAYNAKLAR.....	184
11.	ÖZGEÇMİŞ.....	188

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1: Örnek kazık uygulamaları.....	2
Şekil 2.2: Kullanım amaçlarına göre kazık çeşitleri (a,b) uç kazığı, (c,d) sürtünme kazığı, (e) çekme kazığı, (f) dolfen kazığı (g) sıkıştırma kazığı	5
Şekil 3.1: Kazık taşıma gücü bileşenleri	11
Şekil 3.2: Efektif gerilme prensibine göre çevre sürtünmesi hesabı.....	15
Şekil 3.3: Fore kazıklarda kullanılmak üzere β ve \emptyset ilişkisi (Poulos ve Davis-1980).....	17
Şekil 3.4: Normal yüklenmiş killerde adhezyon faktörü α , (Kumbasar ve Kip, 1999).....	19
Şekil 3.5: Delgili şaftların çevre sürtünmesi hesaplamaları için α faktörü (Kulhawy ve Jackson, 1989)	19
Şekil 3.6: Adezyon faktörü için önerilen tasarım eğrileri (Tomlinson, 1994)..	20
Şekil 3.7: λ Sürtünme Katsayısı (Vijayvergiya ve Focht, 1972).....	21
Şekil 3.8: Kazık yükleme deney örneği	24
Şekil 3.9: Kazık gövdesi boyunca oluşan farklı birim sürtünme mukavemetleri	26
Şekil 4.1: Yatay yüklenmiş kazık boyunca; (a) yatay deplasmanlar, (b) dönme miktarı, (c) moment değeri, (d) kesme kuvveti ve (e) zemin reaksiyonu (Reese and Wang, 1993).....	31
Şekil 4.2: Yük-Deformasyon analizi için alternatif model	33
Şekil 4.3: İdealize edilmiş zemin sertlik profilleri	34
Şekil 4.4: Killi zeminlerde kazığın yanal yer değiştirmesi (Broms, 1964 a)	37
Şekil 4.5: Kısa kazıkların yanal direnci - Kohezyonlu zemin (Broms, 1964a)	39
Şekil 4.6: Uzun kazıkların yanal direnci - Kohezyonlu Zemin (Broms, 1964a)	40
Şekil 4.7: Rijit başlıklı kısa kazıkların yanal direnci - Kohezyonlu zemin (Broms, 1964a).....	41
Şekil 4.8: Rijit Başlıklı Orta Boy Kazıkların Yanal Direnci - Kohezyonlu zeminler (Broms, 1964a).....	42
Şekil 4.9: Rijit başlıklı kazıkların yanal direnci - Kohezyonlu zemin (Broms, 1964a).....	43
Şekil 4.10: Kısa kazıkların nihai yanal yükünün bulunması - Kohezyonlu zeminler (Broms, 1964a).....	44
Şekil 4.11: Uzun kazıkların nihai yükünün bulunması - Kohezyonlu zeminler (Broms,1964a).....	44
Şekil 4.12: Kohezyonsuz zeminlerde kazığın yanal yer değiştirmesi (Broms, 1964a).....	46
Şekil 4.13: Kısa kazıkların yanal direnci - Kohezyonsuz zeminler (Broms, 1964b)	48
Şekil 4.14: Uzun kazıkların yanal direnci - Kohezyonsuz zeminler (Broms, 1964b)	49
Şekil 4.15: Kısa kazıkların nihai yanal yüklerinin bulunması - Kohezyonsuz zeminler (Broms,1964b).....	49
Şekil 4.16: Uzun kazıkların nihai yanal yüklerinin bulunması - Kohezyonsuz zeminler (Broms,1964b).....	50
Şekil 4.17: Rijit başlıklı kazıkların yanal direnci - Kohezyonsuz zeminler (Broms, 1964b).....	51

Şekil 4.18: Rijit başlıklı kazıkların yanal direnci - Kohezyonsuz zeminler (Broms, 1964b).....	52
Şekil 4.19: Rijit başlıklı uzun kazıkların yanal direnci - Kohezyonsuz zeminler (Broms, 1964b).....	52
Şekil 5.1: Kazık gruplarında yenilme tipleri: a) münferit yenilmeler, b) blok yenilmeler.....	55
Şekil 5.2: Kazıklardaki grup etkisi (Terzaghi ve Peck,1967)	56
Şekil 5.3: Kazık grubunda oluşan oturma (Terzaghi ve Peck,1967).....	59
Şekil 5.4: Eşdeğer radye metodu (Tomlinson, 2001).....	60
Şekil 5.4: Zeminde oluşacak jeolojik yük ve gerilme artışı dağılımı (Tomlinson, 2001).....	60
Şekil 6.1: Sonlu eleman ve düğüm noktaları	61
Şekil 6.2: Elastik yaya ait kuvvet-yer değiştirme ilişkisi.....	62
Şekil 6.3: Bir yay elemanın rijitlik matrisi elemanlarının elde edilmesi.....	64
Şekil 6.4: Düzlem çerçeve bir elemanın çubuk uç yer değiştirme ve kuvvetleri.....	65
Şekil 6.5: Düzlem çerçeve elemana ait eleman ve genel eksen takımı	69
Şekil 6.6: Düzlem çerçeve elemana ait eleman ve genel eksen takımı	70
Şekil 6.7: Düzlem çerçeve elemana ait eleman ve genel eksen takımı	72
Şekil 6.8: Kiriş elemana ait düğüm noktaları ve serbestlik derecelerinin gösterilmesi	76
Şekil 7.1: Düğüm noktaları	79
Şekil 7.2: Gerilme noktaları	79
Şekil 7.3: Genel Özellikler (model ve eleman tipinin seçimi)	81
Şekil 7.4: Genel Ayarlar (birimlerin ve çizim alanı ölçülerinin seçimi).....	81
Şekil 7.5: Ana pencere	83
Şekil 7.6: Araç çubukları.....	84
Şekil 7.7: Araç çubukları.....	84
Şekil 7.8: Malzeme tanımlama menüsü	88
Şekil 7.9: Genel malzeme özellikleri menüsü.....	88
Şekil 7.10: Parametreleri tanımlama menüsü.....	89
Şekil 7.11: Ara yüzey girdileri	89
Şekil 7.12: Kiriş eleman özellikleri menüsü	90
Şekil 7.13: Model oluşturma menüsü.....	92
Şekil 7.14: Başlangıç koşulları araç çubuğu	92
Şekil 7.15: Yer altı su seviyesinin tanımlanması	94
Şekil 7.16: Aktif su basıncı	94
Şekil 7.17: Efektif gerilme	95
Şekil 7.18: Sistem fazları tanımlama ekranı	95
Şekil 7.19: Plaxis 2D sonlu elemanlar ağı	96
Şekil 7.20: Kazık analiz programı arayüzü	97
Şekil 7.21: Kazık analiz programı zemin yayları tayini.....	98
Şekil 7.22: Kazık analiz programı eksenel yük, moment ve kesme diyagramları.....	99
Şekil 7.23: Kazık analiz programı yanal kazık kapasitesi.....	99
Şekil 7.24: Kazık analiz programı eksenel kazık kapasitesi	100
Şekil 7.25: Kazık analiz programı kazık grubu hesaplamaları	101
Şekil 7.26: Kazık analiz programı kazık oturma hesaplamaları	101
Şekil 7.27: Kazık kesiti betonarme hesaplamaları	102
Şekil 7.28: Kazık programı donatı tasarımı ve metraj hesaplamaları	103
Şekil 8.1: Plaxis 2D sistem modeli	106
Şekil 8.2: Plaxis 2D sistem mesh ağı	107

Şekil 8.3: Plaxis 2D sistemin deforme olmuş hali ve deforme mesh ağı.....	107
Şekil 8.4: Plaxis 2D toplam gerilme	108
Şekil 8.5: Plaxis 2D ortalama gerilme.....	108
Şekil 8.6: Plaxis 2D düşey deplasman miktarı.....	109
Şekil 8.7: Plaxis 2D yatay deplasman miktarı	109
Şekil 8.8: Plaxis 2D kazığa ait eksenel kuvvet diyagramı	110
Şekil 8.9: Plaxis 2D kazığa ait kesme kuvveti diyagramı.....	110
Şekil 8.10: Plaxis 2D kazığa ait moment diyagramı	111
Şekil 8.11: Kazık analiz programı yük, zemin ve kazık parametrelerinin tayini	113
8.12: Kazık analiz programı zemin yaylarının tanımlanması	113
8.13: Kazık analiz programı kuvvet diyagramlarının elde edilmesi	114
8.14: Kazık analiz programı deplasmanların elde edilmesi	114
8.15: Kazık analiz programı yanal kazık kapasitesinin elde edilmesi	115
8.16: Kazık analiz programı eksenel kazık kapasitesinin elde edilmesi	115
8.17: Kazık analiz programı betonarme kesit tasarım hesaplamaları	116
8.18: Kazık analiz programı donatı ve metraj hesaplamaları.....	116
8.19: Kazık analiz programı oturma hesaplamaları	117
Şekil 8.20: Plaxis 2D sistem modeli	119
Şekil 8.21: Plaxis 2D sistem mesh ağı	120
Şekil 8.22: Plaxis 2D sistemin deforme olmuş hali ve deforme mesh ağı.....	121
Şekil 8.23: Plaxis 2D aktif gözenek basıncı.....	121
Şekil 8.24: Plaxis 2D ortalama gerilme.....	122
Şekil 8.25: Plaxis 2D düşey deplasman miktarı.....	122
Şekil 8.26: Plaxis 2D yatay deplasman miktarı	123
Şekil 8.27: Plaxis 2D kazığa ait eksenel kuvvet diyagramı	123
Şekil 8.28: Plaxis 2D kazığa ait kesme kuvveti diyagramı	124
Şekil 8.29: Plaxis 2D kazığa ait moment diyagramı	124
Şekil 8.30: Kazık analiz programı yük, zemin ve kazık parametrelerinin tayini	127
8.31: Kazık analiz programı zemin yaylarının tanımlanması	127
8.32: Kazık analiz programı kuvvet diyagramlarının elde edilmesi	128
8.33: Kazık analiz programı deplasmanların elde edilmesi	128
8.34: Kazık analiz programı yanal kazık kapasitesinin elde edilmesi	129
8.35: Kazık analiz programı eksenel kazık kapasitesinin elde edilmesi	129
8.36: Kazık analiz programı betonarme kesit tasarım hesaplamaları	130
8.37: Kazık analiz programı donatı ve metraj hesaplamaları.....	130
8.38: Kazık analiz programı oturma hesaplamaları	131
Şekil 8.39: Plaxis 2D sistem modeli	133
Şekil 8.40: Plaxis 2D sistem mesh ağı	134
Şekil 8.41: Plaxis 2D sistemin deforme olmuş hali ve deforme mesh ağı.....	135
Şekil 8.42: Plaxis 2D toplam gerilme miktarı.....	136
Şekil 8.43: Plaxis 2D ortalama gerilme.....	136
Şekil 8.44: Plaxis 2D düşey deplasman miktarı.....	137
Şekil 8.45: Plaxis 2D yatay deplasman miktarı	137
Şekil 8.46: Plaxis 2D kazığa ait eksenel kuvvet diyagramı	138
Şekil 8.47: Plaxis 2D kazığa ait kesme kuvveti diyagramı.....	138
Şekil 8.48: Plaxis 2D kazığa ait moment diyagramı	139
Şekil 8.49: Kazık analiz programı yük, zemin ve kazık parametrelerinin tayini	142
8.50: Kazık analiz programı zemin yaylarının tanımlanması	142
8.51: Kazık analiz programı kuvvet diyagramlarının elde edilmesi	143
8.52: Kazık analiz programı deplasmanların elde edilmesi	143

8.53: Kazık analiz programı yanal kazık kapasitesinin elde edilmesi	144
8.54: Kazık analiz programı eksenel kazık kapasitesinin elde edilmesi	144
8.55: Kazık analiz programı betonarme kesit tasarım hesaplamaları	145
8.56: Kazık analiz programı donatı ve metraj hesaplamaları.....	145
8.57: Kazık analiz programı oturma hesaplamaları	146
Şekil 8.58: Plaxis 2D sistem modeli	148
Şekil 8.59: Plaxis 2D sistem mesh ağı	149
Şekil 8.60: Plaxis 2D sistemin deforme olmuş hali ve deforme mesh ağı.....	150
Şekil 8.61: Plaxis 2D toplam gerilme miktarı.....	151
Şekil 8.62: Plaxis 2D ortalama gerilme.....	151
Şekil 8.63: Plaxis 2D düşey deplasman miktarı.....	152
Şekil 8.64: Plaxis 2D yatay deplasman miktarı	152
Şekil 8.65: Plaxis 2D kazığa ait eksenel kuvvet diyagramı	153
Şekil 8.66: Plaxis 2D kazığa ait kesme kuvveti diyagramı	153
Şekil 8.67: Plaxis 2D kazığa ait moment diyagramı	154
Şekil 8.68: Plaxis 2D aktif gözenek basıncı.....	154
Şekil 8.69: Kazık analiz programı yük, zemin ve kazık parametrelerinin tayini	157
8.70: Kazık analiz programı zemin yaylarının tanımlanması	157
8.71: Kazık analiz programı kuvvet diyagramlarının elde edilmesi	158
8.72: Kazık analiz programı deplasmanların elde edilmesi	158
8.73: Kazık analiz programı yanal kazık kapasitesinin elde edilmesi	159
8.74: Kazık analiz programı eksenel kazık kapasitesinin elde edilmesi	159
8.75: Kazık analiz programı betonarme kesit tasarım hesaplamaları	160
8.76: Kazık analiz programı donatı ve metraj hesaplamaları.....	160
8.77: Kazık analiz programı oturma hesaplamaları	161
Şekil 8.78: Plaxis ile elde edilen kuvvet diyagramları.....	163
Şekil 8.79: Kazık programı ile elde edilen kuvvet diyagramları	165
8.80: Kazık programı ile elde edilen eğilme diyagramları.....	165
Şekil 8.81: Plaxis ile elde edilen kuvvet diyagramları.....	167
Şekil 8.82: Kazık programı ile elde edilen kuvvet diyagramları	169
8.83: Kazık programı ile elde edilen eğilme diyagramları.....	170
Şekil 8.84: Kazık programı yanal kazık taşıma kapasitesi ve deplasman miktarları	172
.....	
Şekil 8.85: Kazık grubuna ait sistem modeli	173
Şekil 8.86: Plaxis 2D kazık grubuna ait deforme mesh ağı	174
Şekil 8.87: Plaxis 2D toplam gerilme miktarı.....	174
Şekil 8.88: Plaxis 2D efektif gerilme miktarı.....	175
Şekil 8.89: Plaxis 2D ortalama gerilme miktarı ve dağılımı.....	175
Şekil 8.90: Plaxis 2D kazık grubunda meydana gelen maksimum deformasyon	176
Şekil 8.91: Plaxis 2D kazık grubundaki bir kazıkta oluşan maksimum eksenel	176
kuvvet ve diyagramı	
Şekil 8.92: Kazık analiz programı yük, zemin ve kazık parametrelerinin tayini	177
Şekil 8.93: Kazık analiz programı grup taşıma gücü hesaplamaları.....	178
Şekil 8.94: Kazık analiz programı oturma hesaplamaları	178
Şekil 8.95: Maksimum moment değerlerinin karşılaştırılması	179
Şekil 8.96: Maksimum kesme kuvveti değerlerinin karşılaştırılması	179
Şekil 8.97: Maksimum kesme kuvveti değerlerinin karşılaştırılması	180
Şekil 8.98: Yatay deplasman değerlerinin karşılaştırılması.....	180
Şekil 8.99: Düşey deplasman değerlerinin karşılaştırılması	181

TABLO LİSTESİ

Sayfa

Tablo 3.1: Terzaghi N_c , N_q , N_γ taşıma gücü faktörleri (Terzaghi, 1943).....	13
Tablo 3.2: Farklı kazık yüzeyi şartlarına bağlı sürtünme açısı (Kulhawy 1984)15	
Tablo 3.3: SPT Darbe Vuruş Sayısı (N) ve Rölatif Sıklık Değeri (D_f) İlişkisi 22	
Tablo 3.4: Killerde SPT Darbe Sayısı (N), Serbest Basınç Mukavemeti (q_u) ve Kıvam İlişkisi	23
Tablo 3.5: Tipik C_p değerleri.....	26
Tablo 3.6: Yükleme kriterleri (Birand 2007)	27
Tablo 4.1: Zemin cinsine göre tipik elastisite modülü değerleri.....	32
Tablo 4.2: Yanal yatak katsayısı değerleri (Davisson, 1970)	45
Tablo 8.1: Zemin parametreleri.....	104
Tablo 8.2: Kazık parametreleri	105
Tablo 8.3: Plaxis analiz sonuçları	111
Tablo 8.4: Zemin parametreleri.....	112
Tablo 8.5: Kazık parametreleri	112
Tablo 8.6: Kazık analiz programı ile elde edilen analiz sonuçları özeti	117
Tablo 8.7: Zemin parametreleri.....	118
Tablo 8.8: Kazık parametreleri	119
Tablo 8.9: Plaxis analiz sonuçları	125
Tablo 8.10: Zemin parametreleri.....	126
Tablo 8.11: Kazık parametreleri	126
Tablo 8.12: Kazık analiz programı ile elde edilen analiz sonuçları özeti	131
Tablo 8.13: Zemin parametreleri.....	132
Tablo 8.14: Kazık parametreleri	133
Tablo 8.15: Plaxis analiz sonuçları	139
Tablo 8.16: Zemin parametreleri.....	140
Tablo 8.17: Kazık parametreleri	141
Tablo 8.18: Kazık analiz programı ile elde edilen analiz sonuçları özeti	146
Tablo 8.19: Zemin parametreleri.....	147
Tablo 8.20: Kazık parametreleri	148
Tablo 8.21: Plaxis analiz sonuçları	155
Tablo 8.22: Zemin parametreleri.....	155
Tablo 8.23: Kazık parametreleri	156
Tablo 8.24: Kazık analiz programı ile elde edilen analiz sonuçları özeti	161
Tablo 8.25: Zemin parametreleri.....	162
Tablo 8.26: Kazık parametreleri	162
Tablo 8.27: Plaxis analiz sonuçları tablosu.....	163
Tablo 8.28: Zemin parametreleri.....	164
Tablo 8.29: Kazık parametreleri	164
Tablo 8.30: Kazık programı analiz sonuçları tablosu	166
Tablo 8.31: Zemin parametreleri.....	166
Tablo 8.32: Kazık parametreleri	167
Tablo 8.33: Plaxis analiz sonuçları tablosu.....	168

Tablo 8.34: Zemin parametreleri.....	168
Tablo 8.35: Kazık parametreleri	169
Tablo 8.36: Kazık programı analiz sonuçları tablosu	170
Tablo 8.37: Kazık grubu hesaplamalarında kullanılan kazık parametreleri ...	171
Tablo 8.38: Kazık grubu hesaplamalarında kullanılan radye plak parametreleri	171
Tablo 8.39: Kazık grubu hesaplamalarında kullanılan zemin parametreleri ..	172
Tablo 8.40: Plaxis analiz sonuçları	177
Tablo 8.41: Kazık programı analiz sonuçları	178
Tablo 8.42: Analizlerde elde edilen veriler özet tablosu.....	181

SEMBOL LİSTESİ

Q_F	:	Kazık nihai taşıma gücü, (kN)
Q_B	:	Kazık uç direnci, (kN)
Q_S	:	Kazık toplam çevre sürtünmesi, (kN)
q_b	:	Kazık ucu birim taşıma gücü, (kN/m ²)
f_s	:	Kazık çevre alanına etki eden birim sürtünme, (kN/m ²)
A_b	:	Kazık uç kesit alanı, (m ²)
A_s	:	Kazık toplam çevre alanı, (m ²)
L	:	Kazık uzunluğu, (m)
D	:	Kazık çapı, (m)
N_c	:	Taşıma gücü faktörü
N_q	:	Taşıma gücü faktörü
N_v	:	Taşıma gücü faktörü
c	:	Kohezyon, (kN/m ²)
φ	:	Zemin içsel sürtünme açısı, (°)
φ'	:	Zemin içsel sürtünme açısı, (°)
σ'_v	:	Düşey efektif zemin gerilmesi, (kN/m ²)
K_s	:	Yatay toprak basınç katsayısı
δ	:	Kazık-zemin arasındaki sürtünme açısı
γ	:	Zemin birim hacim ağırlığı, (kN/m ³)
α	:	Adhezyon katsayısı, (m)
s_u	:	Zeminin drenajsız kayma mukavemeti, (kN/m ²)
S_t	:	Kazıkta meydana gelen toplam oturma miktarı, (m)
S_p	:	Kazık ucunda meydana gelen oturma, (m)
S_{ps}	:	Kazık gövdesi boyunca taşıdığı yük ile meydana gelen oturma, (m)
S_s	:	Kazıkta meydana gelen elastik oturma, (m)
α_s	:	Kazık gövdesi boyunca oluşan çevre sürtünmesine bağlı katsayı
E_p	:	Kazık elastisite modülü, (kN/m ²)
C_p	:	Kazık oturma ampirik katsayısı
K_h	:	Yatay yatak katsayısı, (kN/m ³)
p	:	Kazığın herhangi bir noktasında oluşan gerilme, (kN/m ²)
y	:	Kazığın herhangi bir noktasında oluşan yer değiştirme, (m)
E_s	:	Zemin elastisite modülü, (kN/m ²)
v	:	Zemin poisson oranı
I_p	:	Kazık atalet momenti, (m ⁴)
G_o	:	Kayma gerilmesi modülü, (MPa)
e	:	Zemindeki boşluk oranı
L_e	:	Efektif kazık uzunluğu, (m)
L_c	:	Kritik kazık uzunluğu, (m)
T	:	Elastik kazık uzunluğu, (m)
Z_{max}	:	Kazık davranış tipi parametresi
P	:	Yanal yük, (kN)
P_n	:	Nahai yanal yük, (kN)
M	:	Moment, (kNm)
M_{maks}	:	Maksimum moment, (kNm)
M_{akma}	:	Akma momenti, (kNm)
y_o	:	Kazık başlığında meydana gelen yer değiştirme, (m)

θ	:	Kazık başlığında meydana gelen dönme miktarı, (°)
β	:	Kohezyonlu zeminlerde yer değiştirme katsayısı
f	:	Maksimum moment etkisi altında kalan kesit derinliği, (m)
η	:	Derinlik katsayısı
n_h	:	Belli bir derinlikte ki yanal yatak katsayısı, ((kN/m ³))
K_a	:	Aktif toprak basınç katsayısı
K_p	:	Pasif toprak basınç katsayısı
F	:	Pasif toprak direncine eşdeğer kuvvet, (kNm)
F	:	Elastik yaya etki eden dış kuvvet, (kN)
k	:	Elastik yay rijitliği
u	:	Elastik yay deplasmanı
$\{f\}$:	Eleman eksen takımı kuvvet vektörü
$[k]$:	Eleman eksen takımı rijitlik matrisi
$\{u\}$:	Eleman eksen takımı yer değiştirme vektörü
$\{F\}$:	Genel eksen takımı kuvvet vektörü
$[K]$:	Genel eksen takımı rijitlik matrisi
$\{U\}$:	Genel eksen takımı yer değiştirme vektörü
$[T]$:	Dönüşüm matrisi
u_{ix}	:	Elemanın i ucundaki yanal yer değiştirme
u_{iy}	:	Elemanın i ucundaki düşey yer değiştirme
u_{jx}	:	Elemanın j ucundaki yanal yer değiştirme
u_{jy}	:	Elemanın j ucundaki düşey yer değiştirme
f_{ix}	:	Elemanın i ucundaki yanal uç kuvvet
f_{iy}	:	Elemanın i ucundaki düşey uç kuvvet
f_{jx}	:	Elemanın j ucundaki yanal uç kuvvet
f_{jy}	:	Elemanın j ucundaki düşey uç kuvvet
m_{iz}	:	Elemanın i ucundaki uç moment
m_{jz}	:	Elemanın j ucundaki uç moment
θ_{iz}	:	Elemanın i ucundaki dönme
θ_{jz}	:	Elemanın j ucundaki dönme
γ_{sat}	:	Doygun birim hacim ağırlığı, (kN/m ³)
γ_{unsat}	:	Doygun birim hacim ağırlığı, (kN/m ³)
k_x, k_y	:	Doygun birim hacim ağırlığı, (kN/m ³)
W	:	Kazık birim ağırlığı, (kN)
γ_{beton}	:	Beton birim hacim ağırlığı, (kN/m ³)
U_{tot}	:	Toplam deplasman, (m)
U_y	:	Düşey deplasman, (m)
U_x	:	Yanal deplasman, (m)
dU_{tot}	:	Toplam görel deplasman, (m)
dU_y	:	Görel düşey deplasman, (m)
dU_x	:	Görel yanal deplasman, (m)
N_{max}	:	Maksimum eksenel kuvvet, (kN)
V_{max}	:	Maksimum kesme kuvveti, (kN)

ÖNSÖZ

Bu çalışmanın gerçekleştirilmesinde, bilgi ve tecrübeleri ile bana yol gösteren başta değerli hocam Doç. Dr. Devrim ALKAYA olmak üzere tüm hocalarıma ve tüm eğitim hayatım boyunca benden maddi ve manevi desteklerini esirgemeyen her zaman yanımda olan sevgili aileme ve tüm sevdiklerime teşekkürlerimi bir borç bilirim.

1. GİRİŞ

Kazıklar, temel çalışma prensibi ile açıklanacak olursa, yapıdan gelen yükleri daha derindeki zemin tabakalarına taşıtmak amacı ile kullanılan derin temel çeşitlerinden biridir. Zeminin yüzeye yakın bölgelerinin, üst yapıdan gelen servis yüklerini karşılayamayacağı durumlarda, bu bölgelerin geçilerek daha derindeki taşıyıcı tabakalara ulaşmak gerekmektedir. Kazık tasarımı yapılırken, göçmeye karşı güvenliğin ve meydana gelebilecek oturmaların izin verilebilir limitler içerisinde bulunduğunu göstermek gerekmektedir.

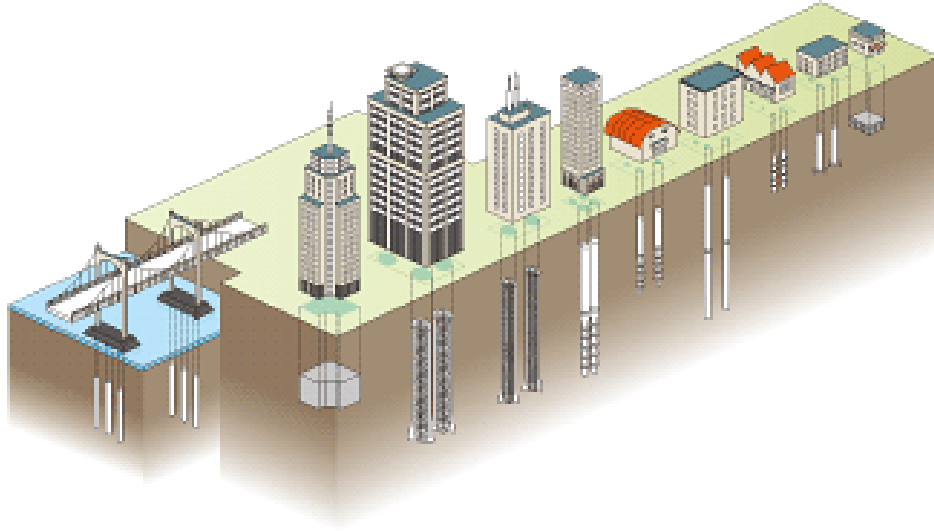
Bu tez çalışmasında, düşey ve yanal yük etkisi altında ki tekil bir kazığın ve kazık grubunun taşıma gücü ve buna bağlı olarak zeminde meydana gelecek oturmalarla birlikte kazık ve zemin davranışı irdelenmiş olup kohezyonlu ve kohezyonsuz zeminlerdeki durumları araştırılmıştır. Ayrıca farklı kazık ve zemin koşullarına ait parametreler kullanılarak analitik hesap yöntemlerine dayanan bir kazık analiz programı geliştirilmesi amaçlanmış, programda kazık zemin modelleri oluşturularak analizler yapılmış, elde edilen sonuçların Plaxis Finite Elements 2D ile yapılan analizler ile ne gibi farklılıklar gösterdiği irdelenmiştir.

Kazık temellerin projelendirilmesi ve uygulanması konusunda farklı zorluklar bulunmaktadır. Arazi profili ve zemin özellikleri hakkındaki bilgi yetersizliği, yapılacak işin maliyeti, uygulama ve kontrolü konusunda ki yetersizlikler, hava ve zemin koşulları ve buna benzer olumsuzluklar ile karşılaşılabilir. Ancak ne olursa olsun karşılaşılan bu olumsuzluklar aşılamaz cinsten değildir. Bu nedenle sorumluluk alan kişilerin bu alanda bilgi ve tecrübe sahibi olması, mühendislik ilkelerine uygun hareket etmesi hayati önem arz etmektedir. Öte yandan zemin mekaniğinde, arazi inceleme yöntemlerinde, işçilik kalitesinde ve bilişim teknolojilerinin mühendislik hizmetlerinde artan kullanımı ile yaşanan gelişmeler oldukça sevindiricidir.

2. KAZIK ÇEŞİTLERİ VE YAPIM TEKNİKLERİ

Yapı yükleri, zeminin taşıma gücü yetersizliğiyle birlikte, oturma koşullarının da yetersiz kaldığı durumlarda derin temel sistemi kullanılarak zemine aktarılmaktadır. Bu sayede zemin yüzeyindeki zayıf katmanlar geçilerek, daha derindeki taşıyıcı katmanlara ulaşılmakta ve bu sayede kullanılan yapı elemanları, kazık olarak adlandırılmaktadır. Temel sistemleri adını, kullanılan yapı elemanından almakta ve kazıklı temel olarak bilinmektedir. Şekil 2.1’de örnek kazık uygulamalarına ait görseller yer almaktadır.

Zemin yüzeyinden itibaren büyük derinliklere yerleştirilen derin temellerin tasarımı büyük oranda yüzeysel temellerin tasarımı ile aynı esaslara dayanmaktadır. Burada bahsi geçen konuyla alakalı önemli bir diğer husus ise sözü geçen uygulamanın yerin altında, gözle görülemeyen bir zemin ortamı içerisinde ve çoğunlukla yeraltı suyu içerisinde gerçekleştirilmesidir. Bu nedenle imalatların büyük bir özen içerisinde yapılması gerekmektedir. Bununla birlikte bu tarz temel sistemleri yüzeysel temel sistemlerine kıyasla oldukça maliyetlidir.



Şekil 2.1: Örnek kazık uygulamaları

Derin temel uygulamasına gitmeden önce mühendisliğin bir gereği olarak, sistemi derin temele ihtiyaç duyulmayacak Şekilde ozmek gerekmektedir. Buna karşın, farklı nedenlerden dolayı derin temel sistemine hala ihtiyaç duyuluyor ise derin temel sistemi tercih edilmelidir. Derin temel sistemlerine ihtiyaç duyulan bazı durumlar aşağıda sıralanmaktadır.

1. Yzeyeye yakın zemin katmanlarının servis yükleri için yeterli düzeyde taşıma glerinin olmaması veya sıkışabilme özellikleri sebebiyle yüklerin daha sağlam zemin katmanlarına aktarılma zorunluluğu oluŐabilir. Sağlam katmanların çok derinlerde olması durumunda yükün büyük kısmını kazık çevresinden karŐılanacak Şekilde hesaplama yapılabilir.
2. Yüksek merteye yatay ve eğilimli yük aktaran yapılardaki yanal yük etkilerinin karşılanması amacıyla kullanılabilir.
3. Su ile karŐılaŐtıđında kabarmalar veya ani göçmeler meydana gelebilecek zeminlerde, yapıdan gelecek yüklerin bu tür olumsuzlukların meydana

gelmediği, aktif zon olarak tanımlayabileceğimiz bölgenin dışında kalan alanlara aktarmak gerekebilir.

4. Çeşitli su yapıları, platformlar ve yeraltı suyu etkisindeki bölgelerde yapı temeli kaldırma kuvveti etkisine maruz kalabilir. Bu gibi durumlarda kazık uygulaması gerekebilir.
5. Erozyon nedeniyle temel altında oluşabilecek oyulmaları önlemek amacıyla kullanılabilir.
6. Statik sistemleri ve fonksiyonları bakımından farklılık teşkil eden farklı oturmalara karşı hassas yapılarda kullanılabilir.
7. Gevşek granüler zeminlerin sıkı hale getirilerek zeminin iyileştirilmesi amacıyla kullanılabilir.

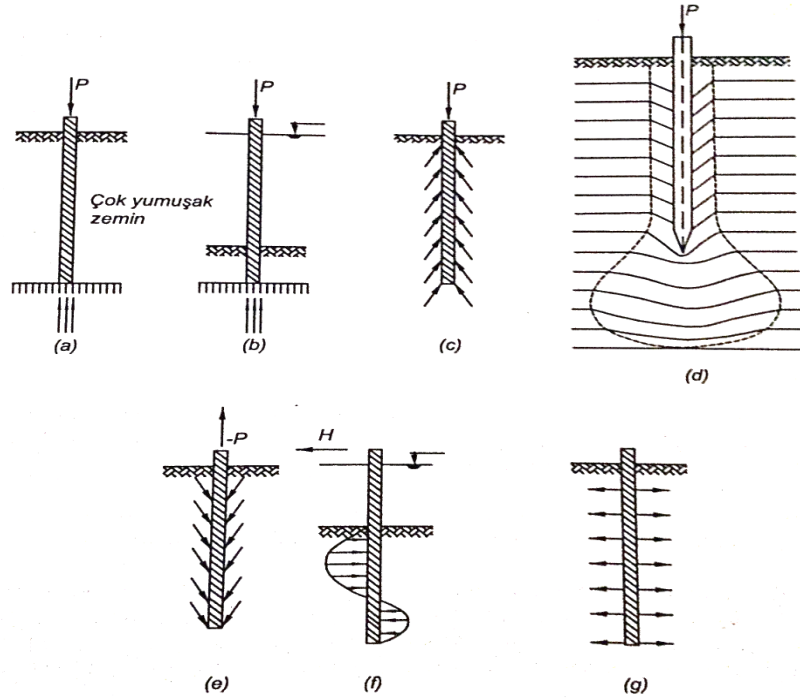
2.1 Kazık Çeşitleri

Şekil 2.2’de sınıflandırması yapılan kazık çeşitlerinin başlıca kullanım amaçları aşağıda maddeler halinde sıralanmıştır (Toğrol ve Tan 2009).

1. Yapı yüklerini sağlam tabakalara aktarmak için kullanılıyorsa bu tür kazıklar uç kazığı olarak isimlendirilmektedir. (Şekil 2.2 a,b)
2. Yapı yükleri, kazık çevresindeki zemin sürtünmesi ile kısmen veya tamamen karşılanabiliyorsa sürtünme kazığı adlandırılır. (Şekil 2.2 c,d)
3. Suyun kaldırma kuvvetine maruz yapıları veya üst yapıya gelen yanıl kuvvetler nedeniyle momente maruz temel sistemlerini güvenilir şekilde zemine tespit etmek için kullanılan kazıklar çekme kazığı olarak isimlendirilmektedir. (Şekil 2.2 e)
4. Yatay kuvvetlere karşı kazıklardan yararlanılmaktadır. Palplanş perdelerinin yanıl hareketini önlemek için kullanılan ankraj kazığı ile gemi

bağlama veya dolfen kazıkları yanal kuvvetlere karşı kullanılmaktadır. (Şekil 2.2 f)

5. Kazıklar, ayrık taneli zeminleri sıkıştırmak için de kullanılır. Bu kazıklara sıkıştırma kazığı veya kompaksiyon kazığı adı verilir. (Şekil 2.2 g)



Şekil 2.2: Kullanım amaçlarına göre kazık çeşitleri (a,b) uç kazığı, (c,d) sürtünme kazığı, (e) çekme kazığı, (f) dolfen kazığı (g) sıkıştırma kazığı

Kazıkları imal edildikleri malzemenin cinsine göre dört grupta ele alabiliriz.

2.1.1 Ahşap Kazıklar

Ahşap kazıklar hem kalıcı hem de geçici olarak kullanılabilen kazık türleridir. Sağladığı taşıma gücüne kıyasla hafif olmaları, taşınma kolaylığı, boyunun kolayca ayarlanabilmesi, ahşap kazıkların diğer kazıklara olan üstünlükleri arasında yer almaktadır.

Devamlı kullanılacak olan ahşap kazıkların artıp azalan su seviyesindeki değişim bölgelerinde meydana gelen çürüme ve mantar gelişimine karşı korunması ve önlem alınması gerekmektedir. Çürüme, su içerisine çakılmış kazıklarda, özel bir önlem alınmamış ise, kazığın alçak ve yüksek su seviyeleri arasındaki kısmında meydana gelmektedir. Sürekli olarak su seviyesinin altında kalmış ahşap kazıkların

birçoğunun uzun yıllar boyunca sağlam kaldıkları görülmüştür. Bu nedenle çürümeyi önlemek amacıyla ahşap kazığın liflerine nüfuz edecek şekilde basınçlı kreozot kullanılmaktadır.

Ahşap kazıkların çakımı sırasında aşırı zorlanmalar meydana gelebilmekte ve buna bağlı olarak kazıkta tahribat meydana gelebilmektedir. Bunun önüne geçebilmek için kazık ucuna çelik çarık takviyesi yapılabilir. Ahşap kazık tercihindeki bir diğer önemli faktör zemin koşullarının kazık çakılmasına uygun olup olmadığıdır.

2.1.2 Betonarme Kazıklar

Betonarme kazık tipi en çok tercih edilen kazık tipidir. Yer altı suyundan etkilenmemeleri ve istenilen boyutlarda yapılabildikleri için diğer kazık tiplerine göre önemli avantajları bulunmaktadır. Betonarme kazıkları, betonarme çakma kazıklar ve betonarme yerinde dökme kazıklar olmak üzere iki grupta incelemek mümkündür.

Betonarme çakma kazıklar; kazıkların dökümüne elverişli bir ortamda hazırlanıp kazık çakma işleminin yapılacağı bölgeye taşınabileceği gibi inşaat sahasının uygun olması durumunda şantiye ortamında da hazırlanabilir. Çakma kazık tipi, yüksek mertebedeki yükleri gevşek veya yumuşak zemin tabakaları altındaki sağlam tabakaya aktarmada son derecede kullanışlıdır. İmalatı genellikle kare, daire veya sekizgen kesitli olarak üretilmektedir. Kazık boyutları, imalat ve çakma olanaklarına göre değişkenlik göstermektedir. Kazık ağırlığını azaltmak için zaman zaman içi boş kesitler olarak üretilebilmektedir. Bu gibi durumlarda kazığın et kalınlığının göz ardı edilmemesi gerekir.

Betonarme çakma kazıkların kesit ve donatı hesabındaki diğer önemli bir kriter ise kazığın istifi ve taşınması sırasında maruz kalacağı gerilmelerdir. Kazığın kaldırma şekline bağlı olarak oluşacak bu gerilmeler, kaldırma sırasında meydana gelecek eğilme momentini karşılayabilmelidir.

Yerinde dökme betonarme kazıklar; kaplama borusu ile veya kaplama borusuz sondaj deliği içerisinde imal edilmektedir. Kapalı uçlu bir kaplama borusunun şahmerdan, hidrolik veya titreşimli çekiç kullanılarak zemine uygulanan kazık türleri

olarak bilinmektedir. Açık uçlu bir kaplama borusunun zemine sokularak veya kaplama borusunun içi temizlenerek zemine uygulanan kazıklara diğer bir isimle sondaj kazıkları veya fore kazık denilmektedir.

Yerinde dökme kazıkların pek çok çeşidi bulunmaktadır. Bunların arasından yapılacak seçimde, kazığın çakılacağı arazinin geoteknik özellikleri ve kullanılacak tip kazığın imal olanakları önemli rol oynamaktadır. Betonarme kazık donatısının, önceden hazırlanmış donatısı, beton döküm işlemi gerçekleştirilmeden önce kazık için açılan çukura yerleştirilir. Daha sonra beton döküm işlemi tremi borusu yardımı ile kazık çukurunun en altından başlanarak veya pompa yardımı ile gerçekleştirilir. Döküm sırasında beton içerisine karışabilecek yabancı maddelerin temizlenmesine ve kazık çukurunun beton ile tamamen doldurulmasına özen gösterilmelidir.

Yerinde dökme betonarme kazıkların bütününe etkileyen başlıca nedenler aşağıda sıralanmaktadır (Mazak 2016).

1) Betonun kalitesi yetersiz olmakla birlikte dökümü esnasında betonda segregasyon oluşmuş ve bu nedenle dayanımı düşmüştür.

2) Yapımı planlanan kazık kesiti sağlamamıştır. Beton döküm esnasında alana yabancı madde girmiş, kılıfın hızlı çekilmesi nedeniyle su hücumu gibi sebeplerle istenilen kazık kesiti her bir derinlikte farklı oluşmuştur..

3) Kazık ucu oturduğu zeminde örselenme oluşturmuştur. Kazık çukurunun açılması esnasında, kazık ucunun oturacağı zemin örselenmiş veya kazık döküntüleri ile dolmuştur. Kazık ucundaki örselenme, geniş bir bölgeyi kapsıyor olabilir.

4) Donatı kafesi yerinde olmayabilir.

Yerinde dökme çakma betonarme kazıklar ile sondaj kazıklarını birbirleriyle karşılaştıracak olursak birbirlerine karşı çeşitli avantaj ve dezavantajları bulunmaktadır. Sondaj kazığının yapım aşamasında çevresinde büyük sarsıntılar meydana getirmez. Kazık çukurunu açılırken sondajla birlikte çok iyi numune almak mümkündür ve bu sayede zeminin mükemmel bir profili çıkartılabilir. Bununla birlikte çalışma yüksekliğinin düşük olduğu çatı altı vs. gibi bölgelerde uygulanabilmesi sondaj kazıklarının avantajları arasında yer almaktadır. Bu üstünlüklere karşılık,

zeminin oyularak uygulanması nedeniyle kaplama borusu etrafında bir miktar gevşeme meydana gelebilir. Kazma işlemi gerçekleştirilirken bu etken göz önünde bulundurulmalı ve kaplama borusu alt ucundan 0,3m-0,5m daha derine kazı yapılmalıdır. Ayrıca kazık kesiti küçük olduğunda özellikle su seviyesi altında gerçekleştirilecek betonlama işleminde sıkıntılar yaşanabilmektedir. Bunun yanında kazma işlemi gerçekleştirildikten sonra muhafaza borusu çukurdan çekilirken gerekli özen gösterilmez ise zeminden çukura doğru göçmeler meydana gelebilir, kazık kesitinin de daralması ile boğulma olarak tabir edilen sorun yaşanabilir. Tüm bunlara ek olarak, betonlama işlemi sırasında tremi borusunun kullanılmaması, betonun içerisinde ki iri ve ince malzemeyi ayırarak segregasyon meydana getirir ve kötü bir beton kalitesi elde edilir.

Sondaj kazıkları genelde uç kazığı olarak kullanılmaktadır. Gevşek zeminlerde, akıcı kumlarda ve yeraltı suyunun önemli problemler yaratacağı yerlerde mümkün olduğunca sondaj kazığı yapımından uzak durulmalı veya gereken önlemler alınmalıdır. Yerinde dökme çakma kazıklar, sondaj kazıklarına oranla genelde daha fazla yük taşırlar. Ancak çakma kazıkların çeşitlerinin sınırlı olmasına karşın sondaj kazığı çeşitleri her geçen gün gelişmekte ve sayısında artış gözlenmektedir.

2.1.3 Çelik Kazıklar

Çelik kazık tipleri H kesit, I kesit veya dairesel kesit şeklinde imal edilebilir. Çelik kazıkların boyutları ihtiyaca uygun ölçülerde kolayca hazırlanabilir. Bu kazık tipi yüksek yük taşıma kapasitesi özelliğindeki uç kazıkları olarak kullanılabilirler. Uçları açık şekilde çakımı gerçekleştirilen boru ve kutu kesitli kazıklarda, çakma işlemini kolaylaştırmak amacıyla taban zeminin kazılması veya ters su sirkülasyonu yöntemlerine başvurulabilir. Çakma esnasında kazıkta tahribat meydana gelmemesi için kazık ucu takviyesi kullanılabilir.

Çelik kazıklar, örselenmemiş tabii zeminlerde uygulandığında korozyon riski düşüktür. Buna karşın, örselenmiş veya dolgu zeminlerde korozyon önemli risktir. Bu durumun temel sebebi zemindeki oksijen içeriğini fazla olmasıdır. Deniz suyuna maruz çelik kazıklarda da korozyon riski bulunmaktadır. Özellikle suyun pH düzeyi

7'den daha az veya fazla olması suyun asidik bazik özelliklerini etkilemesi bunun temel sebebidir.

Çelik kazıkların çakma boyu, kazığa yapılacak kaynak ile arttırılabilir. Boru tipindeki çelik kazıkların et kalınlıkları belirlenirken, kullanılan çelik kalitesi göz önünde bulundurulmaktadır. Tüm bu etkenler malzeme tasarrufunda fayda sağlayabilmektedir (Tomlinson ve Woodward 2008)

2.1.4 Kompozit (Karmaşık) Kazıklar

Yapımında birden çok malzeme kullanılan kazık tipleridir. Bu kazık çeşitleri, genellikle alt kısımları ahşap üst kısımlarında beton veya çelikten teşkil edilen kazıklar olarak bilinir. Ahşap kısmın, çürüme nedeniyle zarar görmeyeceği derinliklere yani yeraltı su seviyesinden aşağı seviyelere kadar açılır. Daha sonrasında ise üst kısımda betonlama işlemi uygulanır, koşullara göre gerektiğinde kaplama borusu yerinde bırakılarak yapılmaktadır. Bu kazık çeşitlerinin kullanım alanı pek yaygın değildir.

2.2 Kazık Seçiminde Etkili Faktörler

Kazık seçiminde etkili olan ana parametreleri; yapılacak yapının konumu ve tipi, bulunduğu zemin koşulları ve durabiliteye bağlı olarak belirtebiliriz. Bu temel parametreler dışında seçim yaparken dikkat edilmesi gereken hususlar aşağıda ki şekilde sıralanabilir:

- Emniyet
- Maliyet
- İmalat hızı
- Uygulama tecrübesi
- Kaynak yeterliliği
- Kazık sayısı

3. KAZIKLARDA TAŞIMA GÜCÜ

3.1 Genel

Kazıklar, çoğunlukla gruplar halinde tasarlanmaktadır. Birçok durumda, tekil bir kazığın davranışı, kazık grubunun davranışına göre farklılıklar göstermektedir. Bu yüzden kazık gruplarının taşıma gücü hesabında farklı yöntemler kullanılır. Her ne kadar hesap yöntemleri farklı olsa da, grup taşıma kapasitesi hesaplanırken de tekil kazığın taşıma gücünün hesaplanması gerekmektedir.

Tekil kazıklarda izin verilebilir yükün hesaplanmasında,

- Kazığa etki eden göçme yükü Q_F , bir güvenlik katsayısı G_s ile bölünmesiyle elde edilen ve
- Kazığın izin verilen oturma sınırlarına bağlı olarak belirlenmiş değerlerden küçük olanı dikkate alınmaktadır.

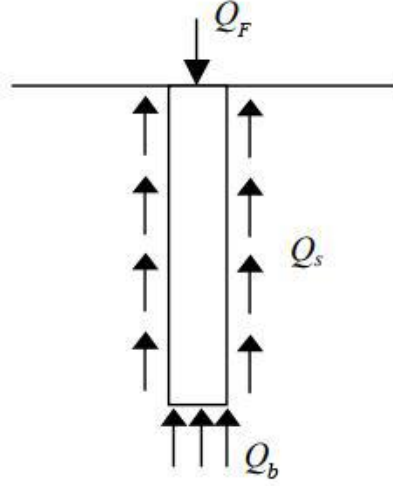
Bu bölümde, tekil bir kazığın düşey yük altındaki taşıma gücü hesapları verilmektedir. Taşıma gücü hesabı yapılırken farklı hesap yöntemleri mevcuttur. Standart arazi deneyleri (SPT, CPT, Presiyometre v.b.), dinamik kazık çakma direnci parametreleri, arazide yapılan yükleme deneyleri gibi taşıma gücü hesabında kullanılan başlıca yöntemler literatürde yer almaktadır. Buna karşın yapılan çalışmada kazık taşıma gücü belirlenirken, zemin ve kazık özelliklerine dayanan taşıma gücü yöntemleri kullanılmıştır.

Derin temel sistemlerini, yüzeysel temel sistemlerinden ayıran en önemli kriter, derin temel sistemlerinin taşıma gücü hesabı yapılırken temel yan yüzeyindeki sürtünme etkisinin taşıma gücü hesaplarına dahil edilmesidir. Kazığın taşıdığı toplam yük kazık tabanında ki uç direnci Q_b ile kazık yüzeyi ve zemin arasında meydana gelen sürtünme direnci Q_s arasında paylaşılmaktadır.

Buna göre kazığın toplam taşıma gücü (3.1) eşitliği ile ifade edilmektedir. Ayrıca Şekil 3.1’de kazık taşıma gücünün belirlenmesinde hesaplanan kazık taşıma gücü bileşenleri gösterilmektedir.

$$Q_F = Q_b + Q_s = q_b A_b + f_s A_s \quad (3.1)$$

Burada Q_F kazığın nihai taşıma gücünü, Q_b uç direncini, Q_s toplam çevre sürtünmesini, q_b kazık ucunun oturmuş olduğu zemindeki birim alana gelen taşıma gücünü, f_s kazık birim çevre alanına etki eden sürtünme gerilmesini, A_b kazık uç kesit alanını ve A_s kazığın toplam çevre alanını gösterir (Çinicioğlu 2005).



Şekil 3.1: Kazık taşıma gücü bileşenleri

Kazık Uç Mukavemeti Hesabı:

Kazık uç mukavemeti hesaplanmasında yüzeysel temelerde kullanılan taşıma gücü formülleri baz alınır. Bunun nedeni kazık uç bölgesinde oluşan göçme mekanizması yüzeysel temelerin tabanındaki göçme mekanizması ile benzerlik göstermektedir. Bu yüzden kazık için, derinlik = D_f yerine uzunluk=L kullanılmıştır.

$$Q_b = q_b A_b = A_b (cN_c + \gamma LN_q + 0,5\gamma DN_\gamma) \quad (3.2)$$

$$q_b = cN_c + \gamma LN_q + 0,5\gamma DN_\gamma \quad (3.3)$$

- q_b : Kazık ucunda birim alan için uç direnci (kN/m²)
- A_b : Kazık uç kesit alanı (m²)
- D : Çap veya daire olmayan kesitlerde taban genişliği D=B (m)
- N_c, N_q, N_γ : Taşıma gücü faktörleri
- c : Kohezyon (kN/m²)
- γ : Zeminin birim hacim ağırlığı (kN/m³)

Kazık boyunun çapına oranla çok büyük olduğu için taşıma gücü faktörlerinden N_γ teriminin N_q 'nun yanında çok küçük kaldığı düşünülmekte ve ihmal edilmektedir. Dolayısıyla;

$$q_b = cN_c + \gamma LN_q \quad (3.4)$$

olarak yazmak mümkündür.

Kazık Çevre Sürtünmesi Hesabı:

Çevre sürtünmesi, kazık çevre yüzeyinin kazık-zemin arasındaki sürtünme direnci ile çarpılması ile elde edilmektedir.

$$Q_s = f_s A_s = \pi L D f_s \quad (3.5)$$

f_s : Çevre yüzeyindeki birim alanda etkili olan sürtünme (kN/m²)

A_s : Sürtünmenin karşılandığı kazık çevre yüzeyi (m²)

L : Kazık boyu (m)

D : Çap veya dairesel olmayan kesitlerde kenar uzunluğu (m)

Taşıma gücü faktörleri olan N_c , N_q , N_γ değerleri, içsel sürtünme açısına bağlı olarak değişimi Tablo 3.1’de gösterilmektedir. Ayrıca bu taşıma gücü faktörleri,

$$N_q = \frac{\left[e^{\pi \left(\frac{3}{4} - \frac{\phi}{2} \right) \tan \phi} \right]^2}{2 \cos^2 \left(\frac{\pi}{4} + \frac{\phi}{2} \right)} \quad (3.6)$$

$$N_c = (N_q - 1) \times \cot \phi \quad (3.7)$$

$$N_\gamma = \frac{1}{2} \left(\frac{k_p}{\cos^2 \phi} - 1 \right) \tan \phi \quad (3.8)$$

şeklinde ifade edilmektedir.

Tablo 3.1: Terzaghi N_c , N_q , N_γ taşıma gücü faktörleri (Terzaghi, 1943)

ϕ'	N_c	N_q	N_γ	ϕ'	N_c	N_q	N_γ
0	5.14	1.00	0.00	26	22.25	11.85	12.54
1	5.38	1.09	0.07	27	23.94	13.20	14.47
2	5.63	1.20	0.15	28	25.80	14.72	16.72
3	5.90	1.31	0.24	29	27.86	16.44	19.34
4	6.19	1.43	0.34	30	30.14	18.40	22.40
5	6.49	1.57	0.45	31	32.67	20.63	25.99
6	6.81	1.72	0.57	32	35.49	23.18	30.22
7	7.16	1.88	0.71	33	38.64	26.09	35.19
8	7.53	2.06	0.86	34	42.16	29.44	41.06
9	7.92	2.25	1.03	35	46.12	33.30	48.03
10	8.35	2.47	1.22	36	50.59	37.75	56.31
11	8.80	2.71	1.44	37	55.63	42.92	66.19
12	9.28	2.97	1.69	38	61.35	48.93	78.03
13	9.81	3.26	1.97	39	67.87	55.96	92.25
14	10.37	3.59	2.29	40	75.31	64.20	109.41
15	10.98	3.94	2.65	41	83.86	73.90	130.22
16	11.63	4.34	3.06	42	93.71	85.38	155.55
17	12.34	4.77	3.53	43	105.11	99.02	186.54
18	13.10	5.26	4.07	44	118.37	115.31	224.64
19	13.93	5.80	4.68	45	133.88	134.88	271.76
20	14.83	6.40	5.39	46	152.10	158.51	330.35
21	15.82	7.07	6.20	47	173.64	187.21	403.67
22	16.88	7.82	7.13	48	199.26	222.31	496.01
23	18.05	8.66	8.20	49	229.93	265.51	613.16
24	19.32	9.60	9.44	50	266.89	319.07	762.89
25	20.72	10.66	10.88				

Tekil bir kazığın taşıma gücü belirlenirken kullanılacak statik formüller, kohezyonlu zeminler ve kohezyonsuz zeminler için ayrı ayrı irdelenecektir. Kohezyonlu zeminlerde hesap efektif gerilmelere göre yani drenajlı şartlar için, kohezyonsuz zeminlerde ise daha elverişsiz değerler ile karşılaştığı için hesap toplam gerilmeler üzerinden yani drenajsız şartlar göz önünde bulundurularak yapılmaktadır.

Statik taşıma gücü formüllerinde kullanılacak güvenlik katsayısı bir çok parametreye bağlı olmakla birlikte 2.0 ile 4.0 arasında değişmekte, kazık yükleme deneyi ile doğrulama sağlanmadıkça 3.0 alınması uygun kabul edilmektedir.

3.2 Kohezyonsuz Zeminlerde Kazık Taşıma Gücü Hesabı

3.2.1 Çevre Sürtünmesi

Kohezyonlu zeminlerde ki tekil kazıkların çevre sürtünmesi, zemin mekaniği temel kayma direnci denklemlerine benzer olarak denklem 3.9'da yazılmaktadır.

$$f_s = \sigma'_v K_s \tan \delta \quad (3.9)$$

$$K_s = 1 - \sin \phi \quad (3.10)$$

σ'_v : Düşey zemin efektif gerilmesi

K_s : Yatay toprak basınç katsayısı

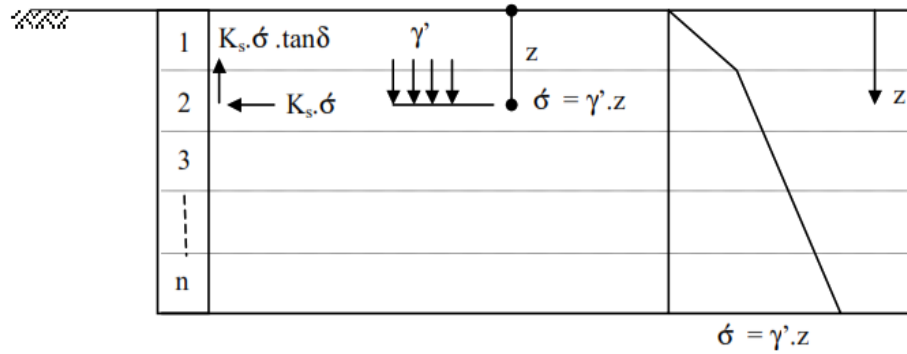
δ : Kazık-zemin arasındaki sürtünme açısı

Tablo 3.2 de farklı zemin kazık ara yüzü durumlarına göre kabul edilebilecek sürtünme açısı değerleri verilmiştir.

Tablo 3.2: Farklı kazık yüzeyi şartlarına bağlı sürtünme açısı (Kulhawy 1984)

Kazık/Zemin ara yüzünün durumu	Kazık/Zemin Sürtünme Açısı δ
Pürüzsüz çelik / Kum	$0,5 \phi - 0,7 \phi$
Pürüzlü çelik / Kum	$0,7 \phi - 0,9 \phi$
Betonarme çakma kazık / Kum	$0,8 \phi - 1,0 \phi$
Yerinde dökme betonarme kazık / Kum	$1,0 \phi$
Ahşap kazık / Kum	$0,8 \phi - 0,9 \phi$

Kohezyonsuz zeminlerdeki çevre sürtünmesi hesabında efektif gerilme prensibine dayanan bir yöntem uygulanmaktadır (Şekil 3.2).



Şekil 3.2: Efektif gerilme prensibine göre çevre sürtünmesi hesabı

3.2.1.1 Beta (β) Metodu

Bu yöntemi Burland (1973) ilk kez çakma kazıkta kullanılmak üzere önermiştir. Kazık yapımı esnasında kazık çevresindeki zeminde yer alan kohezyon etkisini göz ardı eden bu yöntem, yer altı su düzeyinin azalması ile oluşacak sıkışmanın oluşturduğu hacim azalması nedeniyle kazık çevresindeki efektif gerilmenin, kazık yapılmadan önceki düşey efektif gerilmeye yaklaşık eşit olduğunu belirtmektedir. Yapılan kazığın yüklenmesi sırasında kayma gerilmesinde meydana gelen esas

değişimin, zemin ile kazık yüzeyi arasındaki ince bir yüzeyde hızlı bir şekilde drenaj etkisi oluşumuna veya kazık yapımı ile yüklenmesi işlemleri arasında kalan zaman diliminde yine bu yüzeyde hızlı bir drenaj meydana gelmesine bağlı olduğu Burland tarafından savunulmaktadır. Hesaplamalarda (δ) zemin ile kazık arasındaki sürtünme açısına yani bir kayma mukavemeti açısına (ϕ) gerek duyulduğundan, Bowles bu yöntemi, kohezyonsuz zeminlerde kullanılmak üzere önermektedir. Bu bağlamda Burland (1973) kullanılacak eşitliği aşağıda basit bir ifade ile belirtmiştir.

$$f_s = \sigma_{vo}' K_0 \tan \delta \quad (3.11)$$

$$f_s = \sigma_{vo}' \beta \quad (3.12)$$

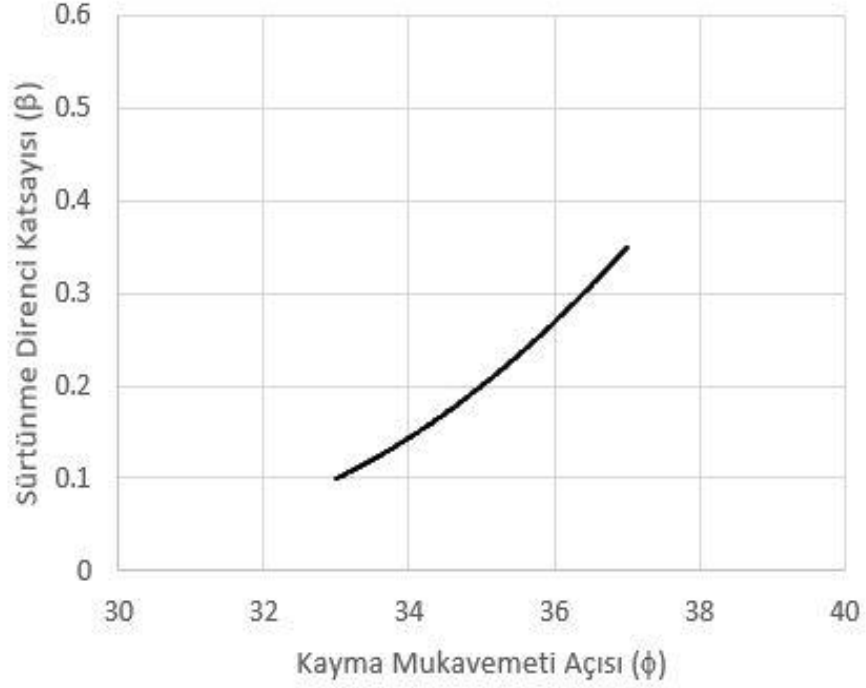
β : Sürtünme katsayısı

Zemine üniform bir sürşarj yükü (q_s) etki ettirilmesi durumunda aşağıdaki şekilde düzenlenir.

$$f_s = \beta(\sigma_{vo}' + q_s) \quad (3.13)$$

q_s : Üniform sürşarj yükü

Birçok bilim adamı önerilen yöntem için çalışmalar yapmış, büyük katkılarda bulunmuş ve geliştirilmesinde önemli rol almıştır. Kazık yükleme deneyleri kullanılarak birçok geri hesap yöntemleri ve beta katsayılarının üzerine analizler gerçekleştirilmiştir. İri daneli zeminlerde fore kazıklar için, Poulos ve Davis (1980), Meyerhof (1976) tarafından yapılan hesaplamayı geliştirmiş ve ampirik hesaplamalarda kullanılmak üzere aşağıdaki şekildeki abağı önermişlerdir. (Şekil 3.3)



Şekil 3.3: Fore kazıklarda kullanılmak üzere β ve ϕ ilişkisi (Poulos ve Davis-1980)

3.2.2 Uç Direnci

Kohezyonsuz zeminlerde kazık uç direnci denklem 3.14'de gösterilmektedir.

$$q_b = \gamma L N_q \quad (3.14)$$

Burada, kazık ucu seviyesindeki efektif jeolojik gerilmeler dikkate alınmaktadır. N_q taşıma gücü faktörü değeri, Tablo 3.1'de belirtilen değerlere uygun seçilmektedir.

3.3 Kohezyonlu Zeminlerde Kazık Taşıma Gücü Hesabı

3.3.1 Çevre Sürtünmesi

3.3.1.1 Alfa (α) Yöntemi

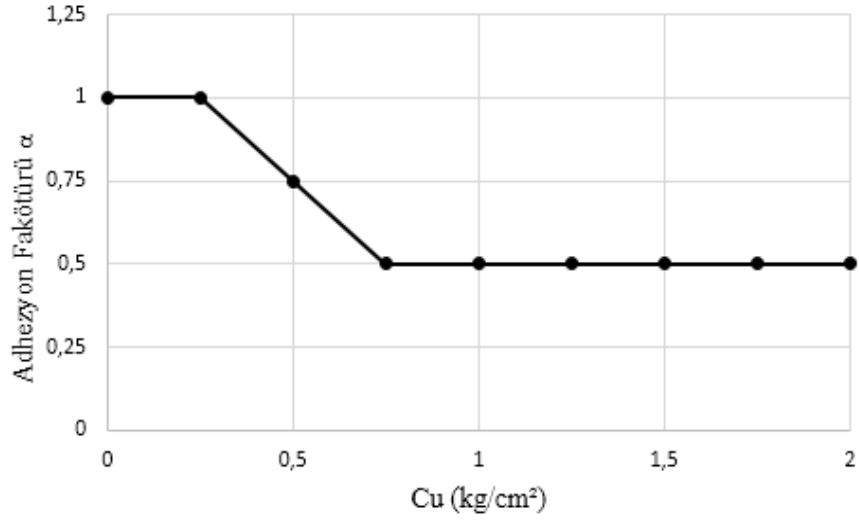
Kohezyonlu zeminlerde kazık yüzeyi ile zemin arasında oluşan sürtünme, zeminin kayma mukavemeti parametrelerine bağlıdır. Oluşan çevre sürtünmesi denklem 3.15’de verilmektedir.

$$f_s = \alpha \times s_u \quad (3.15)$$

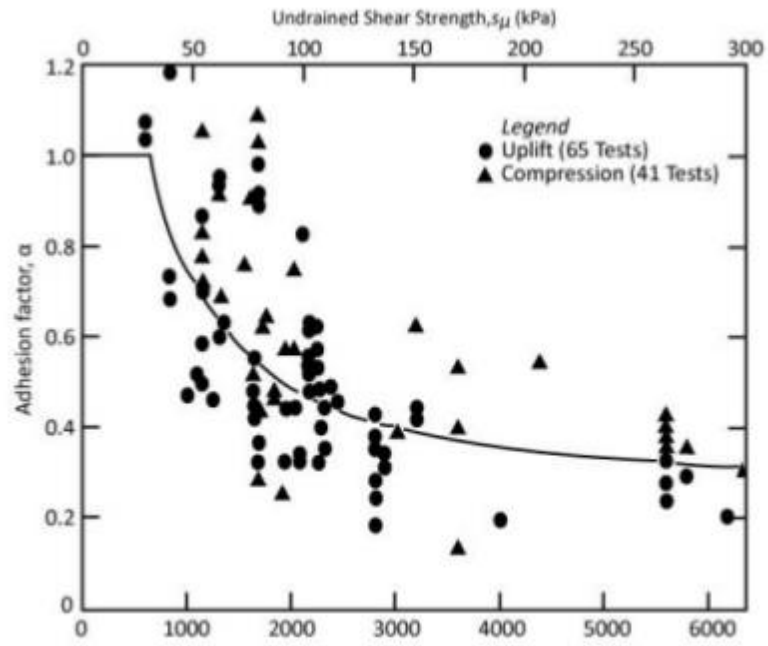
α : Adhezyon katsayısı,

s_u : Zeminin drenajsız kayma mukavemeti

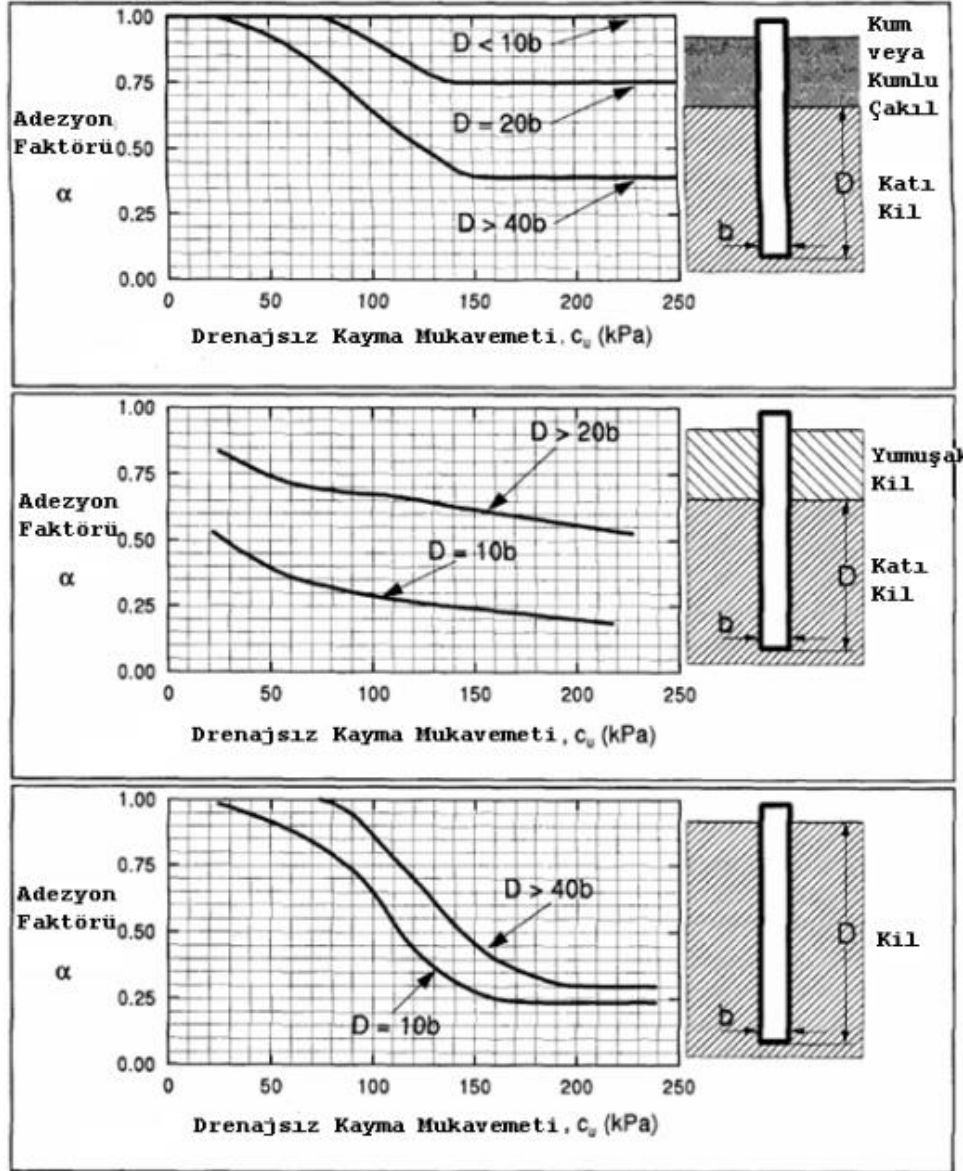
Zeminin suya doymuş kil olması veya drenajsız koşullar altında hesap yapılması durumunda, ($\phi = 0$) $s_u = c_u$ kabul edilmektedir. Adhezyon katsayısı, kazığın yapımı esnasında zeminde meydana gelen örselenme, aşırı konsolide killerde zeminin kazığı çevrelemesine bağlıdır. Bahsi geçen değere ulaşılabilmesi için kazığın zemin içerisinde önemli ölçüde yer değiştirmesi gerekmektedir. Bu sebeple, adhezyon katsayısı değeri “1”den küçüktür. Şekil 3.4, Şekil 3.5 ve Şekil 3.6 adhezyon katsayısının belirlenmesinde kullanılmak üzere çeşitli kaynaklardan derlenen grafikler ve abaklar gösterilmektedir. Ortalama bir değer olarak 0,5 kabul edilebilir. (Kumbasar ve Kip 1999)



Şekil 3.4: Normal yüklenmiş killerde adhezyon faktörü α , (Kumbasar ve Kip, 1999)



Şekil 3.5: Delgili şaftların çevre sürtünmesi hesaplamaları için α faktörü (Kulhawy ve Jackson, 1989)



Şekil 3.6: Adezyon faktörü için önerilen tasarım eğrileri (Tomlinson, 1994)

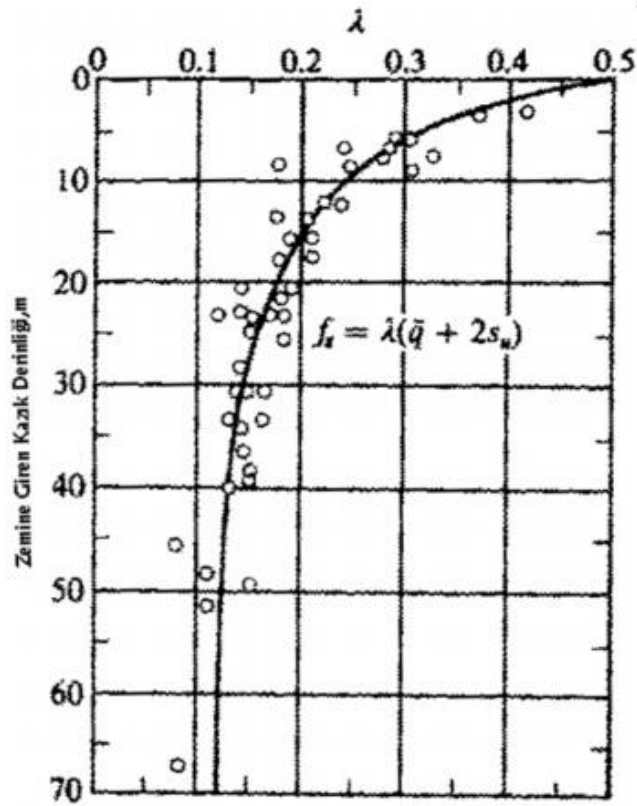
3.3.1.2 Lamda (λ) Yöntemi

Vijayvergia ve Focht (1972), önerdikleri lamda yöntemi diğer ampirik yöntemlerde olduğu gibi farklı kazık yükleme deneylerindeki geri hesap yönteminin uygulaması sonucu elde edilmiştir. Bu yöntem, kazık yükleme deney sonuçlarında elde edilen değer ile kazığın çevresinde meydana gelen sürtünmenin aşırı konsolide olmuş killerde hesabı için hesap edilen değer arasında %10 hata payı ile sonuç verdiği gözlemlenmiştir. Yöntemin geliştirilmesi, ABD'de deniz kıyısından uzakta inşa edilen petrol istasyonlarının oturduğu zeminlerin aşırı konsolide kil olması ile

başlamıştır. Bu yöntem bir çok ülkede farklı uygulama alanlarında başarıyla uygulanmıştır. Bağlıtından görüldüğü üzere bu yöntem, alfa ve beta yöntemlerinin tüm etkilerini kapsamaktadır (Drenajsız kohezyon ve efektif gerilme etkileri.) Şekil 3.7 de zemine giren kazık derinliğine bağlı olarak elde edilecek λ değerleri gösterilmektedir.

$$f_s = \lambda(\sigma_{vo}' + 2c_u) \quad (3.16)$$

λ : Sürtünme katsayısı



Şekil 3.7: λ Sürtünme Katsayısı (Vijayvergiya ve Focht, 1972)

Lamda yöntemi, 15 metreden kısa kazıklar için, aşırı konsolide ve normal konsolide killerde büyük değerler vermektedir. En küçük lamda değeri 0,14'dür. Bu yöntemdeki mantık, kazık yapımı esnasında zeminin üst tabakaları, daha fazla etkiye maruz kalacağından, kazık sürtünmesine olan katkısı aşağılarda bir nebze daha az olmaktadır.

3.3.2 Uç Direnci

Kohezyonlu zeminlere uygulanan kazıkların uç direnci denklem 3.17’de belirtildiği şekilde hesaplanmaktadır.

$$q_b = cN_c + \gamma LN_q \quad (3.17)$$

Zeminin suya doymun kil olması veya drenajsız koşullar altında hesap yapılması durumunda, ($\phi = 0$) $s_u = c_u$ kabul edilmektedir. Bu eşitlikte kullanılacak taşıma gücü faktörleri belirlenirken belli kabuller yapmak mümkündür.

- $\phi = 0$ için $N_c = 9.0$ (Derin temeller için uygundur.)
- $\phi = 0$ için N_q terimi ihmal edilebilir.

3.4 Taşıma Gücünün SPT ve CPT Verileri İle Hesaplanması

Standart penetrasyon testi (SPT) ve koni penetrasyon testi (CPT) çok uzun yıllardır tercih edilen ve geoteknik mühendisliği alanında birçok korelasyona imkan sağlayan deneylerdir. Zeminlerin mukavemet parametreleri hakkında veriler elde edilmesine yarayan bu deneyler zeminler için güvenilir sonuçlar elde etmemizi sağlamaktadır.

Zemin rölatif sıklığı (D_r) ve kil zeminlerde serbest basınç mukavemeti (q_u) değerleri için SPT darbe vuruş değerlerini (N) kullanarak Tablo 3.3 ve Tablo 3.4 yardımıyla bir sonuç elde etmek mümkündür.

Tablo 3.3: SPT Darbe Vuruş Sayısı (N) ve Rölatif Sıklık Değeri (D_r) İlişkisi

SIKILIK	ÇOK GEVŞEK	GEVŞEK	ORTA	SIKI	ÇOK SIKI	
D_r	0	0.15	0.35	0.65	0.85	1.00
N	0	4	10	30	50	

Tablo 3.4: Killerde SPT Darbe Sayısı (N), Serbest Basınç Mukavemeti (q_u) ve Kıvam İlişkisi

KIVAM	ÇOK YUMUŞAK	YUMUŞAK	ORTA	KATI	ÇOK KATI	SERT
N	2	4	8	15	30	
q_u (kg/cm ²)	0.25	0.5	1.0	2	4	

Serbest basınç mukavemet değeri (q_u) belirlendikten sonra negatif sürtünme hesabında da ele alınan drenajsız kohezyon değeri (c_u), aşağıda ifade edilen ve Skempton tarafından önerilen eşitlik yardımı ile belirlenir.

$$c_u = q_u / 2 \quad (3.18)$$

Koni penetrasyon testi (CPT) sonucunda elde edilen uç mukavemeti q_s ve SPT N darbe sayısı arasında kullanılmak üzere aşağıdaki bağıntılar ile ilgili durumlar için kullanılabilir.

İri daneli zeminlerde kohezyonsuz durumda $q_s = 6 \cdot N_{30}$

İnce daneli zeminlerde kohezyonsuz $q_s = 3.5 \cdot N_{30}$

İki bağıntı kullanılarak aşağıdaki şekilde önerilen ortalama bir eşitlik kullanılabilir.

$$q_s = 4 \cdot N_{30}$$

Yapılan başka bir çalışmada Vesic (1975), rölatif sıklığa göre kazık yüzeyinde meydana gelecek olan sürtünme kuvveti hesabında kullanılması için bir formül önermiştir. Vesic, önerdiği bu formülde, minimum limit elde edilmesini sağlamakla beraber hatalı yapılan olan kazık yükleme deneylerinden elde edilen veriler, hesaplananlara oranla %50 daha büyük çıkmaktadırlar. Belirtilen formül şu şekilde ifade edilmektedir;

$$f_s = X_v (10)^{1.54 \cdot Dr^{0.4}} \quad (3.19)$$

X_v : Hesap katsayısı (büyük çakma kazık için: 8;fore kazıklar ve H profil kazıklar için:2,5)

Dr : Rölatif zemin sıkılığı

Meyerhof (1956,1976) tarafından kazık yüzeyinde meydana sürtünme hesabında SPT sonuçlarına dayalı şu formül önerilmiştir;

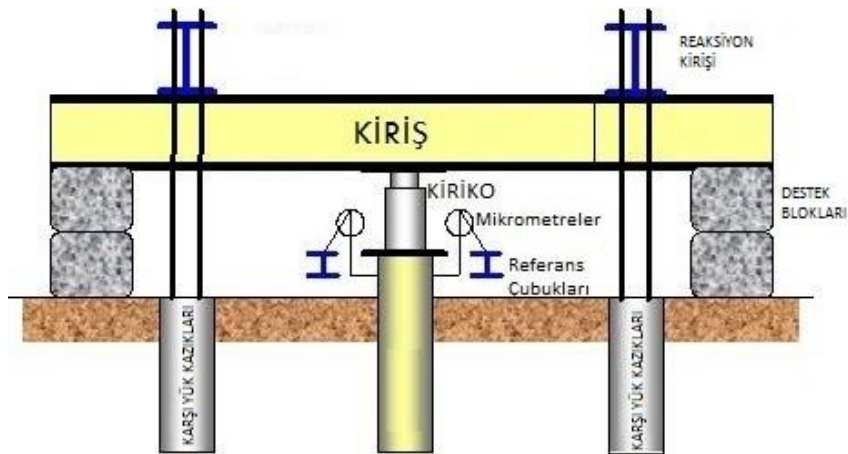
$$f_s = X_m N_{55} \quad (3.20)$$

X_m : Hesap katsayısı (Büyük çakma kazık için:2, küçük çakma kazık için:1)

N₅₅ : SPT ortalama darbe sayısı

3.5 Kazık Yükleme Deneyleri

Kazık taşıma gücünün belirlenmesinde en güvenilir yöntemlerden biriside Şekil 3.8’de şematik bir örneği bulunan kazık yükleme deneyidir. Çeşitli düzenlemeler yapılarak kazık yükleme deneyi yardımı ile negatif çevre sürtünmesini belirlemek mümkündür. Taşıma gücü belirlemede olduğu gibi negatif çevre sürtünmesi değeride güvenilir bir şekilde belirlenmektedir.



Şekil 3.8: Kazık yükleme deney örneği

Bahsedildiği gibi negatif çevre sürtünmesinin, kazık yükleme deneyi ile güvenilir bir şekilde belirlemek mümkündür. Ancak negatif çevre sürtünmesini oluşturacak olan yumuşak kıvama sahip kohezyonlu zeminlerin konsolidasyon oturması çok uzun süre alacağı açıktır. Bu nedenle bu yöntem pratik uygulamada tercih edilmesi çok azdır.

3.6 Kazıklarda Oturma Hesabı

Kazıklarda oturma,

- Üst yapının oturmalarla karşı hassasiyeti,
- Kazığın sıkışabilme özelliği yüksek bir tabaka içinde olması,
- Düşey yükler altında kazıkta meydana gelecek yer değiştirmenin üst yapının statik hesabında gerektiği koşullarda hesaplanır.

Kazıklı temellerin genel kullanım amacı oturmaları kısıtlamaktır. Ancak unutulmaması gerekir ki, ihtiyaç duyulan çevre sürtünmesinin oluşabilmesi için gereken oturmalar, kazık teşkili sonrasında meydana gelen zemin sıkışması veya konsolidasyon oturmaları, kazık ucu seviyesinden aşağıdaki zeminde sıkışmaya bağlı meydana gelen oturmalar ve kazığın elastik boy kısılması gibi farklı etkenlere bağlı olarak çeşitli oturmalar meydana gelmektedir.

Kazıkların oturma hesabında birçok farklı metot mevcuttur. Bunlardan bazıları;

- Ampirik formüllere dayalı hesap yöntemleri,
- Zemin-Yapı etkileşimini ve gerilmelerin süperpoze edilmesine dayalı hesap yöntemleri,
- Sonlu elemanlar ve sonlu farklar (SEM & SFM) gibi nümerik yöntemlerdir. (Dal vd. 2015)

Yarı Ampirik Yöntem: Düşey yükler altındaki bir kazıkta üç farklı sebepten oturmalar meydana gelmektedir. Bunlar; kazık ucunda meydana gelen oturma (S_p), kazıkta meydana gelen elastik oturma (S_s), kazığın gövdesi boyunca taşıdığı yükten dolayı meydana gelen oturma (S_{ps}) dır. Kazıkta meydana gelen toplam oturma miktarı (S_t), tüm bunların toplamına eşittir (3.21).

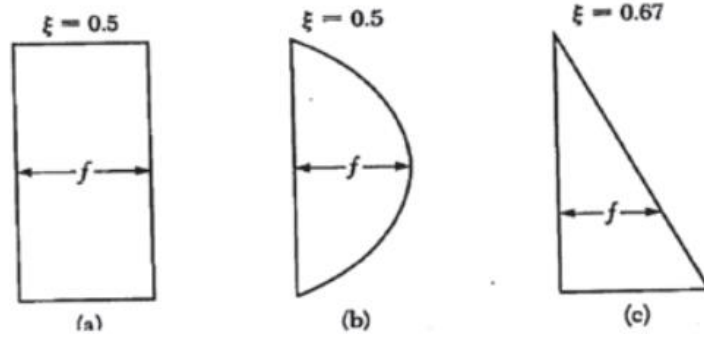
$$S_t = S_s + S_p + S_{ps} \quad (3.21)$$

Kazıkta oluşacak oturmayı hesaplamak için aşağıda belirtilen şekilde bir yol izlenmektedir:

$$S_s = (Q_b + \alpha_s Q_s) \frac{L}{A_p E_p} \quad (3.22)$$

α_s : Kazık gövdesi boyunca oluşan çevre sürtünmesine bağlı katsayı

E_p : Kazık elastisite modülü



Şekil 3.9: Kazık gövdesi boyunca oluşan farklı birim sürtünme mukavemetleri

Burada α_s 'nin değeri, Şekil 3.9'da belirtilen kazık gövdesi boyunca meydana gelen sürtünme mukavemetine göre değişkenlik göstermektedir. Eğer dağılım parabolik (Şekil 3.9-a) veya üniform ise (Şekil 3.9.b) $\alpha_s=0,5$, dağılım üçgen şeklinde (Şekil 3.9.c) ise yaklaşık bir değer olarak $\alpha_s=0,67$ kabul edilmektedir.

$$S_p = \frac{C_p Q_b}{q_b D} \quad (3.23)$$

q_b : Nihai uç direnci

C_p : Tablo 3.5'den belirlenecek ampirik katsayı

Tablo 3.5: Tipik C_p değerleri

Zemin Çeşidi	Çakma Kazık	Fore Kazık
Kum (Sıkıdan Gevşeye)	0,02-0,04	0,09-0,18
Kil (Katıdan Yumuşğa)	0,02-0,03	0,03-0,06
Silt (Sıkıdan Gevşeye)	0,03-0,05	0,09-0,12

$$S_{ps} = \frac{C_s Q_s}{D_f q_b} \quad (3.24)$$

$$C_s = \left(0,93 + 0,16 \sqrt{\frac{D_f}{B}} \right) \cdot C_p \quad (3.25)$$

D_f : Kazık gömülü derinliği

Ampirik Yöntem: Kazıkta meydana gelecek oturma hesaplamalarında yarı ampirik yöntemden farklı olarak tek çap, boy, elastisite ve kesit özelliklerine göre değişkenlik gösteren Formül 3.26 ile hesaplanmaktadır. Tablo 3.6’da literatürde kabul görmüş birçok kaynaktan izin verilebilir deformasyon sınırları belirtilmiştir.

$$S_t = \frac{D}{100} + \frac{Q_F L}{A_p E_p} \quad (3.26)$$

Tablo 3.6: Yükleme kriterleri (Birand 2007)

Kriter Tanımı	Kriter & Kullanan
Toplam oturma sınırı	En fazla 25mm (Hollanda)
Plastik oturma sınırı	6,30 mm (AASHO)
Toplam oturma/Yük sınırı	1,27 mm/ton (Raymond)
Toplam plastik oturma/Yük oranı	1,5 mm/ton (Raymond)

3.7 Negatif Çevre Sürtünmesi

Zemin ile kazık çevresi arasındaki etkileşim, zemine göre kazığın yapacağı izafi hareket ile mümkündür. Kazığın zemine göre aşağı doğru hareket etmesi durumunda kazık tarafından taşınan yükün bir bölümü zemine aktarılır. Bu durum pozitif çevre sürtünmesi olarak isimlendirilir. Ancak zeminin kazığa göre görece olarak aşağı hareket etmesi durumunda zeminin taşıdığı yük kazığa aktarılmaya başlar. Bu nedenle kazığın taşıdığı yük miktarı, zeminin taşıyacağı yük miktarı kadar artmış olur. Bu

durum negatif çevre sürtünmesi olarak isimlendirilir. Negatif çevre sürtünmesinin büyüklüğü, zemin cinsi, meydana gelen görelî hareket, ve kazık yüzeyinin pürüzlülüğü ile de ilgilidir. Negatif sürtünme, zemin yüzeyinde dolgu yapılması, farklı yükleme şekilleri, yer altı su seviyesindeki değişim ve meydana gelen oturmalar etkisiyle oluşmaktadır. Kazıklara etkiyen negatif çevre sürtünmesi aşağıdaki bağıntı ile hesaplanmaktadır.

$$f_n = \beta \sigma'_{vo} \quad (3.27)$$

β katsayısı kaya dolgu zeminlerde 0.4 değeri, kum ve çakıl ise 0.35 değeri, silt veya normal konsolide, düşük veya orta plastisiteli killerde 0.30 değeri, yüksek plastisiteli normal konsolide killerde ise 0.20 değeri önerilmektedir. (Broms, 1976)

4. YANAL YÜK ETKİSİNDEKİ KAZIKLAR

4.1 Genel

Temel sistemleri tasarlanırken, üst yapıdan gelebilecek düşey yükler olduğu gibi yanal yükler etkileri de göz önünde bulundurulmalıdır. Yanal kuvvetlerin düşey kuvvetlere göre çok küçük mertebede olduğu bazı durumlarda, düşey kazık olarak imal edilen kazıklar yanal yükleri de güvenle karşılayabilmektedir. Kazıklarda yanal taşıma gücü kapasitesi yüke, kazık çeşidine, zemin özelliklerine ve kazık başlığının bağlantı türüne bağlıdır.

Düşey olarak teşkil edilen bir kazığın rijit bir başlıkla tespit edilmemesi durumunda, kazık başlığına etki edecek tüm yanal yüklerin zemin tarafından karşılanması beklenir. Buna bağlı olarak kazıkta, yanal kuvvetin etkisiyle şekil değiştirmeler meydana gelmektedir. Ayrıca kazığın kısa olması durumunda, kazıkta ötelenme meydana gelmesi muhtemeldir. Yanal yük etkisindeki uzun kazık olarak teşkil edilen kazıkların davranışı kısa kazıklardan farklıdır. Yanal yük etkisinde kazığın alt tarafı düşey olarak kalırken, üst tarafında yer değiştirmeler meydana gelmektedir. Bu nedenle kazıkların eğilmeye karşı direncini artırmak amacıyla, kesit momenti hesaplanmalı ve kesitte oluşacak eğilmeyi karşılamak amacıyla donatı yerleştirilmelidir.

Yanal yük etkilerine maruz kalmış kazıklı temellerin tasarımında dikkat edilecek kriterler aşağıda sıralanmaktadır. (Duncan vd. 1994)

- Kazığa etki eden yanal yük, kazığın çevrelendiği zemin nihai yanal yük taşıma kapasitesini aşmamalıdır.
- Kazığa etki eden yanal yük sebebi ile kazıkta oluşacak eğilme momentleri kazığın moment taşıma kapasitesinden düşük olmalıdır.
- Kazığa etki eden yanal yük etkisiyle oluşacak ötelenme, yapımı planlanan yapı için izin verilebilir ötelenme sınırından küçük olmalıdır.

4.2 Yanal Kazık Tasarımında Yatak Katsayısı ve Zemin Yayları

Kazıklı temeller, çeşitli yükleme durumlarında statik koşullar altında yanall yüklerle maruz kalabilir. Örneğin, bir köprü ayağı temeli yanall yüklerle maruz kalabilir. Kazıkların statik yükler altında analizleri iki temel yönde geliştirilmiştir. Bu yöntemler şunlardır: Kazık bir dizi bağımsız yay tarafından desteklenen bir kiriş olarak modellenen Winkler yay yaklaşımı; ve elastik bir yığının elastik bir zemin sürekliliğine gömüldüğü kabul edilen elastik süreklilik yaklaşımı. Bu iki yaklaşımda varsayılan modeller ile alanda karşılaşılan gerçekçi durumlardan farklı olabilir.

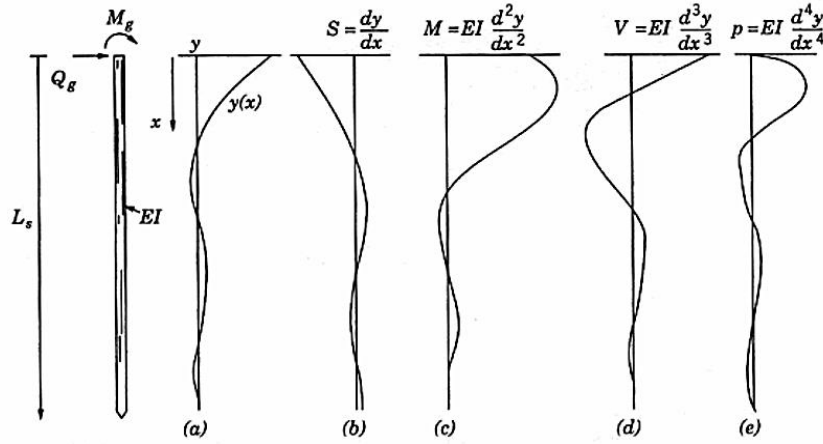
Farklı yaklaşımların farklı güçlü ve zayıf yönleri vardır. Winkler yay yöntemi, zeminin kazık sapmasına doğrusal olmayan yükleme tepkisinin, doğrusal olmayan py veya tz eğrileri kullanılarak kolayca dahil edilmesini sağlar. Bu yaylar, kazıkların etrafına dayatılan zemin hareketlerinin etkilerini içerecek şekilde değiştirilebilir. Ek olarak, farklı katmanlı zemin profilleri de basit bir şekilde yerleştirilebilir. Bununla birlikte, yaylar bir konumdaki zemin hareketinin bitişik konumlardaki toprak hareketleri üzerindeki etkilerini hesaba katmamaktadır. Bu, kullanılan ampirik yöntemlerin güvenilirliğini sınırlar ve bu yöntemle kazık gruplarının analizini zorlaştırır.

Öte yandan, elastik süreklilik yaklaşımı ile kazık etrafındaki zemin gerilmesi ve gerilme alanları doğru bir şekilde analiz edildiğinden teorik açıdan bakıldığında tatmin edicidir. Bu, kazık gruplarındaki kazıkların etkileşiminin analizi için teknikleri uygun kılar. Bununla birlikte, mevcut çözümler baskın olarak doğrusal-elastiktir ve oldukça basit zemin profillerine dayanır.

Yanal kazık tasarımında, kazığın zemin içerisine yerleştirilmiş bir kiriş gibi kabul edilerek, bu kiriş boyunca yanall yüklerle karşı zeminde oluşan direnç bir dizi yay ile idealize edilmektedir. Yanal gerilmelerin etkisiyle kazığın birim boyunda oluşan birim yer değiştirme, yayın " K_h " yay rijitliğini belirlemekte ve yatay yatak katsayısı olarak ifade edilmektedir.

Genel bir yaklaşım ile, zemin üzerindeki kirişin herhangi bir noktasında oluşan gerilme " p " ile incelenen noktada meydana gelen yer değiştirme " y " arasındaki oranla ifade edilmektedir: $K_h = p / y$. Terzaghi (1955) kazıkların düşey kiriş olarak düşünülebileceğini ifade ederek yatay yatak katsayısı, K_h kavramını literatüre

kazandırmıştır. Kazığın herhangi bir noktasındaki deplasman değeri, zemin ve kazık özellikleri ile birlikte uygulanan yük ile değişkenlik göstermektedir. Şekil 4.1’de yatay yüklenmiş kazık boyunca oluşması beklenen yatay deplasmanlar, dönme miktarı, moment değeri, kesme kuvveti ve zemin reaksiyonu gösterilmektedir.



Şekil 4.1: Yatay yüklenmiş kazık boyunca; (a) yatay deplasmanlar, (b) dönme miktarı, (c) moment değeri, (d) kesme kuvveti ve (e) zemin reaksiyonu (Reese and Wang, 1993)

Vesic (1961) lineer analizlerde kullanılacak K_h terimi için önerdiği eşitlik denklem 4.1’de gösterilmektedir. (Gajan vd. 2000)

$$K_h = 0,65 \left(\frac{E_s}{1-\nu^2} \right) \left(\frac{E_s D^4}{E_p I_p} \right) \quad (4.1)$$

E_s : Zemin elastisite modülü E_p : Kazık elastisite modülü

ν : Zemin Poisson oranı I_p : Kazık atalet momenti

D : Kazık çapı

Tablo 4.1’de farklı zemin tiplerine ait elastisite modülü değerleri gösterilmektedir.

Tablo 4.1: Zemin cinsine göre tipik elastisite modülü değerleri

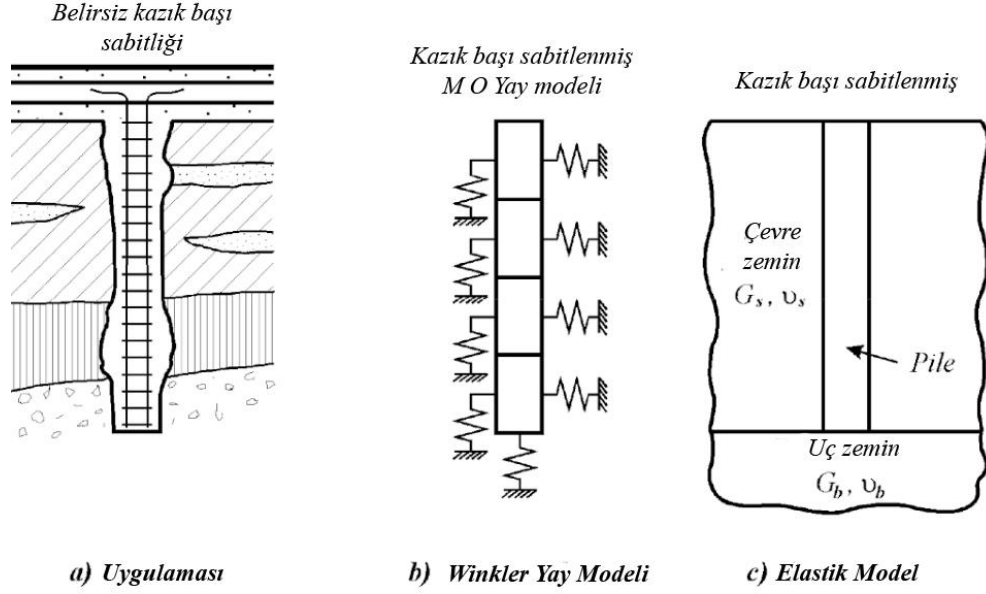
Zemin Cinsi	E_s , [kN/m ²]
KİLLER	300 - 3000
Çok Yumuşak Killer	2000 - 4000
Yumuşak Killer Orta Katı Killer	4500 - 9000
Katı Killer	7000-20000
Kumlu Killer	30000 - 42500
KUMLAR	5000-20000
Siltli Kumlar Gevşek Kumlar	10000 - 25000
Sıkı Kumlar	50000-100000
KUM ve ÇAKILLAR	80000-200000
Sıkı Kumlu Çakıl Gevşek Kumlu Çakıl	50000 - 140000
Şiltler	2000-20000
Şeyl	1400 - 140000

P-y yöntemini kullanarak yanal yüklere maruz kalan kazıkların analizlerini yapmak veya bazı durumlarda zeminler için elastik yapısal ilişkilere sahip sonlu elemanların analizini yapmak amacıyla, kazık etrafındaki zemin katmanlarının, kayma mukavemetinde bazı basit değişikliklere sahip olduğu varsayılmaktadır.

Literatürde belirtilen en yaygın varyasyonlar Şekil 4.2'de sunulmuştur. Bu şekilde, kayma sertliğinin aşırı konsolide killer için artan derinlikle (Şekil 4.3a) sabit olduğu varsayılabilir. Öte yandan kumlu zeminler için Şekil 4.3b de gösterildiği gibi, sertliğin derinlikle birlikte parabolik arttığı varsayılmaktadır. Benzer bir ifade Hardin ve Drnevich (1972), kumlu zeminler için SI birimlerinde ifade edilen kayma modülü bağıntısını önermişlerdir. (4.2)

$$G_0 = 100 \frac{(3-e)^2}{(1+e)} \sqrt{p'} \quad (4.2)$$

burada G_0 MPa cinsinden kayma gerilmesi modülünü, e kumdaki boşluk oranını ve p' MPa cinsinden efektif yanal gerilmeyi belirtmektedir.

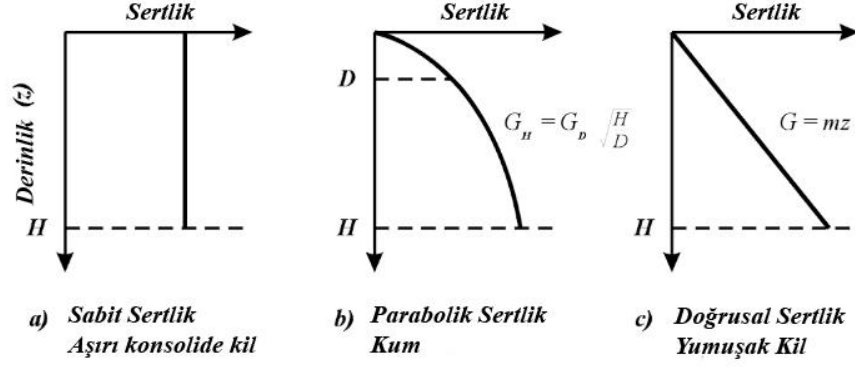


Şekil 4.2: Yük-Deformasyon analizi için alternatif model

Yumuşak kil tabakaları için, Şekil 4.3c'de gösterildiği gibi, sertlikte bir doğrusal değişiklik varsaymak daha uygun olabilir. Sertlikte bu tür basitleştirilmiş varyasyonları kabul etmenin avantajı, sırasıyla p-y tipi ve t-z tipi analizleri için, yatay ve dikey yönde yay sertliğinin hesaplanmasına kolayca dahil edilebilecek olmalarıdır. Benzer şekilde, sürekliliğe dayalı sonlu elemanlar analizleri tekrar deneniyorsa, zemin sertliğindeki bu tür değişiklikler basit uygulama için uygundur. Bu sadeleştirilmiş varyasyonların ancak zemin katmanları homojen olduğunda dikkate alınabileceği belirtilmelidir. İncelenen zemin tabakaları farklı katmanlara sahip olduğunda, uygun yaklaşımlar yapılmalıdır.

Bildik vd. 2012 çalışmalarında içsel sürtünme açısı ve kohezyon gibi taşıma gücü parametrelerini sabit tutarak, elastisite modülündeki değişimin derinlikle ile sabit ve değişken olması durumunun taşıma gücü üzerindeki etkisini incelemiş Plaxis ile yapılan analizler neticesinde, Elastisite modülünün derinlik ile artması halinde taşıma gücünün azaldığı görülmüştür. Sabit alınması durumunda taşıma gücü değerinin, gevşek zemin ortamında farklı elastisite modülü artışı için yaklaşık olarak $\frac{1}{4}$ oranında, sıkı zemin ortamında ise $\frac{1}{6}$ oranında azaldığı gözlemlenmiştir. Elastisite modülü sabit kabul edilmesi halinde zemin koşullarının tüm derinlik seviyelerinde aynı olduğu kabul edilmektedir. Ancak üç eksenli basınç testinden elde edilen elastisite modül

değeri, çevre basıncına karşılık gelmekte, sıklılığa göre bu basıncın meydana geldiği derinlikteki modül değeridir. Bu bağlamda yapılan çalışmada, elastisite modülü değerinin derinlik ile değişken olması kabulü daha gerçekçi bir davranış olduğu ortaya koyulmuştur. (Yağcı, 2014)



Şekil 4.3: İdealize edilmiş zemin sertlik profilleri

Öte yandan kazık davranışını belirlemek amacıyla efektif kazık uzunluğu L_e belirlenmeli ardından elastik kazık uzunluğu olarak tanımlanan T ifadesinin hesaplanması gereklidir.

Sertliğin derinlikle sabit kaldığı durumda

$$L_e = 2D \left(\frac{E_p}{E_{sD}} \right)^{0.25} \quad (4.3)$$

Sertliğin derinlikle parabolik arttığı durumda

$$L_e = 2D \left(\frac{E_p}{E_{sD}} \right)^{0.22} \quad (4.4)$$

Sertliğin derinlikle doğrusal arttığı durumda

$$L_e = 2D \left(\frac{E_p}{E_{sD}} \right)^{0.20} \quad (4.5)$$

$$T = \left(\frac{E_p I_p}{k} \right)^{0.2} \quad (4.6)$$

Burada k ifadesi 200 ile 2000 kN/m³ değerleri arasında değişiklik gösteren, gevşek kum ortamında 2000 kN/m³ kabul edilebilecek zemin modül eğimi olarak tanımlanmaktadır.

$$Z_{\max} = \frac{L}{T} \quad (4.7)$$

Kazık davranış tipini belirlerken kullanılacak olan Z_{\max} değeri 5'ten büyük ise esnek, 5-2,5 arasında ise yarı esnek, 2,5 değerinden daha küçükse rijit kazık olarak tanımlanmaktadır.

4.2.1 Sabit Yatak Katsayısına Göre Tasarım

Yatak katsayısının kazığın her noktasında sabit olduğu kabulü ile yapılacak analitik çözümlerden, kazık şekil değiştirmeleri, eğilme moment dağılımları ve kesme kuvvetleri belirlenebilmektedir.

Kazık elastisite modülü, atalet momenti ve yatak katsayısı bilinen bir kazığın kritik uzunluğu " l_c " aşağıdaki bağıntı ile hesaplanabilmektedir.

$$l_c = 4 \sqrt[4]{\frac{E_p I_p}{k_h}} \quad (4.8)$$

Kazık kritik uzunluğunun kazık boyundan daha kısa olması durumunda kazık uzun kazık olarak tanımlanmaktadır. Uzun kazığa yanal bir kuvvet etkimesi durumunda bu kuvvetin etki bölgesi kazığın belli bir noktasına kadar sınırlı kalmaktadır. P yanal yükü ve M momenti maruz kalmış bir kazığın başlığında meydana gelecek y_0 yer değiştirme ve θ dönme miktarı aşağıdaki bağıntı ile ifade edilebilir. (Matlock ve Reese 1960)

$$y_0 = \sqrt{2} \left(\frac{P}{n} \right) / \left(\frac{l_c}{4} \right)^2 + 1.62 \left(\frac{M}{n} \right) / \left(\frac{l_c}{4} \right)^3 \quad (4.9)$$

$$\theta = 1.62 \left(\frac{P}{n} \right) / \left(\frac{l_c}{4} \right)^3 + 1.73 \left(\frac{M}{n} \right) / \left(\frac{l_c}{4} \right)^4 \quad (4.10)$$

4.2.2 Doğrusal Olarak Artan Yatak Katsayısına Göre Tasarım

Yatak katsayısının kazık boyunca doğrusal olarak artması durumunda ($k_h = nz$) hesaplanacak l_c kritik kazık uzunluğunu veren bağıntı aşağıdaki şekilde ifade edilmektedir.

$$l_c = 4\sqrt[5]{\frac{E_p I_p}{n}} \quad (4.11)$$

P yanal yükü ve M momenti maruz kalmış bir kazığın başlığında meydana gelecek y_0 yer değiştirme ve θ dönme miktarı aşağıdaki bağıntı ile ifade edilebilir. (Matlock ve Reese, 1956):

$$y_0 = 2.43\left(\frac{P}{n}\right) / \left(\frac{l_c}{4}\right)^2 + 1.62\left(\frac{M}{n}\right) / \left(\frac{l_c}{4}\right)^3 \quad (4.12)$$

$$\theta = 1.62\left(\frac{P}{n}\right) / \left(\frac{l_c}{4}\right)^3 + 1.73\left(\frac{M}{n}\right) / \left(\frac{l_c}{4}\right)^4 \quad (4.13)$$

4.3 Broms Yöntemi

Broms (1964 a-b) kohezyonlu ve kohezyonsuz zeminlerde teşkil edilen kazıkların davranışlarını ayrı ayrı incelemiştir.

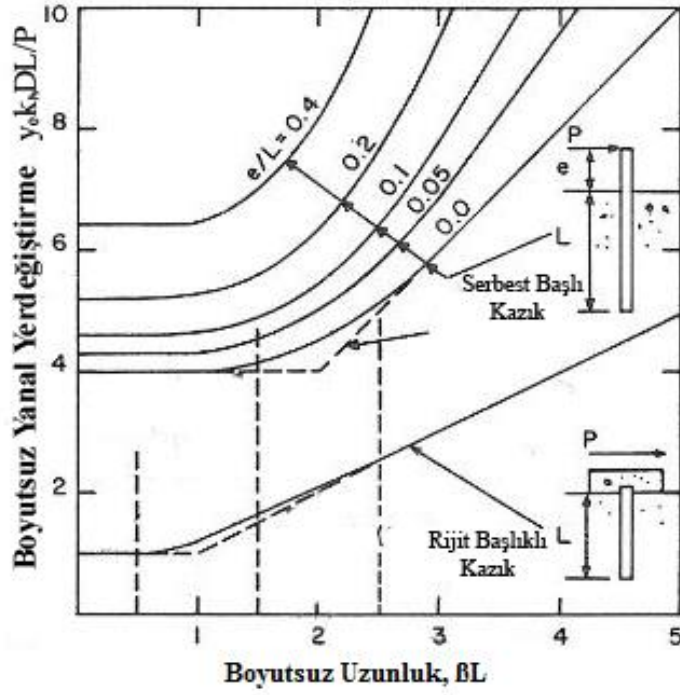
4.3.1 Kohezyonlu Zeminlerin İncelenmesi

Broms (1964 a-b) kohezyonlu zeminler için yapmış olduğu çalışmada zeminin “ideal elastik” davranış gösterdiğini varsayarak hesap yapmaktadır. Bu yöntem ile zeminin göstermiş olduğu davranışı yanal yatak katsayısı yardımı ile iyi bir şekilde gösterdiği kabul edilmektedir.

4.3.1.1 Yer değiştirmeler

Kohezyonlu zeminlerde meydana gelen yer değiştirme miktarı, eğilme momenti ve zemin reaksiyon kuvveti, boyutsuz olarak tanımlanan “ βL ” uzunluğuna gore değişkenlik gostermektedir. Kohezyonlu zeminlerdeki kazıkların yanal yer değiştirmelerini belirlemek için kullanılan abak Şekil 4.4’de gosterilmektedir.

$$\beta = \sqrt[4]{\frac{k_h D}{4E_p I_p}} \quad (4.14)$$



Şekil 4.4: Killi zeminlerde kazığın yanal yer değiştirmesi (Broms, 1964 a)

Serbest Başlı Kazıklarda, $\beta L < 1.5$ ise $y_0 = \frac{4P(1 + \frac{1.5e}{L})}{k_h DL}$ (4.15)

Rijit Başlıklı Kazıklarda $\beta L < 0.5$ ise $y_0 = \frac{P}{k_h DL}$ (4.16)

Sonsuz uzun olarak tanımlanan kazıklarda ise:

$$\text{Serbest Başlı Kazıklarda,} \quad \beta L > 2.5 \text{ ise } y_0 = \frac{2P\beta(e\beta + 1)}{k_h D} \quad (4.17)$$

$$\text{Rijit Başlıklı Kazıklarda} \quad \beta L > 1.5 \text{ ise } y_0 = \frac{P\beta}{k_h D} \quad (4.18)$$

Kısa kazık olarak tanımlanan kazık türlerindeki kazık boyundaki artış, kazık başlığının zemin seviyesindeki yer değiştirmeleri önemli seviyede azaltmaktadır. Ancak kazık rijitliğinin etkisi bulunmamaktadır. Serbest başlıklı kısa kazıkların zemin seviyesindeki yanal yer değiştirmeler, rijit başlıklı kazıklarinkinden teorik olarak yaklaşık bir değer ile 4 katı kadar daha fazladır.

Uzun kazık türlerinde, βL değeri, rijit başlıklı ise 1.0, serbest başlıklı olması durumunda 2.0 den büyük olması halinde, zemin ve kazık özelliklerinin, y_0 'ın belirlenmesinde etkisi bulunmamaktadır.

4.3.1.2 Kazık Yanal Direnci

Kazığın güvenle taşıyabileceği maksimum yüke yaklaşıldıkça, artan yüklere bağlı meydana gelen yer değiştirmelerde hızla artmaktadır. Kazık yanal direnci, kazık kırılma mekanizmasına bağlı olarak kazık akma gerilmesi ve zemin kayma direnci ile belirlenmektedir. Kazıkların yanal direncini araştıran Broms (1964 a-b) hiperstatik sistemlerde plastisite yöntemi ile hesaplandığı gibi, en çok zorlama meydana gelen bölgelerde plastik mafsall oluşumunu ve kazıkta kırılma meydana geleceğini kabul etmiştir. Plastik mafsalların oluştuğu bölgelerde moment değeri aynı kalacağından statik açıdan belirsizlik ortadan kalkacaktır.

Kohezyonlu zeminlerde teşkil edilen kazıkların yanal dirençlerini hesaplarken kazıkları serbest başlıklı ve rijit başlıklı olmak üzere iki başlık altında incelemek gerekmektedir.

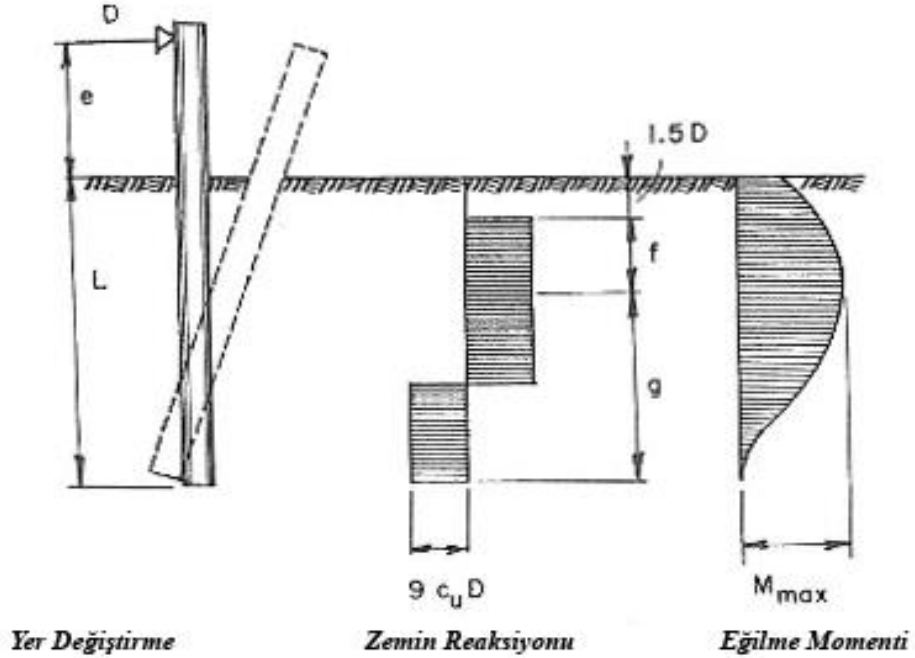
Serbest Başlıklı Kazıklar:

Uzun ve kısa kazıklar olarak iki başlıkta incelemek mümkündür. Kısa kazık olması durumunda kazıkta oluşacak yanal direnç, zemin direnci tarafından tayin edilir (Şekil 4.5). Uzun kazık olması durumunda ise, kazık kesitinde oluşacak akma momenti hesaplamalarda esas alınır (Şekil 4.6). Uzun ve kısa kazıkların birbirinden ayrılması için, kazık kesitine etki eden maksimum moment hesaplanıp, bu değer kazık akma momenti değerinden az olup olmamasına dikkat edilir.

Kesitte maksimum momentin meydana geldiği noktada kesme kuvveti değeri de sıfır olacağı için maksimum moment etkisi altında kalan kesit derinliğini gösteren “ f ” uzunluk değeri aşağıdaki bağıntı ile tespit edilebilir.

$$f = \frac{P_n}{9s_u D} \quad (4.19)$$

Burada P_n kazık tarafından taşınabilecek nihai yanal yükü, s_u drenajsız üç eksenli basınç deneyi yardımı ile bulunan kohezyon değerini göstermektedir.



Şekil 4.5: Kısa kazıkların yanal direnci - Kohezyonlu zemin (Broms, 1964a)

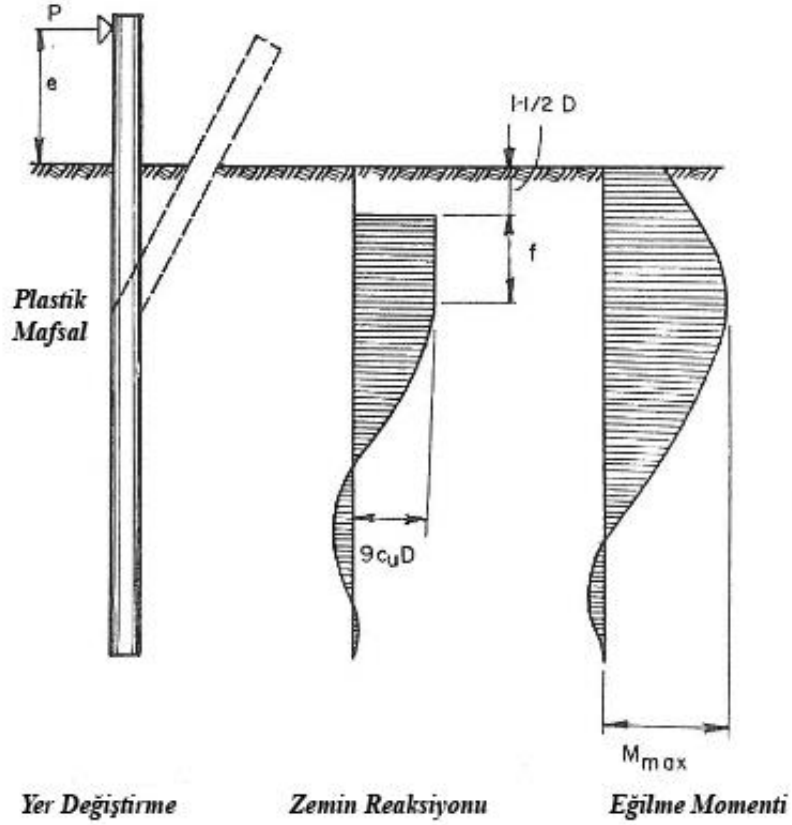
Kısa kazık durumunda, aynı kesitteki moment değeri (Şekil 4.5):

$$M_{\max} = 2.25Dg^2s_u = P(e+1.5D+0.5f) \quad (4.20)$$

formülasyonu ile gösterilebilir. Bununla birlikte kazık boyu:

$$L = 1.5D + f + g \quad (4.21)$$

olarak görülmektedir. Verilen bağıntılar yardımı ile P_n için bir çözüm elde etmek mümkündür.



Şekil 4.6: Uzun kazıkların yanıl direnci - Kohezyonlu Zemin (Broms, 1964a)

Uzun kazık durumunda,

$$M_{\max} = M_{\text{akma}} \quad (4.22)$$

şeklinde yazılabileceği için, 4.19 ve 4.20 ifadeleri yardımı ile yanıl yük hesaplanması mümkündür.

Rijit Başlıklı Kazıklar:

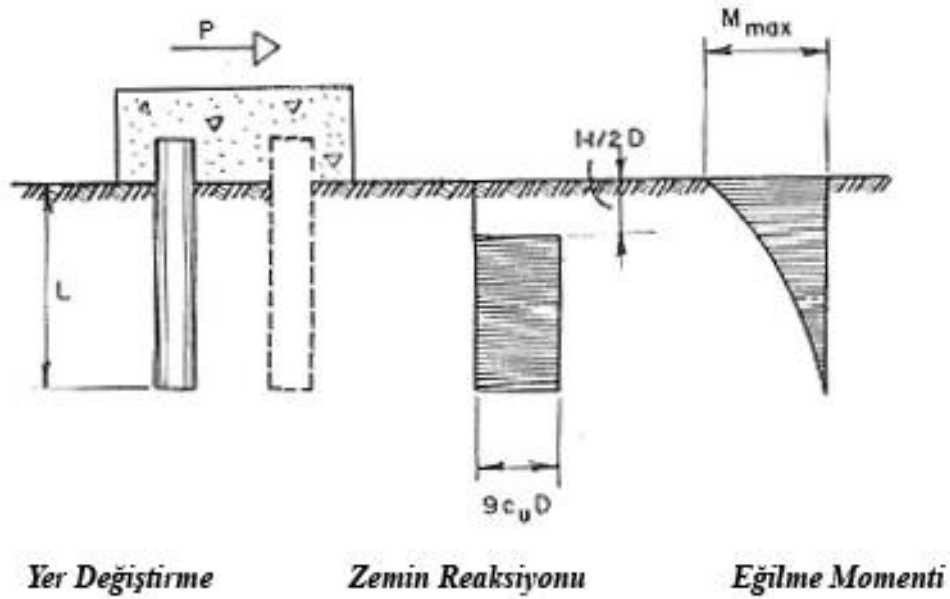
Rijit başlıklı kazıklarda oluşacak mekanizmalardan hangisinin seçileceği, kazık kesitindeki akma momentinin, kazıkta oluşacak maksimum momente eşit olup olmadığı araştırılarak belirlenmektedir.

Kısa kazık durumunda maksimum moment ve nihai yük aşağıdaki bağıntılar yardımı ile hesaplanır. Kazığın kısa olması durumunda yanıl kuvvet kazıkta ötelenme etkisi oluşturmaktadır.

$$P_n = 9s_u D(L - 1.5D) \quad (4.23)$$

$$M_{maks} = P_n(0.5L + 0.5D) \leq M_{akma} \quad (4.24)$$

Rijit başlıklı kısa kazıkların öngörülen yer değiştirme, zemin reaksiyonu ve eğilme momentleri Şekil 4.7’de gösterilmektedir.

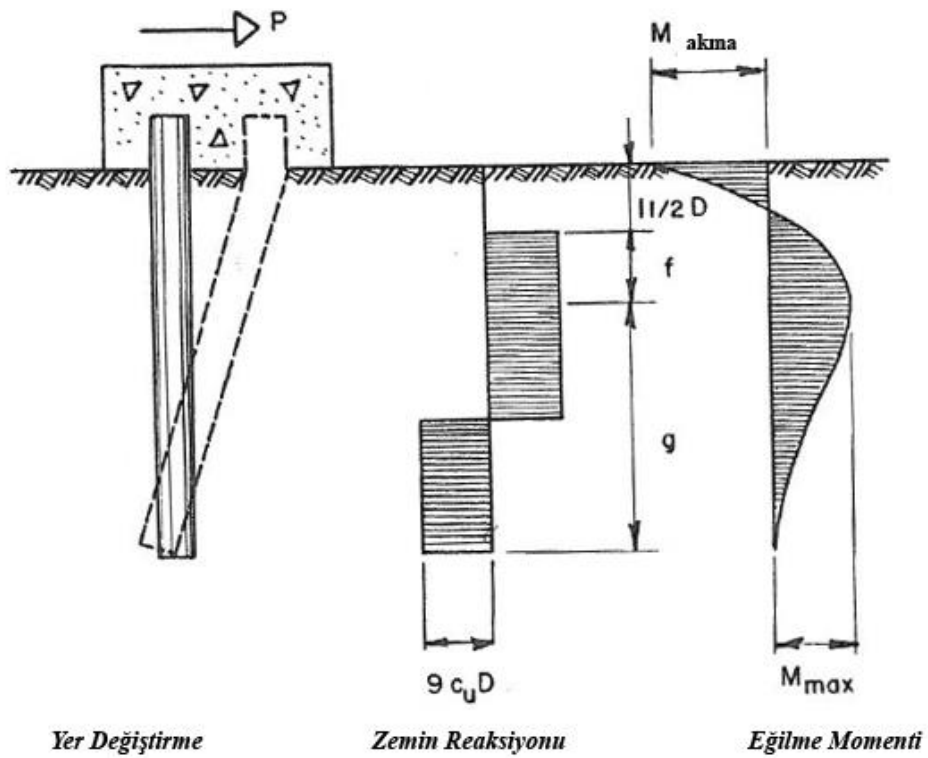


Şekil 4.7: Rijit başlıklı kısa kazıkların yanıl direnci - Kohezyonlu zemin (Broms, 1964a)

Uzun kazık durumu için 4.19 denkleminde ifade edilen kırılma mekanizması geçerlidir. Zemin seviyesinde kazık eksenini üzerindeki bir noktaya göre moment alınması halinde aşağıdaki ifade elde edilir.

$$M_{akma} = 9s_u Dg(0.75g + f + 1.5D) - 9s_u D(f + 0.5g)(0.5f + 0.25g + 1.5D) \quad (4.25)$$

Bu eşitlik ile birlikte 4.21 eşitliği göz önüne alınması durumunda nihai yanıl yük için bir çözüm elde edilebilir. Şekil 4.8'de gösterilen orta boy kazık durumu için, $1.5D + f$ derinliğinde oluşan maksimum moment değerinin kazığın akma momenti değerinden küçük olması gerekir. Aksi takdirde, Şekil 4.9'da belirtilen uzun kazık durumu oluşur.



Şekil 4.8: Rijit Başlıklı Orta Boy Kazıkların Yanal Direnci - Kohezyonlu zeminler (Broms, 1964a)

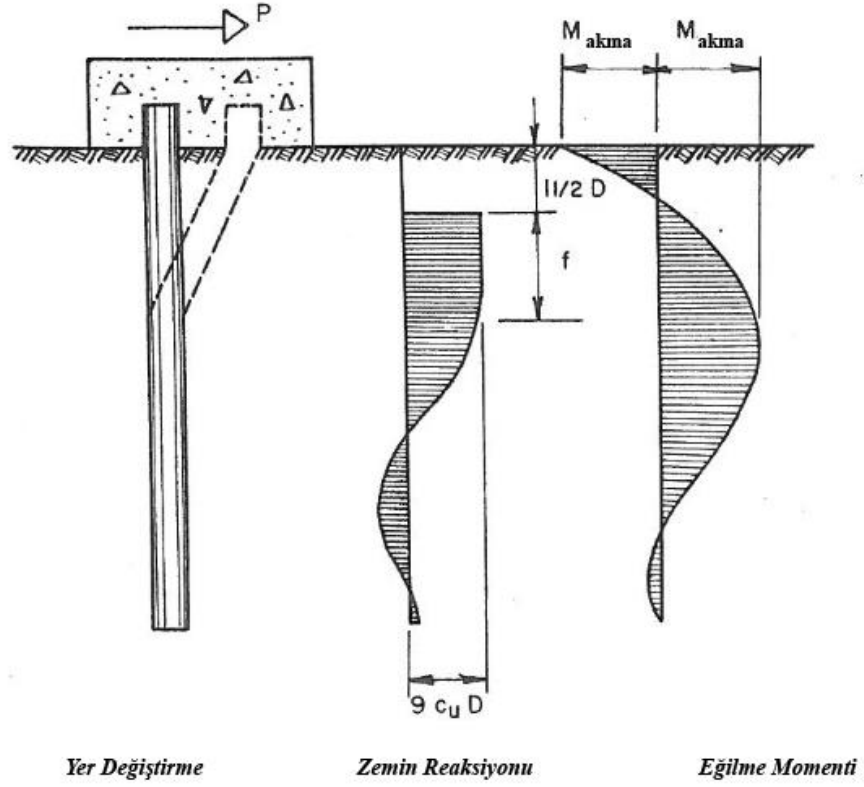
Rijit başlıklı uzun kazık durumunda nihai yük aşağıdaki eşitlikle ifade edilir.

$$P_n = \frac{2M_{akma}}{1.5D + 0.5f} \quad (4.26)$$

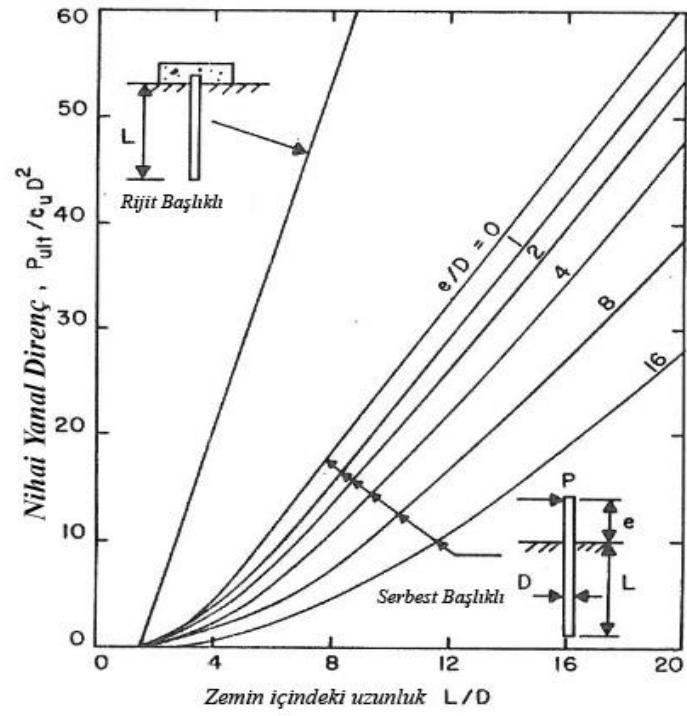
Denklem 4.11 kullanılarak aşağıdaki eşitlik elde edilir.

$$P_n^2 + 27s_u D^2 P_n - 36s_u D M_{akma} = 0 \quad (4.27)$$

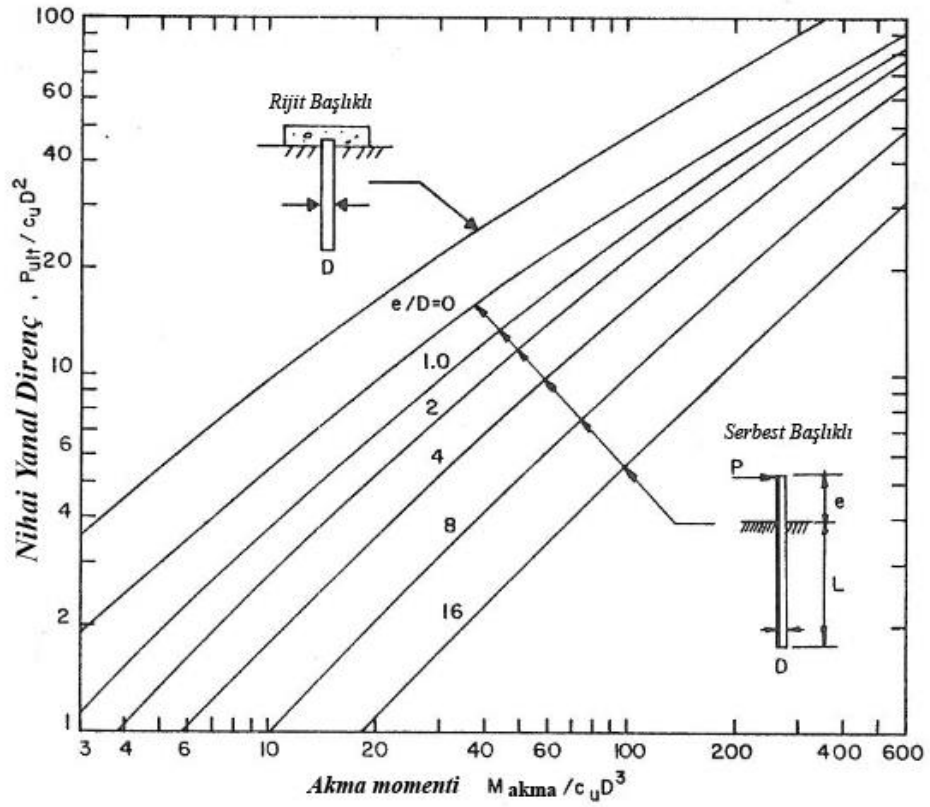
Kohezyonlu zeminlerde kullanılan serbest başlıklı ve rijit başlıklı kazıkların nihai yanal yükleri, P_n Şekil 4.10 ve Şekil 4.11’de ki abaklar yardımı ile kolaylıkla bulunabilir.



Şekil 4.9: Rijit başlıklı kazıkların yanal direnci - Kohezyonlu zemin (Broms, 1964a)



Şekil 4.10: Kısa kazıkların nihai yanıl yükünün bulunması - Kohezyonlu zeminler (Broms, 1964a)



Şekil 4.11: Uzun kazıkların nihai yükünün bulunması - Kohezyonlu zeminler (Broms, 1964a)

4.3.2 Kohezyonsuz Zeminlerin İncelenmesi

Kohezyonsuz zeminlerde yanal yatak katsayısı derinlikle birlikte artmaktadır.

$$k_h = \frac{n_h z}{D} \quad (4.28)$$

Burada n_h terimi için önerilen bazı yanal yatak katsayı değerleri Tablo 4.2'de verilmiştir. Boyutsuz derinlik ifadesi ηL olarak yazılabilir. Burada η ,

$$\eta = \sqrt[5]{\frac{n_h}{E_p I_p}} \quad (4.29)$$

ifadesi ile hesaplanır.

Tablo 4.2: Yanal yatak katsayısı değerleri (Davisson, 1970)

<i>Zemin Cinsi</i>	<i>Yanal Yatak Katsayısı</i>
Ayrık Daneli Zeminler	$n_h = 0.5-50 \text{ MN/m}^3$ arasında değişir, çoğu zaman $3-30 \text{ MN/m}^3$ arasındadır.
Normal konsolide organik silt	$n_h = 0.1-0.8 \text{ MN/m}^3$
Turba	$n_h = 0.05 \text{ MN/m}^3$
Killi zeminler	$n_h = 67 s_u$

4.3.2.1 Yer değiştirmeler

Kohezyonsuz zeminlerde kazık başlığında oluşacak yatay yer değiştirme miktarı aşağıda verilen eşitlikler yardımı ile hesaplanır:

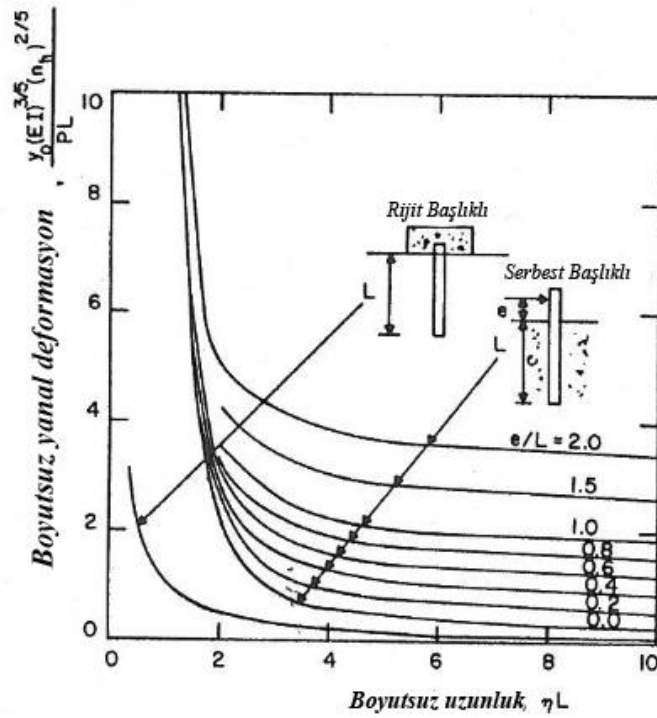
$$\text{Rijit başlıklı kısa kazıklarda} \quad y_0 = \frac{2P}{L^2 n_h} \quad (4.30)$$

$$\text{Rijit başlıklı ve } \eta L > 4 \text{ olan kazıklarda} \quad y_0 = \frac{0.93P}{\sqrt[5]{n_h^3 E_p^2 I_p^2}} \quad (4.31)$$

Serbest başlıklı ve $\eta L > 2$ olan kazıklarda
$$y_0 = \frac{18P(1 + \frac{4e}{3L})}{L^2 n_h} \quad (4.32)$$

Serbest başlıklı ve $\eta L > 4$ olan kazıklarda
$$y_0 = \frac{2.4P}{\sqrt[5]{n_h^3 E_p^2 I_p^2}} \quad (4.33)$$

Kohezyonsuz zeminlerdeki kazıkların yanıl yer değiştirmelerini belirlemek için kullanılan abak Şekil 4.12’de gösterilmektedir.



Şekil 4.12: Kohezyonsuz zeminlerde kazığın yanıl yer değiştirmesi (Broms, 1964a)

4.3.2.2 Kazık Yanıl Direnci

Kohezyonsuz zeminlerde bulunan kazıkların yanıl dirençleri, kazığın kırılma Şekline ve mekanizmasına göre zemin kayma dayanımı veya kazık akma gerilmesine göre değişkenlik gösterir. Kazığın maksimum taşıyabileceği yük miktarına erişilirken yük miktarı arttıkça doğru orantılı olarak meydana gelen yer değiştirmelerde artmaktadır.

Kohezyonsuz zeminlerde kazık yanal direnci hesaplanırken Broms şu kabulleri yapmıştır:

- Kazığın arka bölgesindeki aktif itki kuvveti göz ardı edilir.
- Kazık ön bölgesindeki pasif kuvvet, Rankine'in plastik denge durumunda hesaplanacak olan değer 3 katı olmalıdır.
- Kazık kesit şekli toprak basıncı dağılımı ve yanal direnci etkilememektedir.
- Yanal direncin tamamen aktif hale gelmesi göz önünde bulundurulmuş yer değiştirmelerin meydana gelebilmesi ile mümkündür.

İkinci maddedeki kabule göre, z derinliğinde yanal toprak basıncı:

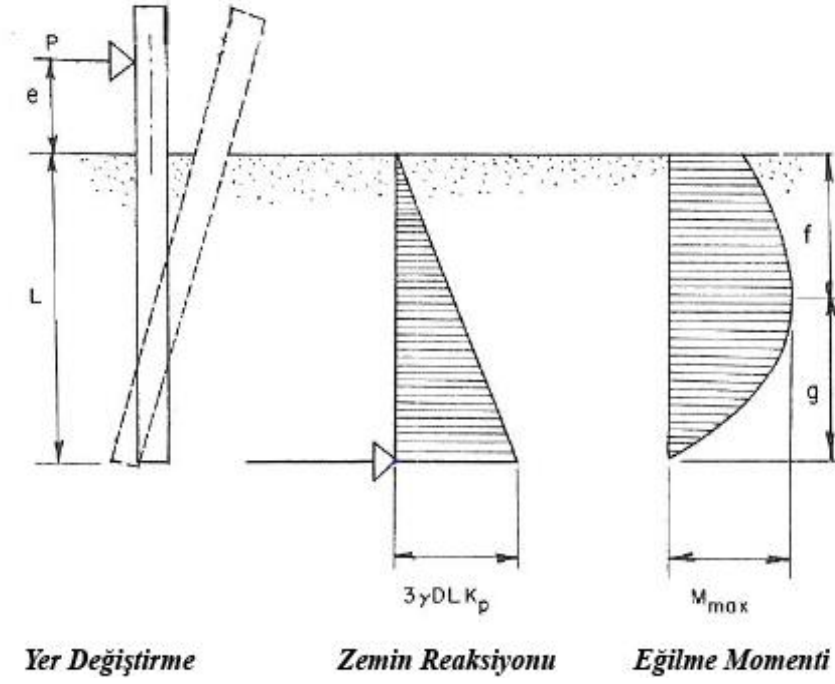
$$P = 3D\gamma zK_p \quad (4.34)$$

olarak yazılabilmektedir. K_p pasif toprak basınç katsayısını göstermekle birlikte drenajlı deneyler yardımı ile bulunan ϕ' parametresine bağlı olarak hesaplanır.

$$K_p = \frac{1 + \sin \phi'}{1 - \sin \phi'} \quad (4.35)$$

Serbest Başlıklı Kazıklar:

Serbest başlıklı bir kazık kesitine etki eden moment ve toprak basıncı dağılımı Şekil 4.13 ve Şekil 4.14'de gösterilmektedir.



Şekil 4.13: Kısa kazıkların yanıl direnci - Kohezyonsuz zeminler (Broms, 1964b)

Kazık kesitinde oluşlan moment, kazık kesitindeki akma moment değerinden küçükse, kazık, kısa kazık olarak tanımlanmaktadır. Ayrıca maksimum taşıyabileceği yanıl kuvvet:

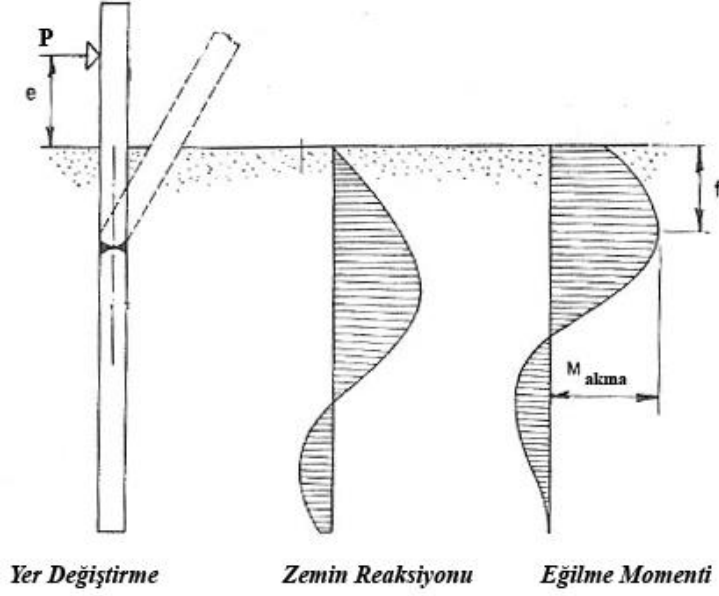
$$P_n = \frac{0.5\gamma DL^3 K_p}{3 + L} \quad (4.36)$$

olarak hesaplanmaktadır. Kesitte oluşacak maksimum moment zemin yüzeyinden f mesafesi kadar derinlikte meydana gelmektedir. Bu noktada kesme kuvveti sıfırlanacağı ve maksimum moment oluşacağı için:

$$f = 0.82 \sqrt{\frac{P}{\gamma DK_p}} \quad (4.37)$$

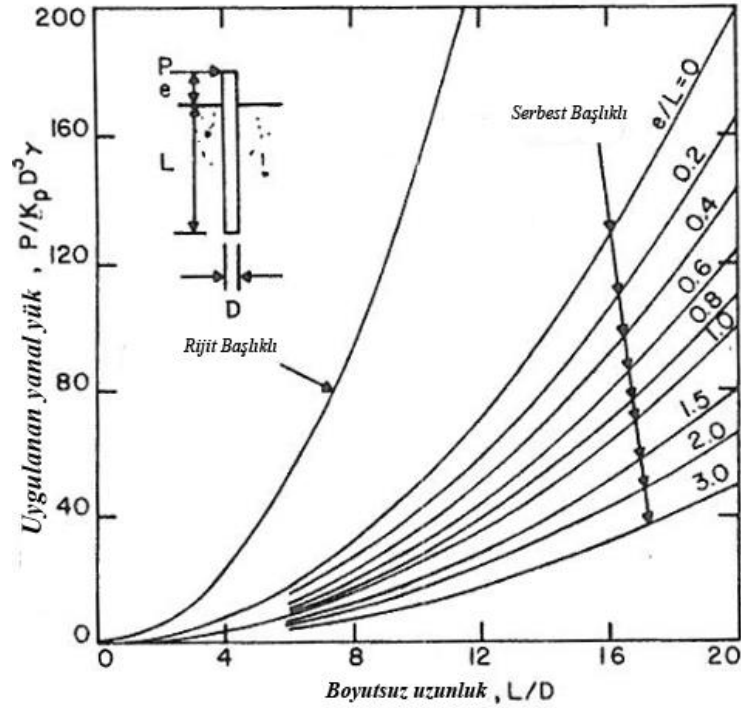
$$M_{maks} = P \left[e + \left(\frac{2f}{3} \right) \right] \quad (4.38)$$

olarak yazılır.

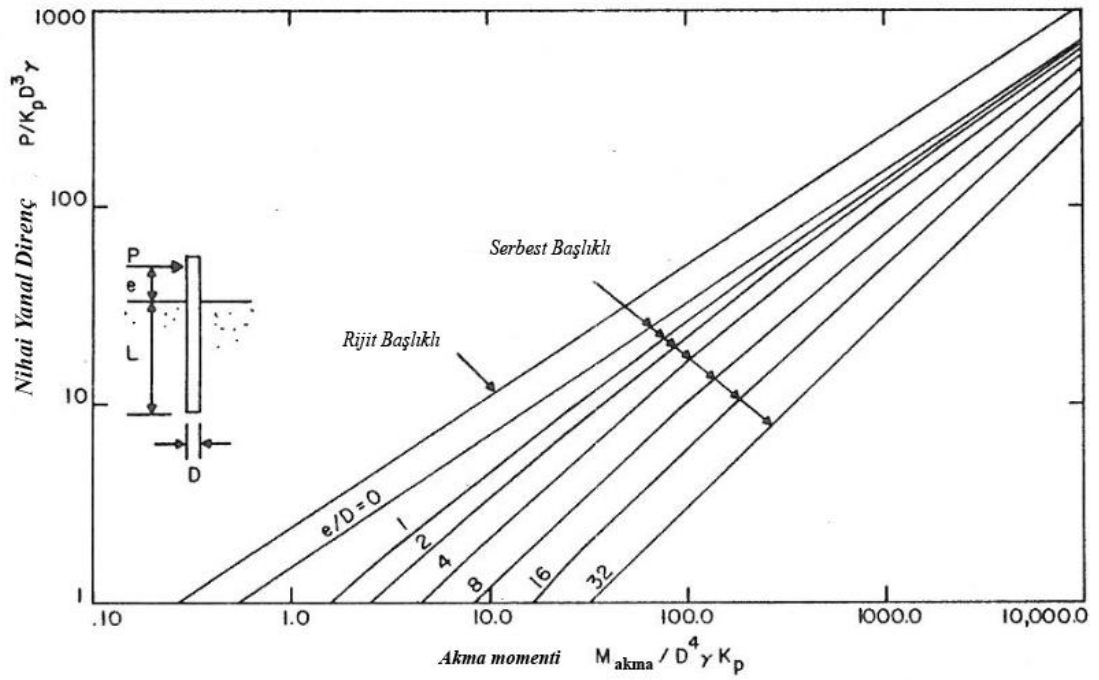


Şekil 4.14: Uzun kazıkların yanal direnci - Kohezyonsuz zeminler (Broms, 1964b)

Eğer, 4.38 eşitliği yardımı ile hesaplanan moment değeri, kesitin akma moment değerinden büyük ise uzun kazık olarak davranır (Şekil 4.14). Bu sayede, f kadar derinlikte plastik mafsall oluşumu gözlenir, nihai yanal direnç ise 4.37 ve 4.38 eşitlikleri yardımı ile hesaplanır. (Şekil 4.15 – Şekil 4.16)



Şekil 4.15: Kısa kazıkların nihai yanal yüklerinin bulunması - Kohezyonsuz zeminler (Broms, 1964b)



Şekil 4.16: Uzun kazıkların nihai yanal yüklerinin bulunması - Kohezyonsuz zeminler (Broms, 1964b)

Rijit Başlıklı Kazıklar:

Rijit başlıklı bir kazığın yanal direnci hesaplanırken üç ayrı durumda incelenmektedir: uzun, orta ve kısa kazık. Kısa kazık şeklinde tanımlanması durumunda, maksimum moment değerinin, başlık bölgesinin hemen alt kısmında meydana gelmesi beklenmektedir. Şekil-4.17 Bu durumda, maksimum yanal dayanım zemin pasif direncine eşit olur. Ayrıca maksimum moment değeri de kolaylıkla hesaplanabilir.

$$P_n = 1.5\gamma L^2 DK_p \quad (4.39)$$

$$M_{maks} = \frac{2PL}{3} \quad (4.40)$$

Maksimum moment, kesitteki akma momenti değerine ulaşması durumunda orta kazık olarak tanımlanmaktadır (Şekil 4.18). Buna bağlı olarak rijit başlığın altında plastik mafsal oluşması beklenir. Kazığın dönmesiyle birlikte ortaya çıkacak olan pasif toprak direnci etkisi yerine kazık alt uç noktasına bir F kuvveti etki ettirilir. Kuvvetlerin eşitliği prensibinden:

$$F = \left(\frac{3}{2}\right) \gamma D L^2 K_p - P \quad (4.41)$$

eşitliği yazılır. Başlığın hemen altında yer alan noktaya göre moment alınıp F değeri yerine konulursa,

$$M_{akma} = 0.5 \gamma D L^3 K_p - P_n L \quad (4.42)$$

ifadesi bulunur. Bu denklemden nihai direnç değerini elde etmek mümkündür.

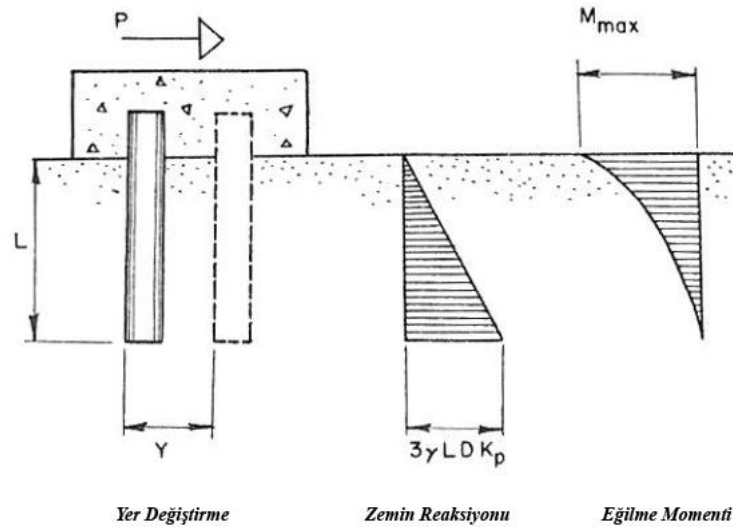
$$P_n = \frac{M_{akma} - 0.5 \gamma D L^3 K_p}{L} \quad (4.43)$$

Orta boy kazık durumu, zemin yüzeyinden herhangi f derinliği kadar aşağıda eğilme moment değerinin kazık akma moment değerinden küçük olabildiği durumlarda geçerlidir. Buna mukabil f derinliğindeki ikinci plastik mafsall oluşumu ile (Şekil 4.19) uzun kazık durumu oluşmaktadır.

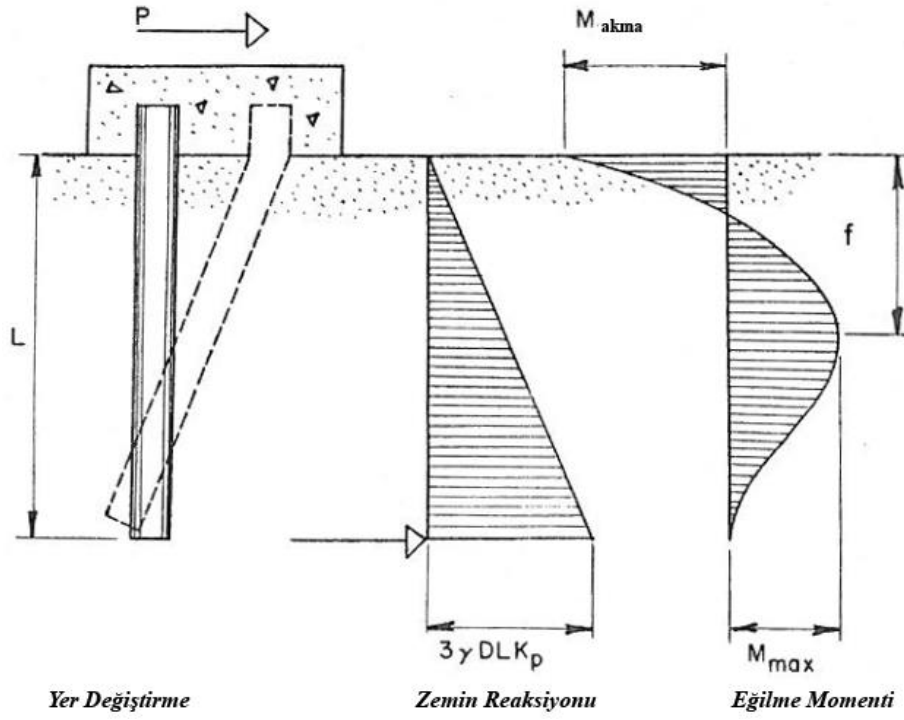
Bu durumda ise nihai yük hesabı aşağıdaki bağıntı yardımı ile hesaplanmaktadır.

$$P_n = \left[e + \frac{2}{3} f \right] = 2 M_{akma} \quad (4.44)$$

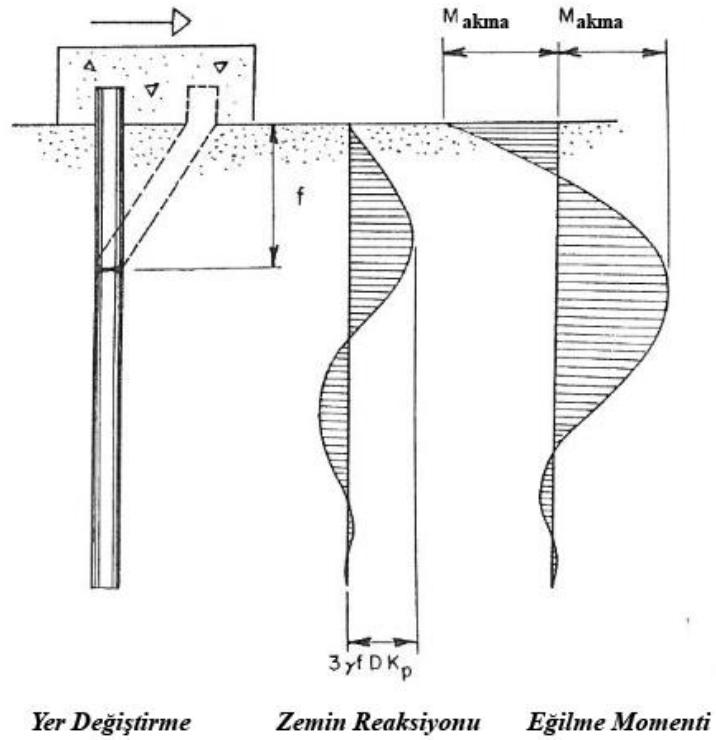
Ayrıca uzun ve kısa kazık durumlarındaki nihai yük değerleri, Şekil 4.15 ve Şekil 4.16' da yer alan diyagramlar yardımı ile bulunabilir.



Şekil 4.17: Rijit başlıklı kazıkların yanal direnci - Kohezyonsuz zeminler (Broms, 1964b)



Şekil 4.18: Rijit başlıklı kazıkların yanal direnci - Kohezyonsuz zeminler (Broms, 1964b)



Şekil 4.19: Rijit başlıklı uzun kazıkların yanal direnci - Kohezyonsuz zeminler (Broms, 1964b)

5. KAZIKLARDA GRUP ETKİSİ

Kazıklı temeller, genellikle üç veya daha fazla kazığın birlikte yerleştirilmesi ile kullanılırlar. Grupta yer alan kazıkların aralarındaki mesafeler önemlidir. Eğer aralarındaki mesafe $2,0D-2,5D$ veya merkezleri arasındaki mesafe 60 cm 'den az ise, hizalama ve yerleştirme hataları için yeterli düzeyde yer bulunmayabilir. Aksine, kazık aralıkları çok geniş olması durumunda, kazıkla birlikte teşkil edilen kazık başlığı çok büyük olabilir. Bu durum ise ekonomik tasarım açısından istenmemektedir. Bu sebeple, kazık yerleşiminde merkezden merkeze $2,5D-3,0D$ aralık seçimi uygun olacaktır.

Bir grupta yer alan kazıklar ve zemin arasındaki etkileşim tahmin edildiğinden çok daha karmaşıktır. Grubun nihai yük taşıma kapasitesi tek bir kazığın kapasitesi ile kazık sayısının çarpımına eşit olmamaktadır. Bu durum kazıklarda grup etkisi olarak isimlendirilmektedir.

Kazıklarda grup etkisini etkileyen bir çok faktör bulunmaktadır. Kazık sayısı, aralığı, boyu ve çapı, yük aktarma biçimleri, kazık yerleşiminde kullanılan imalat usulleri, yerleşim şekli, zemin tipi, uygulamadan sonra geçen zaman ve uygulanan yükün yönü olarak bunları sıralamak mümkündür.

5.1 Converse-Labarre Formülü

Hesaplamalarda kullanılacak, izin verilebilir kazık grubu yük kapasitesini belirlemek için etki faktörü değeri bulunmaktadır.

$$Q_{FG} = \eta N Q_F \quad (5.1)$$

Q_{FG} : Kazık grubu izin verilebilir yük kapasitesi

Q_F : Tek bir kazığın izin verilebilir yük kapasitesi

η : Grup etki faktörü

N : Gruptaki kazık sayısı

Gruplarda izin verilebilir yük hesap edilirken, başlığın tabanı ile altta yer alan zemin arasında etki eden temas basıncı her zaman göz ardı edilmektedir.

Converse ve Labarre grup etkisini araştıran ilk araştırmacılar arasında yer almaktadır. Ancak, grup etki faktörünü hesaplayacak bir formül geliştirmek için ellerinde çok az deney verisi olması nedeniyle, grup kazık etkisi ve geometrisi arasında varsayılan ilişkileri incelemişlerdir. Bu sayede, Converse-Labarre verimlilik formülüne bir temel oluşturmuşlardır. (Bolin, 1941) Grup etki faktörünü elde etmek için önerilen ifade (Bağıntı 5.2 ve 5.3)'de gösterilmektedir.

$$\eta = 1 - \theta \frac{(n-1)m + (m-1)n}{90mn} \quad (5.2)$$

$$\eta = \frac{2s(m+n) + 4B}{\pi mnB} \leq 1 \quad (5.3)$$

n : Gruptaki kazık sıra sayısı

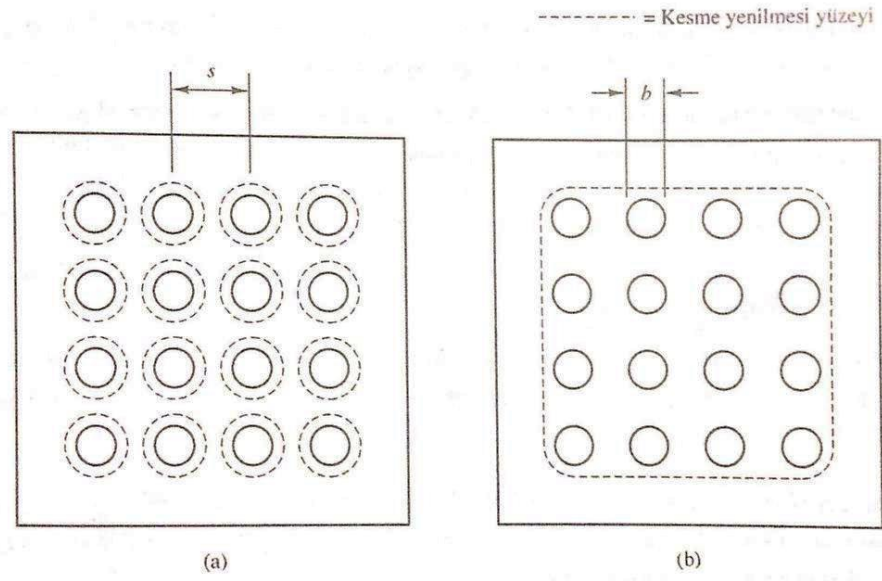
m : Bir sıradaki kazık sayısı

θ : $\tan^{-1}(B/s)$ (derece)

B : Tek bir kazığın çapı

s : Merkezden merkeze kazıklar arasındaki mesafe

Diğer bir yaklaşım, Şekil 5.1'de gösterildiği üzere, tek göçme ve blok göçmesini karşılaştırmaktır. Tek göçme olarak adlandırılan göçme tipi, kazıklar arasında bulunan zeminin sabit kalması ve kazıkların onu delip geçmesi olarak tanımlanmaktadır. Blok göçme ise zeminin kazıklarla birlikte hareket etmesi ve zemin ile kazık grubunun bir bütün olarak göçmesi olarak nitelendirilmektedir. Blok göçme, kazıkların çevrelerinin toplamı, grubu oluşturulan bir kazığın çevresinden daha büyük ise etkili olmakta ve grup etki faktörü bu iki çevre uzunluklarının oranı olarak varsayılmaktadır.



Şekil 5.1: Kazık gruplarında yenilme tipleri: a) münferit yenilmeler, b) blok yenilmeler

Grup verimliliği ile ilgili verilen eşitlikler hesaplamalarda geniş çapta tercih edilmesine rağmen, öncelikle varsayım ve önseziye dayanmaktadır. Bunları doğrulamak amacıyla çok az veriye sahip olunması, diğer araştırmacıları grup kazıklarında verimliliği araştırmak amacıyla bir çok model yük deneyleri yürütmesine teşvik etmiştir. Yürütülen deney çalışmaları bazı öngörüler sağlamasına karşın, deney ölçeğinin gerçeğe oranla küçük olması, gerçek zemine ait davranışın tam olarak yansıtılamaması, modeldeki efektif gerilme farklılıkları, sonuçları yorumlamayı güçleştirmiştir.

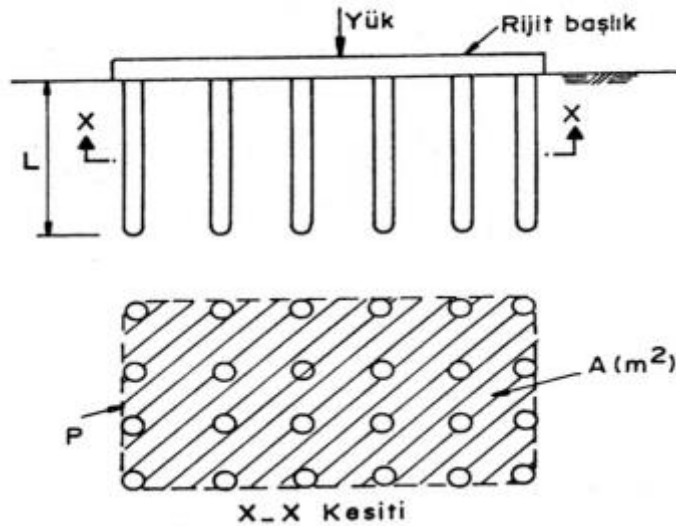
Grup kazıklar için tam ölçekli statik deneyler, model deneyler ile yapılan çalışmalarda karşılaşılan problemlerin üstesinden gelmede yardımcı olmakta ancak ne yazık ki bu çalışmayı yürütmek ekonomik açıdan büyük külfet oluşturmaktadır.

5.2 Terzaghi Blok Yaklaşımı

Terzaghi ve Peck (1967) kazıklı temelleri bir “Blok Derin Temel” olarak davranacağını varsaymış ve bundan hareketle bir hesap yaklaşımı geliştirmişlerdir. Yukarıda paragraflarda aktarılan hesap yöntemlerinin, zemin parametrelerini doğrudan hesaba katılmamakta olduğu görülmektedir. Terzaghi ve Peck (1967) methodu zemin parametrelerini de hesaba katmaktadır.

Kazıklı bir temelin blok olarak davranması sürekli karşılaşılan bir durum olmamakla beraber bu davranışı büyük ölçüde kazıklar arası mesafe etkilemektedir. Kazık grubunun hangi aşamada tekil kazık davranışından blok kazık davranışına geçeceği net olarak bilinmemektedir. Bu problemin aşılmasına yönelik her zaman geçerli olacak bir yöntem geliştirmek için; Terzaghi ve Peck tekil kazığın göçmesi ile blok göçmesi durumunu ayrı ayrı irdeleyen bir yaklaşım önermişlerdir. Aşağıda belirtildiği gibi bu yaklaşım kendi içerisinde iki aşamalı bir çözüm yolu içermektedir. Ayrıca bahsi geçen sistemin idealize edilmiş sistem modeli Şekil 5.2’de gösterilmektedir.

- 1) Kazık başlığı rijit kabul edilir.
- 2) Kazık grubunun yer aldığı zemin kazıklarla beraber bütün olarak davranır.



Şekil 5.2: Kazıklardaki grup etkisi (Terzaghi ve Peck,1967)

Terzaghi-Peck yönteminde, kazık grubu blok çevresi ile tabana etkiyen kuvvetlerin dengesi ele alındığında aşağıda ifade edilen şekilde toplam taşıma gücü hesaplanmaktadır.

$$Q_{FG} = PLs_u + Aq_f - AL\gamma \quad (5.4)$$

s_u = Kazık bloğunu etrafındaki zemine ait ortalama kayma mukavemeti,

L = Zemin içerisindeki kazık uzunluğu,

P = Kazık grubunun plandaki toplam çevre uzunluğu,

A = Kazık grubunun plandaki alanı,

γ = Zemin birim hacim ağırlığı,

Killi zeminler için önerilen q_f değeri;

$$q_f = 1.3cN_c + \gamma L \quad (5.5)$$

Bağıntı 5.4 yardımı ile hesaplanan grup taşıma gücü değeri, her bir kazığa ait taşıma gücü değerlerinin toplamı ile karşılaştırılmaktadır. Bağıntı yardımı ile hesaplanan değer her bir kazığın toplamından hesaplanan değerden büyük olması durumunda küçük değer alınmaktadır.

5.3 Tomlinson Yaklaşımı

Tomlinson (1994), kazık grubuna ait taşıma gücünü belirlemek için başka bir ifade geliştirmiştir. Terzaghi'nin önerdiği taşıma gücü bağıntısıyla benzerlikler göstermesine karşın, bu ifade ile arasında bazı farklılıklar bulunmaktadır. Önerdiği bağıntıda “ κ ” şekil faktörünü göz önüne almıştır. Şekil faktörü kazık grubunun plandaki uzunluk/genişlik oranına göre değişkenlik göstermektedir. Bu oranın 3 olduğu zaman κ değeri 1,05 olmakta, oranın daha büyük olması halinde ise daha küçük değerler almaktadır. Oranın 2 olduğu zaman ise 1,10 değerini önermektedir.

Tomlinson (1994) tarafından önerilen bağıntı aşağıda gösterilmektedir.

$$Q_{FG} = 2(B_g + L_g)L\bar{s}_u + 1.3s_uN_c\kappa B_g L_g \quad (5.6)$$

B_g : Kazık bloğu genişliği

L_g : Kazık bloğu uzunluğu

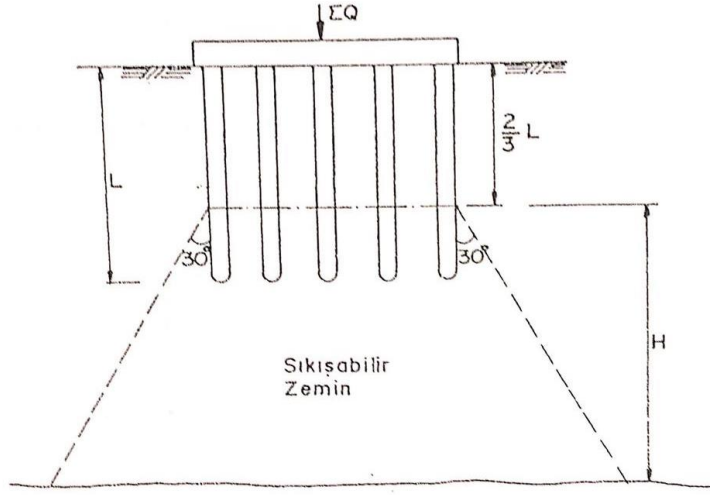
\bar{s}_u : Blok çevresi ortalama zemin kayma mukavemeti

s_u : Blok tabanı zemin kayma mukavemeti

κ : Şekil faktörü

5.4 Kazık Grubunda Konsolidasyon Oturması

Sıkışabilen zeminlerde teşkil edilen kazıklar, bu zeminde meydana gelecek konsolidasyon nedeniyle oturmalarına maruz kalmaktadır. Oluşacak oturma miktarı hesabında, kazık boyunun üstten 2/3'ü mesafesine bulunan zeminde konsolidasyon oluşacağı düşünülmez. (Şekil 5.3)



Şekil 5.3: Kazık grubunda oluşan oturma (Terzaghi ve Peck,1967)

Bu seviyenin altındaki zeminin konsolidasyonu hesaplanarak bulunmaktadır. Bu hesapta gerekli olan gerekli olan gerilme dağılımını bulmak için gerilmenin $2/3L$ mesafeden itibaren 30° lik bir açı ile yayıldığı varsayılmaktadır. Toplam oturma miktarını (ΔH) veren bağıntı aşağıda belirtilmektedir.

$$\Delta H = \Delta p m_v H \quad (5.7)$$

Δp : Sıkışabilir zemin tabakasının ortasındaki gerilme artışı

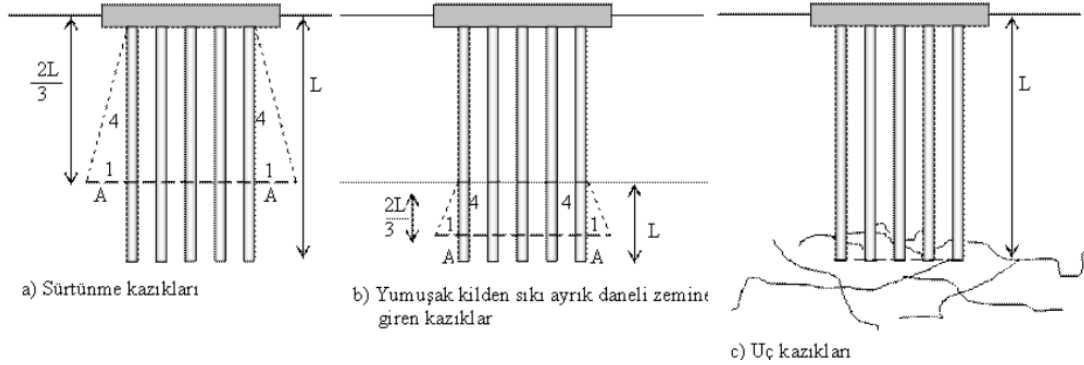
m_v : Hacimsel sıkışma modülü

H : Sıkışabilir tabaka kalınlığı

5.5 Basit Oturma Hesabı Yöntemi

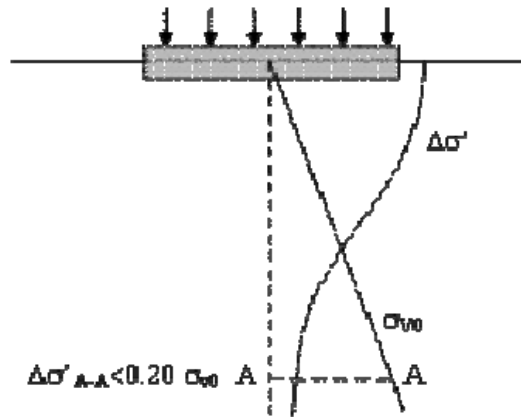
Kazık grubunda yapılacak basit oturma hesaplamalarında, belli bir derinlikte meydana geldiği düşünülen eşdeğer radyeden zemine iletilen gerilme göz önüne alınmaktadır. (Meyerhof, 1976; Tomlinson, 2001) Katı kil veya kum zemin içinde bulunan kazık grubu son çevre sürtünmesinin, kazıkların tek tek oluşan çevre sürtünmelerinin toplamından büyük olduğu kabul edilmiştir (Vesic, 1981). Diğer taraftan, çakıl veya kum zeminde teşkil edilen kazık gruplarında, kazıkların arasında kalan zeminde sıkışma meydana gelmesi sonucu, nihai taşıma gücü yükselmektedir.

Bu veriler, kazık gruplarının bir blok olarak ele alınmasını ve hesaplanmasını gerektirmekte, buna bağlı olarak eşdeğer radye kavramını ortaya çıkarmaktadır (Meyerhof, 1976). Şekil 5.4’de farklı kazık çeşitlerine ait eşdeğer radye modelleri gösterilmektedir.



Şekil 5.4: Eşdeğer radye metodu (Tomlinson, 2001)

Oturma hesaplamalarında ele alınacak derinlik, oluşan düşey jeolojik gerilmelerin %20’sinin ilave gerilme değerinden büyük olduğu seviyedir. (Şekil 5.5)



Şekil 5.5: Zeminde oluşacak jeolojik yük ve gerilme artışı dağılımı (Tomlinson, 2001)

Radye ve kazık grubunda etkili olan gerilmelerin belirlenmesinden sonra her iki sistemde oluşacak toplam oturma aşağıdaki bağıntı yardımı ile hesaplanmaktadır.

$$S = \frac{qB(1 - \nu_{zemin}^2)}{E_{zemin}} I \quad (5.8)$$

Burada oturma “S” ile, yapıdan gelen düşey gerilme miktarı “q” ile, radye kısa kener uzunluğu “B” ile, temel rijitlik katsayısı “I” ile ifade edilmekte ve 0,82-0,95 arasında bir değer alınmaktadır.

6. KAZIK ANALİZİNDE RİJİTLİK MATRİSİ

6.1 Genel

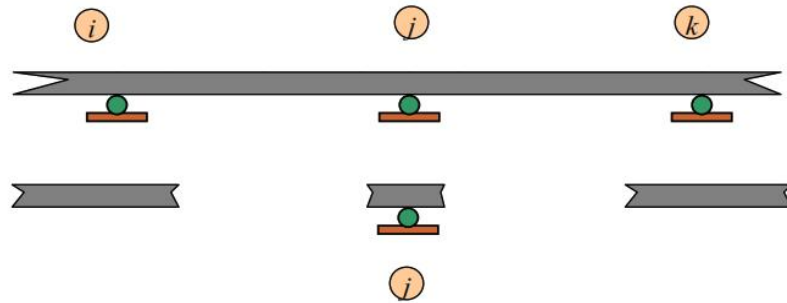
Matris yöntemi, gerçekteki yapıyı temsil edecek şekilde sonlu büyüklükteki yapısal elemanların atalet ve elastisite özelliklerine bağlı olarak oluşturulan matematiksel bir model kullanılmasıdır. Karmaşık yapıların yer değiştirme ve gerilme analizleri ile birlikte uygulamalı elastisite çalışmaları için de tercih edilmektedir. Matris yöntemi ile dış kuvvetler nedeniyle oluşan uç yer değiştirmeler ve uç kuvvetlerin belirlenmesinde aşağıda belirtilen 3 koşul sağlanmalıdır. (Çatal 2014)

1. Denge koşulları (düğüm noktası denge denklemleri ile elemanların denge denklemlerini içermektedir)

2. Geometrik uygunluk koşulları (her bir düğüm noktasında bir araya gelen elemanların o noktadaki uç yer değiştirmeleri birbirlerine eşit olması koşulunu içermektedir.)

3. Malzemenin gerilme – şekil değiştirme denklemleri (malzeme türüne göre değişkenlik gösteren gerilme – şekil değiştirme denklemleri bünye denklemleri olarak adlandırılmaktadır)

Tüm yapılar kendisinden daha küçük elemanların birleşimi ile oluştuğu kabulünü yapmak mümkündür. Şekil 6.1’de gösterildiği üzere, yapıları oluşturan bu küçük elemanlar “sonlu eleman”, bunların birleşim noktaları ise “düğüm noktası” olarak tanımlanmaktadır.



Şekil 6.1: Sonlu eleman ve düğüm noktaları

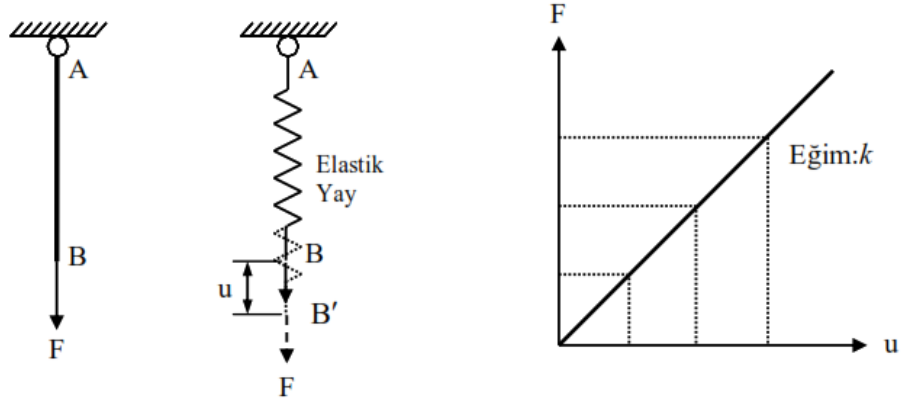
Yapıya uygulanan kuvvetler ve yapının rijitlik değerleri kullanılarak, yapının yapacağı deplasman hesaplanabilmektedir.

6.2 Rijitlik Kavramı

Yer değiştirme ile dış kuvvet arasında oluşturulan bu grafikteki eğim “elastik yayın rijitliği olarak adlandırılmakta ve “ k ” ile gösterilmektedir. Buna göre;

$$F = k.u \quad (6.1)$$

k yay rijitlik bağıntısı yukarıdaki şekilde gösterilir. $u=1$ olması durumunda, $F=k$ olacağından rijitlik birim yer değiştirmeden dolayı oluşan kuvvet olduğu anlamına gelir. Şekil 6.2’de idealize edilmiş bir yay sistemi üzerinde uygulanan kuvvete bağlı oluşan deformasyon ve buna bağlı kuvvet deformasyon grafiği verilmiştir.



Şekil 6.2: Elastik yaya ait kuvvet-yer değiştirme ilişkisi

Bir yay için kuvvet ve yer değiştirme vektörleri sırasıyla aşağıdaki şekilde tanımlanmaktadır.

$$\{f\} = \begin{Bmatrix} f_1 \\ f_2 \end{Bmatrix}; \quad \{u\} = \begin{Bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{Bmatrix} \quad (6.2)$$

$$f_1 = k_{11}u_1 + k_{12}u_2 \quad f_2 = k_{21}u_1 + k_{22}u_2 \quad (6.3)$$

Bağıntı (6.3)'de belirtilen ifade matris formunda yazılırsa;

$$\begin{Bmatrix} f_1 \\ f_2 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} k_{11} & k_{12} \\ k_{21} & k_{22} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{Bmatrix} \quad (6.4)$$

veya kısaca;

$$\{f\} = [k]\{u\} \quad (6.5)$$

şeklinde elde edilir. Bağıntılardan da anlaşılacağı üzere, $[k] = \begin{bmatrix} k_{11} & k_{12} \\ k_{21} & k_{22} \end{bmatrix}$ yay elemanın rijitlik matrisi olarak tanımlanmakta ve uç kuvvetleri ile uç yer değiştirmeleri ile ilişkili olduğu görülmektedir.

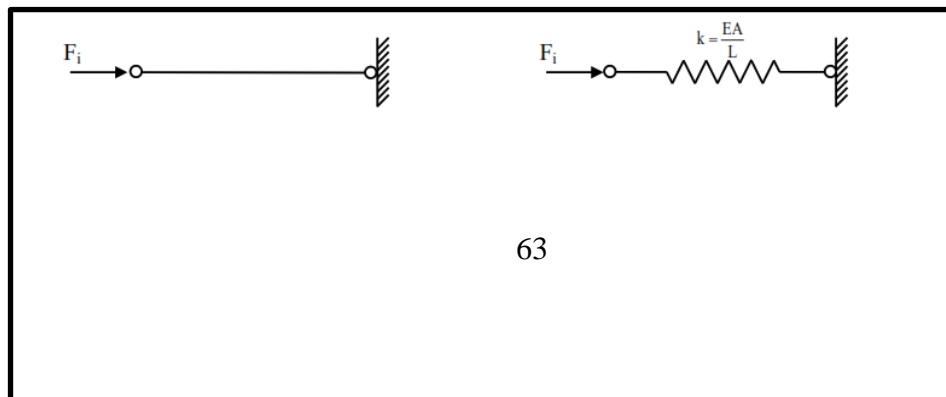
$$\varepsilon = \frac{u_i}{L}; \quad E = \frac{\sigma}{\varepsilon}; \quad \sigma = \frac{F}{A} \quad (6.6)$$

Bağıntı (6.6)'da soldan sağa sırasıyla verilen birim şekil değiştirme “ ε ”, elastisite modülü “ E ” ve gerilme “ σ ” ifadeleri kendi aralarında uygun şekilde düzenlendiği takdirde;

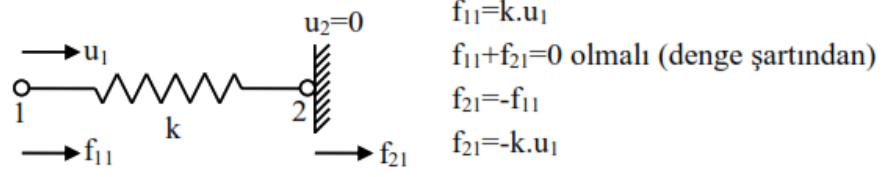
$$F_i = \frac{EA}{L} u_i \Leftrightarrow F_i = k u_i \quad (6.7)$$

olduğu görülmektedir. Bu durumda düzlem bir elemanın, rijitliği $k = \frac{EA}{L}$ olan bir yay ile temsil edilebildiği sonucuna varılabilir.

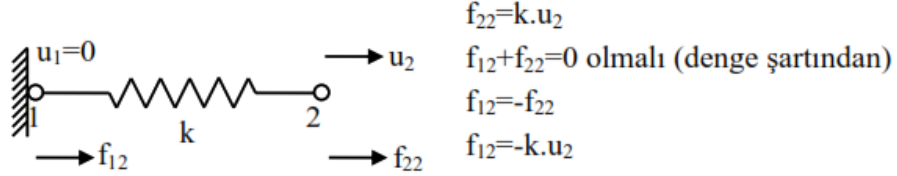
Buna göre incelenecek sistemlerin, yaylardan oluşan bir sistem olarak düşünülmesi mümkündür. Bir yay elemana ait rijitlik matrisinin elde edilmesinde süperpoze edilmek üzere hesaplanan iki durum Şekil 6.3'de gösterilmektedir.



1. Durum:



2. Durum:



Şekil 6.3: Bir yay elemanın rijitlik matrisi elemanlarının elde edilmesi

Şekil 6.3’de gösterilen iki durum süperpoze edilirse;

$$f_1 = f_{11} + f_{12} = ku_1 - ku_2 ; \quad f_2 = f_{21} + f_{22} = -ku_1 + ku_2 \quad (6.8)$$

(6.8) bağıntılarının matris formunda yazılması durumunda;

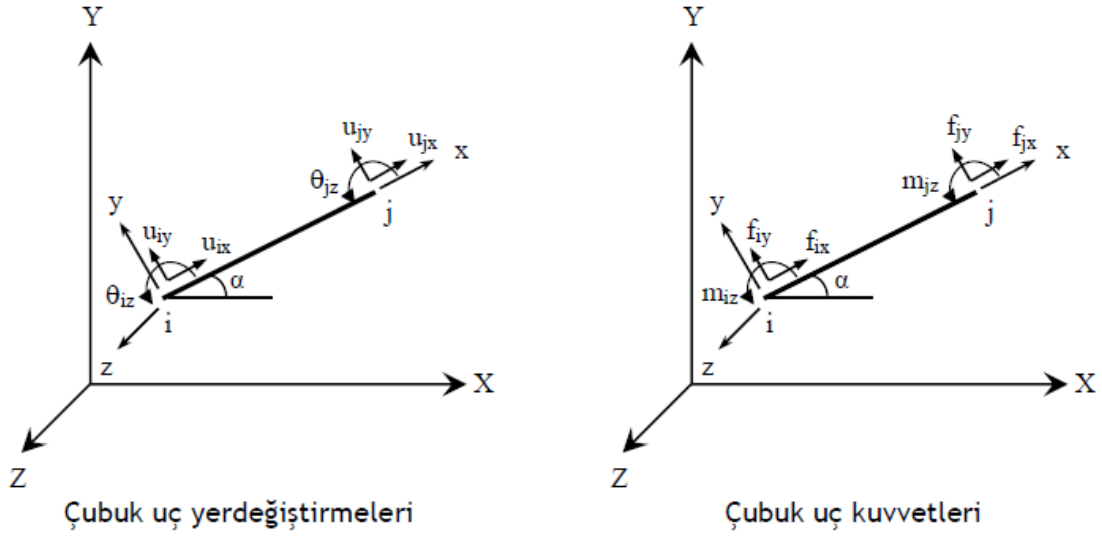
$$\begin{Bmatrix} f_1 \\ f_2 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} k & -k \\ -k & k \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{Bmatrix} \quad (6.9)$$

ifadesi elde edilir. Öyleyse, bir elemana ait rijitlik matrisi aşağıdaki gibi düşünülebilir.

$$\begin{Bmatrix} f_1 \\ f_2 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{EA}{L} & -\frac{EA}{L} \\ -\frac{EA}{L} & \frac{EA}{L} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{Bmatrix} \quad (6.10)$$

6.3 Düzlem Çerçeve Sistemler

Düzlem çerçeve bir elemanın her bir ucunda düşey, yatay yer değiştirme ve düzleme dik eksen etrafında dönme olarak toplamda 3 serbestlik derecesi vardır. Şekil 6.4’de bu elemana ait uç yer değiştirme ve uç kuvvetler gösterilmektedir.



Şekil 6.4: Düzlem çerçeve bir elemanın çubuk uç yer değiştirme ve kuvvetleri

$$\{u\} = \begin{Bmatrix} u_{ix} \\ u_{iy} \\ \theta_{iz} \\ u_{jx} \\ u_{jy} \\ \theta_{jz} \end{Bmatrix} \quad \{f\} = \begin{Bmatrix} f_{ix} \\ f_{iy} \\ m_{iz} \\ f_{jx} \\ f_{jy} \\ m_{jz} \end{Bmatrix}$$

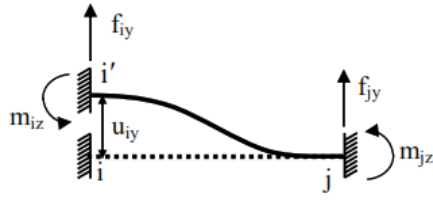
6.3.1 Düzlem Çerçeve Bir Elemanın Eleman Eksen Takımı Rijitlik Matrisi

Eleman eksen takımındaki bir düzlem çerçeve elemana ait rijitlik matrisi elde edilirken, elemanların uç yer değiştirmelerinin tamamı ayrı ayrı serbest bırakılıp kalanları tutularak eleman uç kısımlarındaki kuvvetler tespit edilir. Her bir durumda bulunan uç kuvvetlerin süperpoze edilmesi ile rijitlik matrisi elde edilir.

$$1. \quad u_{ix} \neq 0, u_{iy} = \theta_{iz} = u_{jx} = u_{jy} = \theta_{jz} = 0$$

$$f_{ix} = \frac{EA}{L} u_{ix} \quad f_{jx} = -\frac{EA}{L} u_{ix}$$

2. $u_{iy} \neq 0, u_{ix} = \theta_{iz} = u_{jx} = u_{jy} = \theta_{jz} = 0$



$$m_{iz} = \frac{6EI}{L^2} u_{iy}$$

$$m_{jz} = \frac{6EI}{L^2} u_{iy}$$

$$f_{iy} = \frac{12EI}{L^3} u_{iy}$$

$$f_{jy} = -\frac{12EI}{L^3} u_{iy}$$

3. $\theta_{iz} \neq 0, u_{ix} = u_{iy} = u_{jx} = u_{jy} = \theta_{jz} = 0$



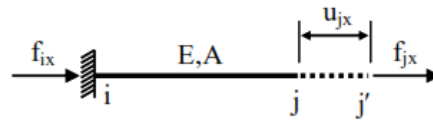
$$m_{iz} = \frac{4EI}{L} \theta_{iz}$$

$$m_{jz} = \frac{2EI}{L} \theta_{iz}$$

$$f_{iy} = \frac{6EI}{L^2} \theta_{iz}$$

$$f_{jy} = -\frac{6EI}{L^2} \theta_{iz}$$

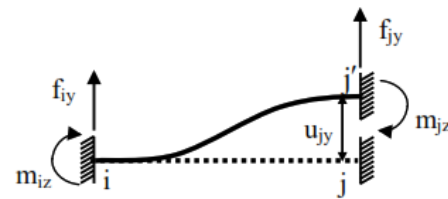
4. $u_{jx} \neq 0, u_{ix} = u_{iy} = \theta_{iz} = u_{jy} = \theta_{jz} = 0$



$$f_{ix} = -\frac{EA}{L} u_{jx}$$

$$f_{jx} = \frac{EA}{L} u_{jx}$$

5. $u_{jy} \neq 0, u_{ix} = u_{iy} = \theta_{iz} = u_{jx} = \theta_{jz} = 0$



$$m_{iz} = -\frac{6EI}{L^2} u_{jy}$$

$$m_{jz} = -\frac{6EI}{L^2} u_{jy}$$

$$f_{iy} = -\frac{12EI}{L^3} u_{jy}$$

$$f_{jy} = \frac{12EI}{L^3} u_{jy}$$

6. $\theta_{iz} \neq 0, u_{ix} = u_{iy} = u_{jx} = u_{jy} = \theta_{jz} = 0$



$$m_{iz} = \frac{2EI}{L} \theta_{iz}$$

$$m_{jz} = \frac{4EI}{L} \theta_{iz}$$

$$f_{iy} = \frac{6EI}{L^2} \theta_{iz}$$

$$f_{jy} = -\frac{6EI}{L^2} \theta_{iz}$$

Uç moment hesabı için aşağıda verilen bağıntıdan faydalanılmaktadır.

$$M_{ij} = \mu_{ij} + m_{i\theta_i}\theta_i + m_{i\theta_j}\theta_j + m_{i\delta_i}\delta_i \quad (6.11)$$

Yukarıda belirtilen 6 durumun süperpoze edilmesi durumunda;

$$f_{ix} = \frac{EA}{L}u_{ix} - \frac{EA}{L}u_{jx}$$

$$f_{iy} = \frac{12EI}{L^3}u_{iy} + \frac{6EI}{L^2}\theta_{iz} - \frac{12EI}{L^3}u_{jy} + \frac{6EI}{L^2}\theta_{jz}$$

$$m_{iz} = \frac{6EI}{L^2}u_{iy} + \frac{4EI}{L}\theta_{iz} - \frac{6EI}{L^2}u_{jy} + \frac{4EI}{L}\theta_{jz}$$

$$f_{jx} = -\frac{EA}{L}u_{ix} + \frac{EA}{L}u_{jx}$$

$$f_{jy} = -\frac{12EI}{L^3}u_{iy} - \frac{6EI}{L^2}\theta_{iz} + \frac{12EI}{L^3}u_{jy} - \frac{6EI}{L^2}\theta_{jz}$$

$$m_{jz} = \frac{6EI}{L^2}u_{iy} + \frac{2EI}{L}\theta_{iz} - \frac{6EI}{L^2}u_{jy} + \frac{4EI}{L}\theta_{jz}$$

olarak ifade edilmektedir. Bu denklem matris formatında yazılırsa,

$$\begin{Bmatrix} f_{ix} \\ f_{iy} \\ m_{iz} \\ f_{jx} \\ f_{jy} \\ m_{jz} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{EA}{L} & 0 & 0 & -\frac{EA}{L} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{12EI}{L^3} & \frac{6EI}{L^2} & 0 & -\frac{12EI}{L^3} & \frac{6EI}{L^2} \\ 0 & \frac{6EI}{L^2} & \frac{4EI}{L} & 0 & -\frac{6EI}{L^2} & \frac{2EI}{L} \\ -\frac{EA}{L} & 0 & 0 & \frac{EA}{L} & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{12EI}{L^3} & -\frac{6EI}{L^2} & 0 & \frac{12EI}{L^3} & -\frac{6EI}{L^2} \\ 0 & \frac{6EI}{L^2} & \frac{2EI}{L} & 0 & -\frac{6EI}{L^2} & \frac{4EI}{L} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_{ix} \\ u_{iy} \\ \theta_{iz} \\ u_{jx} \\ u_{jy} \\ \theta_{jz} \end{Bmatrix}$$

veya kısaca aşağıdaki bağıntı ile ifade edilir.

$$\{f\}=[k]\{u\} \quad (6.12)$$

Burada;

$\{f\}$: Eleman eksen takımı kuvvet vektörü,

$[k]$: Eleman eksen takımı rijitlik matrisi

$\{u\}$: Eleman eksen takımı yer değiştirme vektörü

olarak tanımlanmaktadır. Bu bağlamda düzlem çerçeve bir elemanın, eleman eksen takımındaki rijitlik matrisinin gösterimi aşağıdaki şekildedir.

$$[k] = \begin{bmatrix} \frac{EA}{L} & 0 & 0 & -\frac{EA}{L} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{12EI}{L^3} & \frac{6EI}{L^2} & 0 & -\frac{12EI}{L^3} & \frac{6EI}{L^2} \\ 0 & \frac{6EI}{L^2} & \frac{4EI}{L} & 0 & -\frac{6EI}{L^2} & \frac{2EI}{L} \\ -\frac{EA}{L} & 0 & 0 & \frac{EA}{L} & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{12EI}{L^3} & -\frac{6EI}{L^2} & 0 & \frac{12EI}{L^3} & -\frac{6EI}{L^2} \\ 0 & \frac{6EI}{L^2} & \frac{2EI}{L} & 0 & -\frac{6EI}{L^2} & \frac{4EI}{L} \end{bmatrix}$$

6.3.1 Düzlem Çerçeve Bir Elemanın Genel Eksen Takımı Rijitlik Matrisi

Aynı şekilde bir gösterim ile genel eksen takımındaki bir düzlem çerçeve elemanın yer değiştirme ile kuvvet arasındaki bağıntı aşağıda ifade edilmektedir.

$$\{F\}=[K]\{U\} \quad (6.13)$$

Burada;

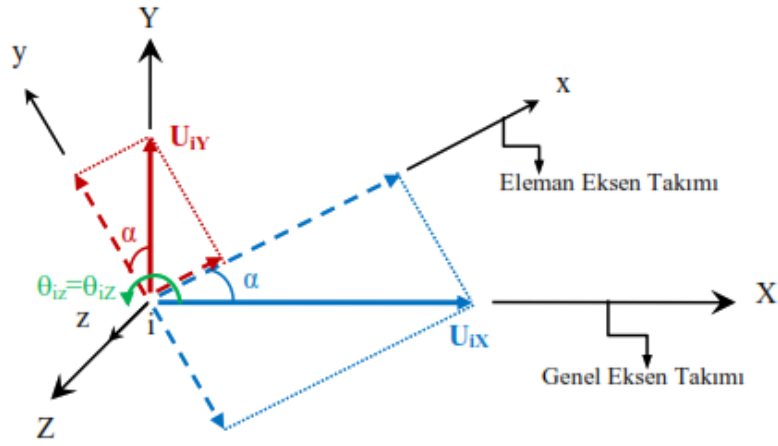
$\{F\}$: Genel eksen takımı kuvvet vektörü,

$[K]$: Genel eksen takımı rijitlik matrisi,

$\{U\}$: Genel eksen takımı yer değıştirme vektörü

olarak tanımlanmaktadır.

Şekil 6.5’de düzlem çerçeve bir elemana ait düğümdeki yer değıştirmeleri elde etmek amacıyla eleman ve genel eksen takımı gösterilmektedir.



Şekil 6.5: Düzlem çerçeve elemana ait eleman ve genel eksen takımı

i düğümündeki yer değıştirmeler;

$$u_{ix} = U_{iX} \cos \alpha + U_{iY} \sin \alpha ; \quad u_{iy} = -U_{iX} \sin \alpha + U_{iY} \cos \alpha ; \quad \theta_{iz} = \theta_{iZ}$$

j düğümündeki yer değıştirmeler;

$$u_{jx} = U_{jX} \cos \alpha + U_{jY} \sin \alpha ; \quad u_{jy} = -U_{jX} \sin \alpha + U_{jY} \cos \alpha ; \quad \theta_{jz} = \theta_{jZ}$$

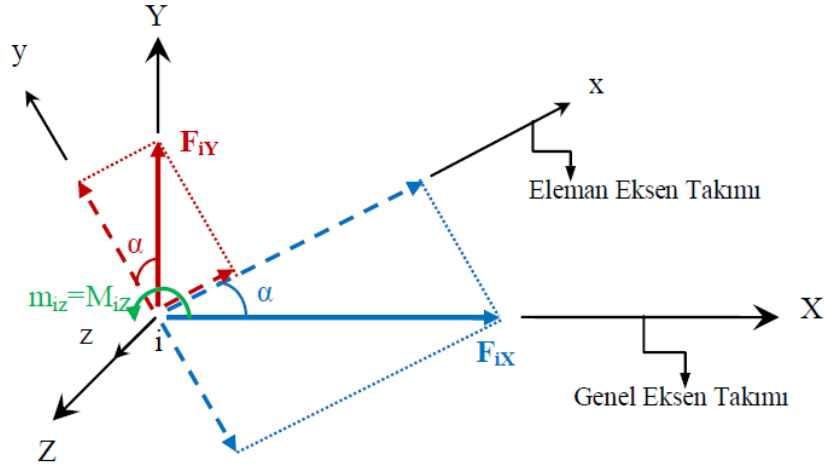
Bu bağıntılar matris formatında gösterilirse;

$$\begin{Bmatrix} u_{ix} \\ u_{iy} \\ \theta_{iz} \\ u_{jx} \\ u_{jy} \\ \theta_{jz} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \alpha & \sin \alpha & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -\sin \alpha & \cos \alpha & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \cos \alpha & \sin \alpha & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\sin \alpha & \cos \alpha & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} U_{iX} \\ U_{iY} \\ \theta_{iZ} \\ U_{jX} \\ U_{jY} \\ \theta_{jZ} \end{Bmatrix}$$

Veya bir başka gösterim ile;

$$\{u\}=[T]\{U\} \quad (6.14)$$

olarak ifade edilebilir. Bu ifadede yer alan $[T]$ dönüşüm matrisini göstermektedir. Şekil 6.6'da düzlem çerçeve bir elemana ait düğümdeki yer değiştirmeleri elde etmek amacıyla eleman ve genel eksen takımı gösterilmektedir.



Şekil 6.6: Düzlem çerçeve elemana ait eleman ve genel eksen takımı

i düğümündeki yer değiştirmeler;

$$f_{ix} = F_{iX} \cos \alpha + F_{iY} \sin \alpha ; \quad f_{iy} = -F_{iX} \sin \alpha + F_{iY} \cos \alpha ; \quad m_{iz} = M_{iz}$$

j düğümündeki yer değiştirmeler;

$$f_{jx} = F_{jX} \cos \alpha + F_{jY} \sin \alpha \quad f_{jy} = -F_{jX} \sin \alpha + F_{jY} \cos \alpha ; \quad m_{iz} = M_{iz}$$

Bu bağıntılar matris formatında gösterilirse;

$$\begin{Bmatrix} f_{ix} \\ f_{iy} \\ m_{iz} \\ f_{jx} \\ f_{jy} \\ m_{jz} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \alpha & \sin \alpha & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -\sin \alpha & \cos \alpha & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \cos \alpha & \sin \alpha & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\sin \alpha & \cos \alpha & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} F_{iX} \\ F_{iY} \\ M_{iZ} \\ F_{jX} \\ F_{jY} \\ M_{jZ} \end{Bmatrix}$$

Veya bir başka gösterim ile;

$$\{f\}=[T]\{F\} \quad (6.15)$$

olarak ifade edilebilir. Bu ifadede yer alan $[T]$ dönüşüm matrisini göstermektedir.

Verilen bağıntılar için aşağıdaki şekilde düzenlemeler yapılırsa;

$$\{f\}=[k]\{u\} \Rightarrow \{f\}=[k][T]\{U\} \quad (6.16)$$

$$\{f\}=[k][T]\{U\} \Rightarrow [T]\{F\}=[k][T]\{U\} \quad (6.17)$$

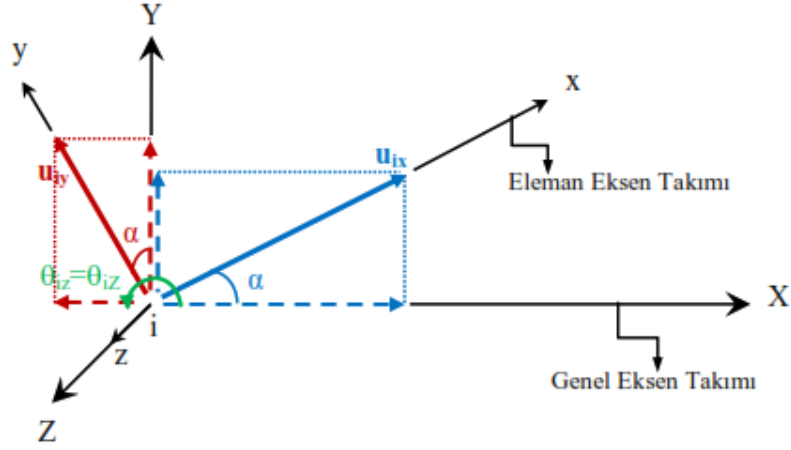
$$[T]^{-1}[T]\{F\}=[T]^{-1}[k][T]\{U\} \quad (6.18)$$

$$\{F\}=[T]^{-1}[k][T]\{U\} \quad (6.19)$$

bağıntıları elde edilmektedir. Bağıntı (6.13) ve (6.19)'un karşılaştırılması durumunda;

$$[K]=[T]^{-1}[k][T] \quad (6.20)$$

düzlem çerçeve bir elemanın genel eksen takımındaki rijitlik matrisi elde edilmektedir. Şekil 6.5'de düzlem çerçeve bir elemana ait düğümdeki yer değiştirmeleri elde etmek amacıyla eleman ve genel eksen takımı gösterilmektedir. Genel eksen takımındaki yer değiştirme hesabı için eleman eksen takımında yer alan yer değiştirmelerden faydalanılır ise;



Şekil 6.7: Düzlem çerçeve elemana ait eleman ve genel eksen takımı

$$\begin{aligned}
 U_{iX} &= u_{ix} \cos \alpha - u_{iy} \sin \alpha; & U_{iY} &= u_{ix} \sin \alpha + u_{iy} \cos \alpha; & \theta_{iz} &= \theta_{iz} \\
 U_{jX} &= u_{jx} \cos \alpha - u_{jy} \sin \alpha; & U_{jY} &= u_{jx} \sin \alpha + u_{jy} \cos \alpha; & \theta_{jz} &= \theta_{jz}
 \end{aligned}$$

olarak ifade edilmektedir. Bu ifadelerin matris formunda gösterimi aşağıdaki gibidir.

$$\begin{Bmatrix} U_{iX} \\ U_{iY} \\ \theta_{iz} \\ U_{jX} \\ U_{jY} \\ \theta_{jz} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \alpha & -\sin \alpha & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \sin \alpha & \cos \alpha & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \cos \alpha & -\sin \alpha & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \sin \alpha & \cos \alpha & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_{ix} \\ u_{iy} \\ \theta_{iz} \\ u_{jx} \\ u_{jy} \\ \theta_{jz} \end{Bmatrix}$$

veya başka bir gösterim ile aşağıdaki bağıntı ile ifade edilebilir.

$$\{U\} = [T]^T \{u\} \quad (6.21)$$

Bağıntı (6.14) de yer alan eşitliğin her iki tarafı dönüşüm matrisinin tersi olan $[T]^{-1}$ ile çarpıldığında;

$$[T]^{-1}\{u\} = [T]^{-1}[T]\{U\}$$

$$\{U\} = [T]^{-1}\{u\} \quad (5.22)$$

eşitliği elde edilmektedir. (6.21) ve (6.22) eşitlikleri karşılaştırıldığında, aşağıdaki eşitlikte belirtilen ortogonalite şartı olarak tanımlanan eşitlik elde edilir.

$$[T]^T = [T]^{-1} \quad (6.23)$$

Bu sayede (6.20) denklemini aşağıdaki şekilde elde edilmektedir.

$$[K] = [T]^T [k] [T] \quad (6.24)$$

Burada;

$[k]$: Eleman eksen takımına ait rijitlik matrisi

$[K]$: Genel eksen takımına ait rijitlik matrisi

olarak tanımlanmaktadır.

Bağıntı (6.24)'ün matris formatında yazılması halinde aşağıdaki ifadeye dönüşmektedir.

$$[K] = \begin{bmatrix} \cos \alpha & -\sin \alpha & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \sin \alpha & \cos \alpha & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \cos \alpha & -\sin \alpha & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \sin \alpha & \cos \alpha & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{EA}{L} & 0 & 0 & -\frac{EA}{L} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{12EI}{L^3} & \frac{6EI}{L^2} & 0 & -\frac{12EI}{L^3} & \frac{6EI}{L^2} \\ 0 & \frac{6EI}{L^2} & \frac{4EI}{L} & 0 & -\frac{6EI}{L^2} & \frac{2EI}{L} \\ -\frac{EA}{L} & 0 & 0 & \frac{EA}{L} & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{12EI}{L^3} & -\frac{6EI}{L^2} & 0 & \frac{12EI}{L^3} & -\frac{6EI}{L^2} \\ 0 & \frac{6EI}{L^2} & \frac{2EI}{L} & 0 & -\frac{6EI}{L^2} & \frac{4EI}{L} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \alpha & \sin \alpha & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -\sin \alpha & \cos \alpha & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \cos \alpha & \sin \alpha & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\sin \alpha & \cos \alpha & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Düzlem çerçeve bir elemanın genel eksen takımına göre rijitlik matrisi aşağıdaki şekilde elde edilmektedir.

$$[K]_g = \begin{bmatrix} a & b & c & -a & -b & c \\ b & d & e & -b & -d & e \\ c & e & f & -c & -e & g \\ -a & -b & -c & a & b & -c \\ -b & -d & -e & b & d & -e \\ c & e & g & -c & -e & f \end{bmatrix}$$

$$a = \frac{EA}{L} \cos^2 \alpha + \frac{12EI}{L^3} \sin^2 \alpha ;$$

$$b = \left(\frac{EA}{L} - \frac{12EI}{L^3} \right) \cos \alpha \sin \alpha$$

$$c = -\frac{6EI}{L^2} \sin \alpha ;$$

$$d = \frac{EA}{L} \sin^2 \alpha + \frac{12EI}{L^3} \cos^2 \alpha$$

$$e = \frac{6EI}{L^2} \cos \alpha ;$$

$$f = \frac{4EI}{L} ; \quad g = \frac{2EI}{L}$$

Yapılan çalışmada kazıklar düzlem çerçeve eleman olarak ele alınmaktadır. Bu bağlamda bir kazığı 6 serbestlik derecesi bulunan, eleman eksen takımı ile genel eksen takımını arasında 90 derece açı farkı bulunan bir sonlu eleman olarak tanımlamak mümkündür.

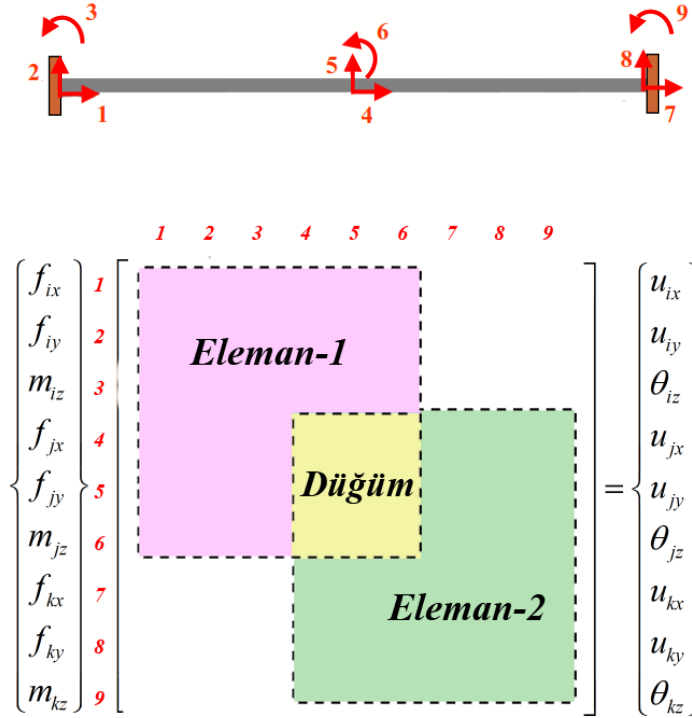
Belirtilen durumun matris formunda ifade edilmesi halinde;

$$\begin{bmatrix} \frac{12EI}{L^3} & 0 & -\frac{6EI}{L^2} & -\frac{12EI}{L^3} & 0 & \frac{6EI}{L^2} \\ 0 & \frac{EA}{L} & 0 & 0 & -\frac{EA}{L} & 0 \\ -\frac{6EI}{L^2} & 0 & \frac{4EI}{L} & \frac{6EI}{L^2} & 0 & \frac{2EI}{L} \\ -\frac{6EI}{L^2} & 0 & \frac{6EI}{L^2} & \frac{12EI}{L^3} & 0 & \frac{6EI}{L^2} \\ 0 & -\frac{EA}{L} & 0 & 0 & \frac{EA}{L} & 0 \\ -\frac{6EI}{L^2} & 0 & \frac{2EI}{L} & \frac{6EI}{L^2} & 0 & \frac{4EI}{L} \end{bmatrix}$$

şeklinde olmaktadır. Sonuç olarak genel eksen takımındaki bir kazık elemana ait yer değiştirme ile kuvvet arasındaki bağıntının matris formunda ifadesi aşağıda gösterilmektedir.

$$\begin{Bmatrix} f_{ix} \\ f_{iy} \\ m_{iz} \\ f_{jx} \\ f_{jy} \\ m_{jz} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{12EI}{L^3} & 0 & -\frac{6EI}{L^2} & -\frac{12EI}{L^3} & 0 & \frac{6EI}{L^2} \\ 0 & \frac{EA}{L} & 0 & 0 & -\frac{EA}{L} & 0 \\ -\frac{6EI}{L^2} & 0 & \frac{4EI}{L} & \frac{6EI}{L^2} & 0 & \frac{2EI}{L} \\ -\frac{6EI}{L^2} & 0 & \frac{6EI}{L^2} & \frac{12EI}{L^3} & 0 & \frac{6EI}{L^2} \\ 0 & -\frac{EA}{L} & 0 & 0 & \frac{EA}{L} & 0 \\ -\frac{6EI}{L^2} & 0 & \frac{2EI}{L} & \frac{6EI}{L^2} & 0 & \frac{4EI}{L^2} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_{ix} \\ u_{iy} \\ \theta_{iz} \\ u_{jx} \\ u_{jy} \\ \theta_{jz} \end{Bmatrix}$$

Yapılacak olan kazık hesaplamalarında, kazığın sonlu eleman olarak düşünülmesi mümkündür. Bununla birlikte kazığın kendisinden daha küçük elemanlara bölünerek istenilen her bir noktadaki deplasman değerleri belirlenebilmektedir. Bu bağlamda kullanılacak yöntem aşağıda ifade edilmektedir.



Şekil 6.8: Kiriş elemana ait düğüm noktaları ve serbestlik derecelerinin gösterilmesi

Şekil 6.8’de ifade edildiği gibi 6 serbestlik dereceli bir eleman ortasındaki düğüm noktasından bölünerek iki ayrı eleman olarak ele alınabilmektedir. Oluşan yeni elemanlardan ilkinin j ucundaki mesnet reaksiyonları ile diğerinin i ucunda mesnet reaksiyonları aynıdır. Bu mantıktan hareket ile kazık elemana ait birçok düğüm noktası tanımlayıp, kazık eksenini üzerindeki herhangi bir noktaya ait reaksiyon kuvvetleri ile deplasman değerlerinin belirlenmesi mümkün olmaktadır.

Sisteme ait rijitlik matrisi $[K]$ oluşturulurken, eleman rijitlik matrisi ve yay rijitlik matrisi göz önüne alınmaktadır.

$$\{F\} = [K]\{U\} \quad (6.25)$$

$$\{F\} = [K_s + K_h]\{U\} \quad (6.26)$$

Burada sözü edilen K_h ifadesi Bağıntı 4.1 yardımı ile hesaplanmakta, K_s ifadesi ise eleman rijitlik matrisini temsil etmektedir. (Zhang H. ve Small J.C, 1999)

7. ANALİZLERDE KULLANILAN PROGRAMLAR

Yapılan çalışmada, düşey ve yanal yük etkisi altında ki tekil bir kazığa ait yer altı su seviyesi de göz önünde bulundurularak taşıma gücü ve zeminde meydana gelecek oturmalarla birlikte kazık ve zemin davranışı irdelenmiş olup kohezyonlu ve kohezyonsuz zeminlerde ki durumları araştırılmıştır. Farklı kazık ve zemin koşullarına ait parametreler kullanılarak geliştirilen kazık analiz programı ile kazık zemin modelleri oluşturulmuş ve analizler yapılmıştır. Elde edilen sonuçların sonlu eleman programı kullanılarak yapılan analizler ile ne gibi farklılıklar gösterdiği irdelenmiştir. Çalışmalarda sonlu elemanlar yazılımı olarak Plaxis Finite Elements 2D kullanılmıştır.

7.1 Plaxis 2D Sonlu Elemanlar Programı

7.1.1 Genel Özellikler

Plaxis, geoteknik mühendisliği alanında, özellikle stabilite ve deformasyon analizi için geliştirilen bir sonlu eleman programıdır. Analizi yapılacak her projede öncelikle geometri modeli oluşturulmalıdır. Noktalardan, hücrelerden ve çizgilerden oluşan geometrik model gerçek bir problemi temsil etmektedir. Oluşturulan geometri modeli çeşitli zemin tabakalarını, yapım aşamalarını, yapısal elemanları ve yükleri içermektedir. Analiz sonucunu etkilememesi için tercih edilen model sınırları yeterince büyük olmalıdır. Programın basit çizim işlemleri, karışık sonlu eleman modellerinin çabuk ve kolay bir şekilde oluşturulmasına imkan vermektedir. Geoteknik uygulamalar, zeminlerde ki doğrusal olmayan ve zamana bağlı davranışı önlemek için gelişmiş başlangıç modellerine ihtiyaç vardır. Programı kullanan kişilerin temel zemin mekaniği bilgisine sahip olması önemlidir.

7.1.1.1 Noktalar

Çizgilerin başlangıcını ve sonunu belirtirler. Noktalar aynı zamanda ankrajların, nokta yüklerinin konumunun belirlenmesinde kullanılır.

7.1.1.2 Çizgiler

Çizgiler, model sınırlarının, geometrinin fiziksel ve modeldeki palplanş duvarlarının, farklı zemin katmanlarının ayırımı veya yapım aşamalarının belirlenmesinde kullanılır.

7.1.1.3 Hücreler

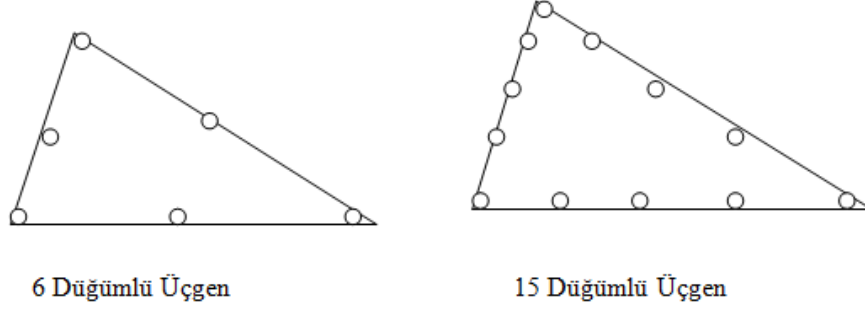
Hücreler çevresi çizgilerle kapalı alanlardır. Program, geometri çizgilerine göre hücreleri otomatik olarak tanımlar. Hücre içerisindeki zemin homojen kabul edilir. Geometri tamamlandıktan sonra, sonlu elemanlar modeli geometri modelinin içinde yer alan hücre ve çizgilerin birleşimine göre otomatik oluşturulmaktadır. Modelde yer alan hücre ve çizgilere dayanarak oluşturulan bir sonlu eleman ağında, elemanlar, düğmeler ve gerilme noktaları olarak üç farklı tip bileşen yer almaktadır.

7.1.1.4 Elemanlar

Sonlu eleman ağının oluşturulması sırasında hücreler üçgen elemanlara ayrılırlar. Plaxis'te varsayılan 15 düğümlü elemandır. Standart üçgen elemanda 6 düğüm yer almaktadır. Ek olarak, gerilme ve çökme yüklerinin daha hassas hesaplanmasına olanak veren 15 düğümlü üçgenlerde bulunmaktadır.

7.1.1.5 Düğüm Noktaları

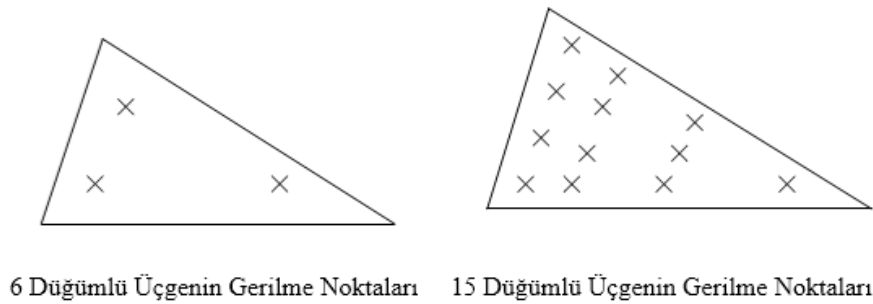
İsminden de anlaşılacağı üzere, 15 düğüm noktalı üçgenlerde 15 düğüm noktası, 6 düğüm noktalı üçgenlerde ise 6 düğüm noktası bulunmaktadır (Şekil 7.1). Sonlu elemanların analizi sırasında, yer değiştirmeler düğümler ile hesaplanır. Yük-deplasman eğrilerinin elde edilmesi için düğmeler daha önce seçilebilir.



Şekil 7.1: Düğüm noktaları

7.1.1.6 Gerilme Noktaları

Deplasmanların aksine, gerilmeler düğümler yerine her bir Gauss noktasında hesaplanmıştır. Şekil 7.2’de görüldüğü gibi 6 düğüm noktalı üçgen eleman 3 düğüm noktasına, 15 gerilme noktalı eleman ise 12 gerilme noktasına sahiptir. Gerilme noktaları gerilme hareketini veya gerilme şekil değiştirmesini oluşturmak için ön tanımlı olarak seçilebilir.



Şekil 7.2: Gerilme noktaları

7.1.2 Programın Tanıtılması

Plaxis'te giriş klavye ve fare yardımı ile yapılır. Çoğunlukla 4 çeşit giriş yapılabilir:

- Geometri nesnelerin girişi (zemin katmanının çizimi)
- Yazının girişi (proje adı)
- Değerlerin girişi (zemin ve kazık parametreleri girmek)
- Seçimlerin girişi (zemin ve kazık modelini seçmek)

a) Geometrik Nesnelerin Girişi

Geometrik modelin oluşturulması noktalar ve çizgilerin oluşturulmasına dayanır. Menüden veya araç çubuğundan birçok geometri öğesine ulaşılabilir. Birçok geometri elemanı çizgi çizilerek elde edilmektedir. Çizgi, çizim alanında sol fare tuşuna tıklayarak veya noktaların koordinat değerleri girilerek gerçekleştirilir.

b) Yazı, Değer ve Seçimlerin Girişi

Girişler açılan yazı kutucuklarından yapılır. Belirli konular için çeşitli kutucuklar açılan pencerelerde tanımlanmıştır. Çıkan yazı kutucuğuna girilen değer onaylanır ve program tarafından kabul edilmiş olur. Girilen değerler başka değerler girmeye gerek olmadan analizlerde kullanılır. Seçimler diğer programlarda olduğu gibi yuvarlak butonlar (tek bir özellik aktif olacak), onay kutuları (bir veya birden fazla özellik) ve combo box (listeden seçim) gibi butonlarla yapılır.

7.1.2.1 Programı başlatma

Veri dosyalarının kayıt edilebilmesi ve karışıklığın önüne geçilebilmesi için ayrı bir dosya açılması önerilir. Plaxis başlat menüsünden Plaxis giriş butonuna tıklayarak açılabilir. Kullanıcıya yeni bir projeyi oluşturması veya önceden oluşturulmuş başka bir projeyi açmak için opsiyon verilir.

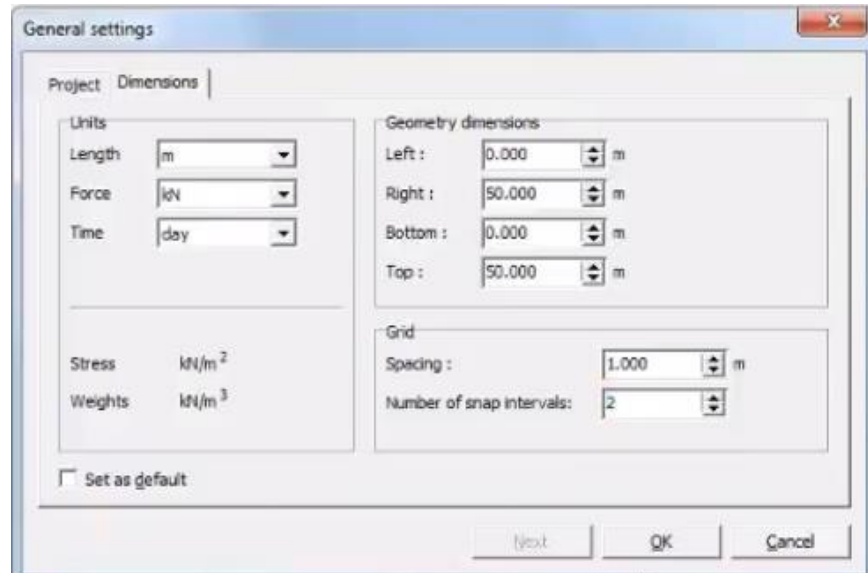
Yeni bir proje oluşturulacaksa genel özellikler "General Settings" penceresi yardımı ile yapılır. Bu pencere iki sayfadan oluşmaktadır. İlk sayfada geçerli proje için

çeşitli özellikler verilmelidir. Bu bölümde analizin modeli (düzlem deformasyon veya asimetri) ve elemanın düğüm sayısı (6-15 düğüm) belirlenir. Yerçekimi ivmesi standart olarak $9,80 \text{ m/s}^2$ olarak ayarlanmıştır. Gerek görüldüğü takdirde yarı dinamik analiz için bağımsız ivme değerleri girilebilir (Şekil 7.3).



Şekil 7.3: Genel Özellikler (model ve eleman tipinin seçimi)

Bir sonraki aşamada kullanılacak birimlerin seçimi, çizim alanını ölçülerinin, çizim bölgesinin geometri alanını içine alacak şekilde oluşturulması gerekir ve aralıkların sıklıklarının tanımlanması gerekmektedir (Şekil 7.4).



Şekil 7.4: Genel Ayarlar (birimlerin ve çizim alanı ölçülerinin seçimi)

7.1.2.2 Geometri Modelinin Oluşturulması

Açılan ana pencere genel ve geometri araç çubuklarını, ana menüyü, cetveli çizim alanını, klavye ile değer girdi bölümünü ve koordinatları içeren bölümü içermektedir.

Genel Araç Çubuğu

Kaydet, yazdır, yaklaş ve uzaklaş gibi genel uygulamalar için menüde ilgili bölümde butonlar yer almaktadır. Öte yandan programın alt türevleri olan yardımcı programları (Calculation, Output, Curves) başlatacak butonlara sahiptir.

Geometri Araç Çubuğu

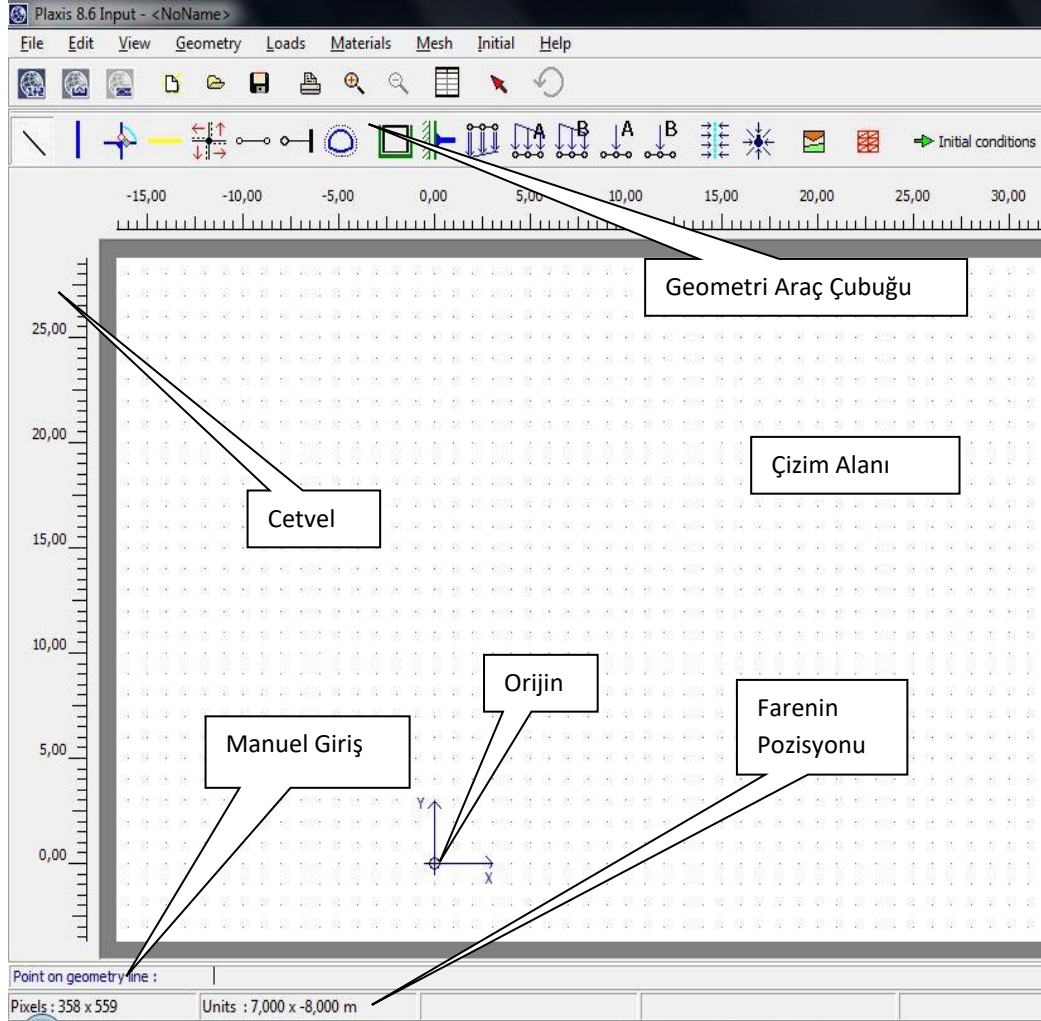
Modelin tasarımına yarayan butonları içermektedir. Butonlar araç çubuğu üzerinde soldan sağa doğru takip edildiğinde geometri modeli tasarlanacak sırada düzenlenmiş oldukları görülür.

Cetveller

Üst ve sol çizim bölgesinde yer alan cetveller geometri ölçülerinin direkt olarak görünmesini sağlayacak koordinatları belirtirler. Ayrıca “Manual Input” seçeneği ile fare ile yapılamayacak hassas modellemeler bu şekilde kolayca yapılabilir.

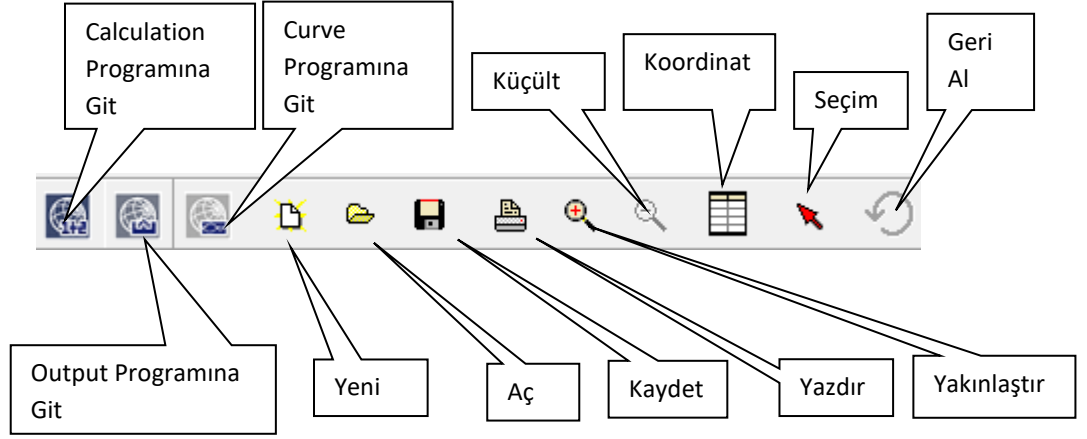
Çizim Alanı

Çizim alanı geometri modelinin oluşturulduğu çizim ekranıdır. Çizim alanında noktalardan oluşan grid, çizimi kolaylaştırmak için düzenli aralıklarla bölünmüştür. Şekil 7.5’de programın ana ekranı ve çizim alanı gösterilmektedir.

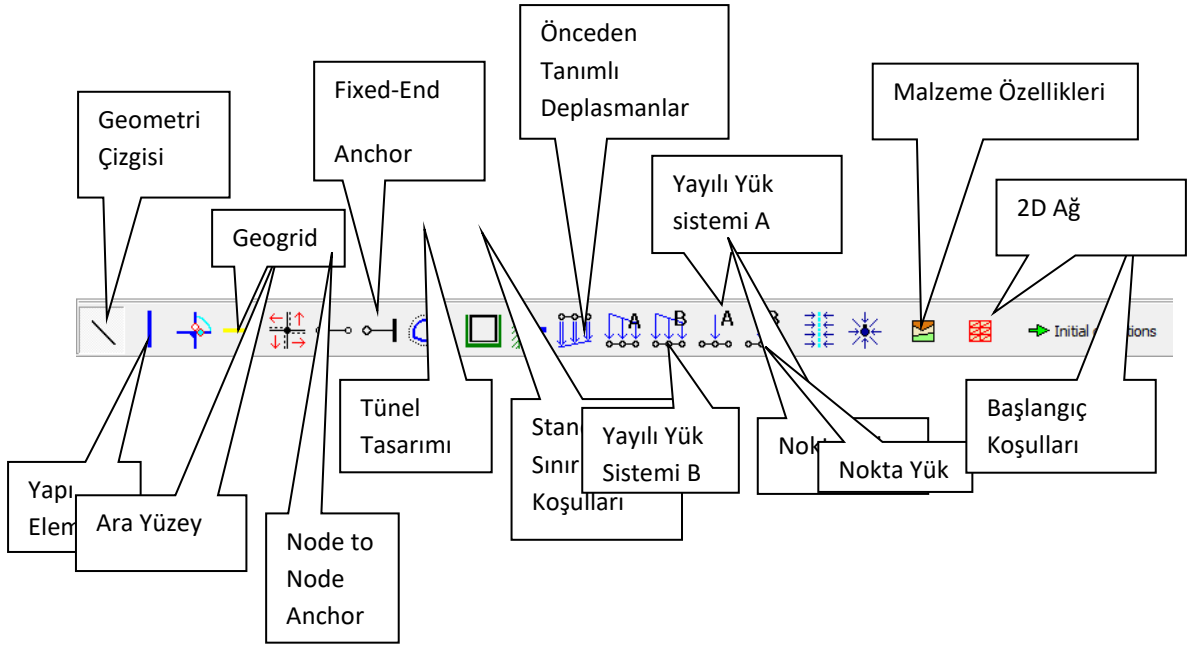


Şekil 7.5: Ana pencere

Programda sıklıkla kullanılan araç çucuklarındaki kısayolların yerleri ve tanımları Şekil 7.6 ve Şekil 7.7’de ifade edilmektedir.



Şekil 7.6: Araç çubukları



Şekil 7.7: Araç çubukları

7.1.2.2.1 Geometri Çizgisi

Oluşturulacak olan zemin ve her türlü elamanın çizimi için kullanılmaktadır. Zemin modeli, kazık, diyafram duvar, farklı zemin tabakaları gibi öğeler geometri çizgisi yardımı ile oluşturulmaktadır.

7.1.2.2.2 Kirişler

Dayanma yapıları, kazıklar gibi yapıların modellenmesi için kullanılmaktadır. Bahsi geçen elemanların davranışları eğilme rijitliği (EI) ve normal rijitlik (EA) yardımıyla tanımlanmıştır. Plaxis'te tanımlanan bir kiriş eleman, Mindlin'in kiriş teorisine göre ele alınmaktadır. Bu teori yardımı ile eğilme ve kesmeden kaynaklanan kiriş deformasyonlarının belirlenmesine olanak vermektedir. Kiriş elemanları, önceden tanımlanmış eğilme momenti veya eksenel yükü aştığı takdirde plastik duruma gelebilmektedir.

7.1.2.2.3 Kiriş Mafsalları

Standart kiriş birleşimleri rijit kabul edilmektedir. Kiriş mafsalları, kirişlerin uç noktalarında serbest dönmeyi sağlanacağı birleşimler oluşturmak için kullanılırlar.

7.1.2.2.4 Geotekstiller

Geotekstiller veya geogridler olarak tanımlanan elemanlar donatılı dolgular veya dayanma yapıları uygulamalarında tercih edilir. Bu elemanlar, programda özel çekme elemanları olarak tanımlanır. Bu elemanları, ara yüzey elemanlarıyla birleştirmek etrafındaki zeminlerle etkileştirmek için uygundur. Plaxis'te bu elemanlar için tanımlanan malzeme özelliği normal rijitliktir, (EA). Öte yandan geotekstiller zemin ankrajı uygulamalarında, ankrajın harçlı bölümünün modellenmesi içinde kullanılırlar.

7.1.2.2.5 Ara Yüzeyler

Yapı elemanı ve zemin arasındaki etkileşimi modellemek için kullanılmaktadırlar. Bu durum, yapısal nesnelere zemin arasında tam anlamıyla bir

etkileşime imkan vermektedir. Ara yüzeylerde tipik bir uygulama bir palplanj ile zemin arasında meydana gelen etkileşimin modellenmesi olabilir.

7.1.2.2.6 Sabitlemeler

Sabitlemeler nokta ve çizgilere uygulanabilmektedir. Programda 5 farklı çeşit sabitleme seçeneği vardır. Bunlar yatayda sabitleme, ($x=0$), dikeyde sabitleme, ($y=0$), Toplam sabitleme, ($x=y=0$) ile birlikte moment sabitlemesi ve Standart sabitlemedir. Standart sabitleme tercih edilmesi durumunda Plaxis programı tarafından modele aşağıdaki koşullar uygulanır:

- Modelde, x kordinatında en yüksek ve en düşük x kordinatına sahip düşey geometri çizgileri için yatay sabitleme ($x=0$) elde edilir.
- Modelde, y kordinatında en yüksek ve en düşük y kordinatına sahip yatay geometri çizgisi için toplam sabitleme ($x=y=0$) elde edilir.
- Geometri modelinin sınırına kadar tanımlanan kirişler, sınırdaki nokta da sabit bir dönme değeri elde edilir.

7.1.2.2.7 Kuvvetler

Hem nota yükler hem de yayılı yüklerin uygulanabilmesi için, iki bağımsız yük sistemi kullanılabilir. Nokta kuvvetler geometri noktalarına, yayılı kuvvetler çizgiler üstünde uygulanabilmektedirler. Hem nokta hem de yayılı yükler düşey ve yatay bileşenler içerebilirler. Yayılı yüklere her bir birim alan için (kN/m^2), nokta yüklere ise her bir birim uzunluk (kN/m) için değerler girilir.

7.1.2.2.8 Malzemenin Tanımlanması

Modelin çizimi gerçekleştikten sonra malzemelerin özelliklerinin tanımlanması gerekmektedir. Bunun için Şekil 7.8'deki menüde yer alan malzeme tanımlama bölümünden ve Şekil 7.8'deki genel malzeme özellikleri menüsünden yararlanılır. Menü ana olarak dört malzeme tanımlanmasını içermektedir. Bunlar zemin ve ara yüzler, (soil & interfaces), kirişler (beams), goetekstilller (geogrids) ve ankrajlar (anchors) için tanımlanmaktadır. Bu dört malzeme için hafızaya kayıtlı elemanlar kullanılabileceği gibi yeni elemanlarda oluşturmak mümkündür.

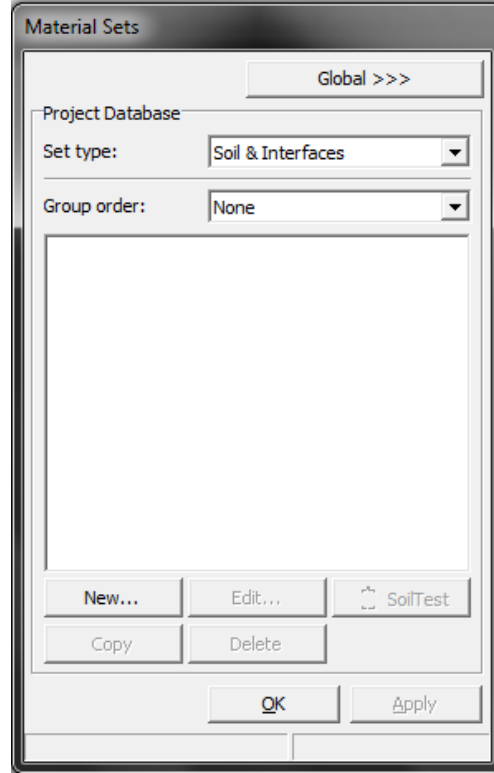
Zeminler için ilk olarak drenajlı, drenajsız malzeme özelliklerinden birinin seçilmesi γ_{unsat} , k_x , k_y değerlerinin girilmesi gerekmektedir. Eğer istenirse gelişmiş e_{init} , e_{min} , e_{max} ve c_k değerleri de kullanılabilir.

“Drenajlı” davranışın seçilmesiyle ilave boşluk suyu basıncı oluşturulmamış olur. Bu durum kuru zeminler ve yüksek permeabiliteden dolayı (kumlar) tam drenaj için kullanılır. Bu seçenek aynı zamanda uzun dönem zemin davranışının istendiği koşullar için de kullanılır.

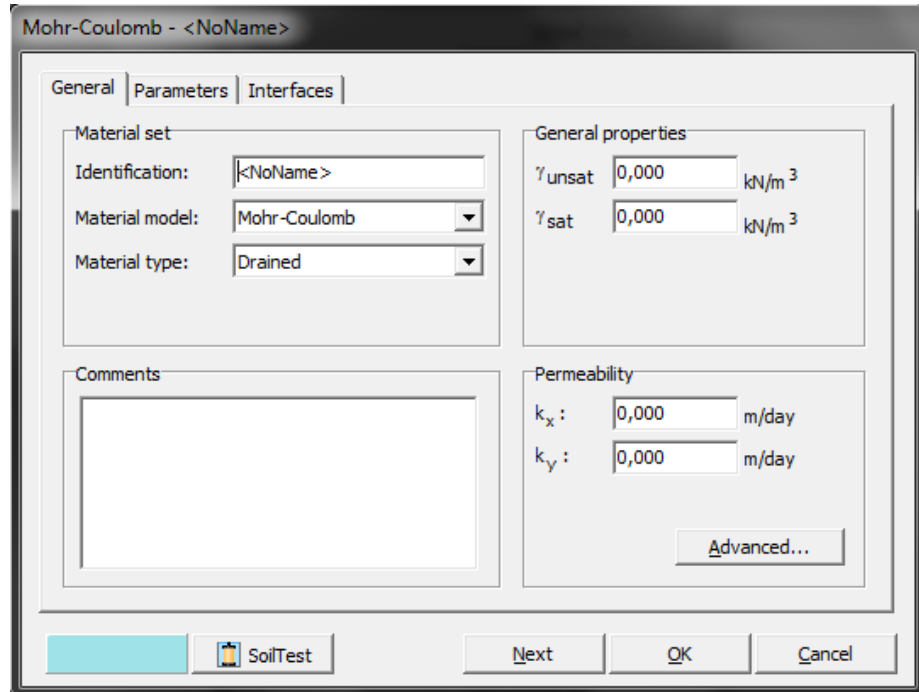
“Drenajsız” davranışın seçilmesi de ilave boşluk suyu basınçlarının bütünüyle geliştirilmesi için kullanılırlar. “Gözeneksiz” davranışın seçilmesi de, ne başlangıç ne de ilave boşluk suyu basıncının bütünüyle hesaba dahil edilmemesi için yapılır. Bu tür uygulamalar beton ve kayanın modellenmesinde kullanılabilirler. Geçirimsiz davranış genellikle lineer elastik modelle birlikte kullanılmaktadır.

En önemli seçim ise malzemenin ne olacağı ve bu modellerin parametreleridir. Zeminler için Plaxis'de 5 farklı modelleme seçeneği vardır.

- Lineer Elastik Model
- Mohr-Coulomb Modeli
- Pekleşen Zemin Modeli
- Yumuşak Zemin Modeli
- Yumuşak Zemin Sünme Modeli



Şekil 7.8: Malzeme tanımlama menüsü



Şekil 7.9: Genel malzeme özellikleri menüsü

Yeni malzeme tanımlaması yapıldıktan sonra, malzemeye ait parametrelerin belirlenmesi için Şekil 7.10 ve Şekil 7.11’de belirtilen parametre tanımlama menüleri kullanılmaktadır.

The screenshot shows the 'Mohr-Coulomb - <NoName>' dialog box with the 'Parameters' tab selected. The dialog is divided into four main sections:

- Stiffness:** E_{ref} (0,000 kN/m²) and ν (0,000).
- Strength:** c_{ref} (0,000 kN/m²), ϕ (0,000 °), and ψ (0,000 °).
- Alternatives:** G_{ref} (0,000 kN/m²) and E_{oed} (0,000 kN/m²).
- Velocities:** V_s (0,000 m/s) and V_p (0,000 m/s).

At the bottom right, there is an 'Advanced...' button. At the bottom, there are buttons for 'SoilTest', 'Next', 'OK', and 'Cancel'.

Şekil 7.10: Parametreleri tanımlama menüsü

The screenshot shows the 'Mohr-Coulomb - <NoName>' dialog box with the 'Interfaces' tab selected. The dialog is divided into two main sections:

- Strength:** Radio buttons for 'Rigid' (selected) and 'Manual'. Below is a field for R_{inter} (1,000).
- Real interface thickness:** A field for δ_{inter} (0,000).

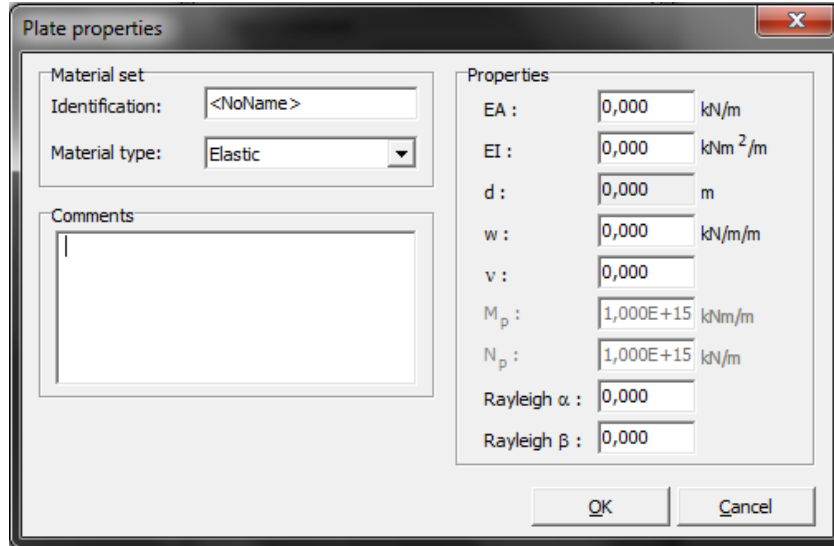
At the bottom, there are buttons for 'SoilTest', 'Next', 'OK', and 'Cancel'.

Şekil 7.11: Ara yüzey girdileri

Bir sonraki aşama ise ara yüzey için parametrelerin seçilmesidir. İlk yapılması gereken seçim ara yüzey “dayanım” değeridir (R_{inter}). Ara yüzey dayanımı için “grid” opsiyonu ($R_{inter}=1$), ara yüzey çevresindeki zeminin dayanımını etkilemeyecekse kullanılır. Genelde gerçek zemin-yapı etkileşimi zeminden daha zayıf, daha esnektir. Bu durumda R_{inter} değeri “Manuel” olarak girilebilir (Şekil 7.11).

Ara yüzey için yapılması gereken diğer seçim de “permeabilite” içindir. Ara yüzeyler, ara yüzeye dik akış için bir permeabiliteye (k_n) ve ara yüzeye paralel akış için ayrı bir permeabiliteye (k_s) sahiptirler.

Ara yüzey için “geçirimsiz” seçeneği, ara yüzeye dik akışı sınırlandırmak istendiğinde kullanılır. Örnek olarak, palplanj duvar modellenirken kullanılan kirişler aslında geçirimlidir. Duvarı su geçirmez yapmak için ise ara yüzeylere “geçirimsiz” özelliği verilebilir. Bu durum seçildiğinde düşük bir (k_n) değeri (zemin parametrelerinin 0,001’i) ve k_s için de sıfır değeri elde edilecektir. Ara yüzey için “drenajlı” seçeneği, suyun ara yüzey içinde paralel olarak serbestçe akışına izin vermek için yapılır.



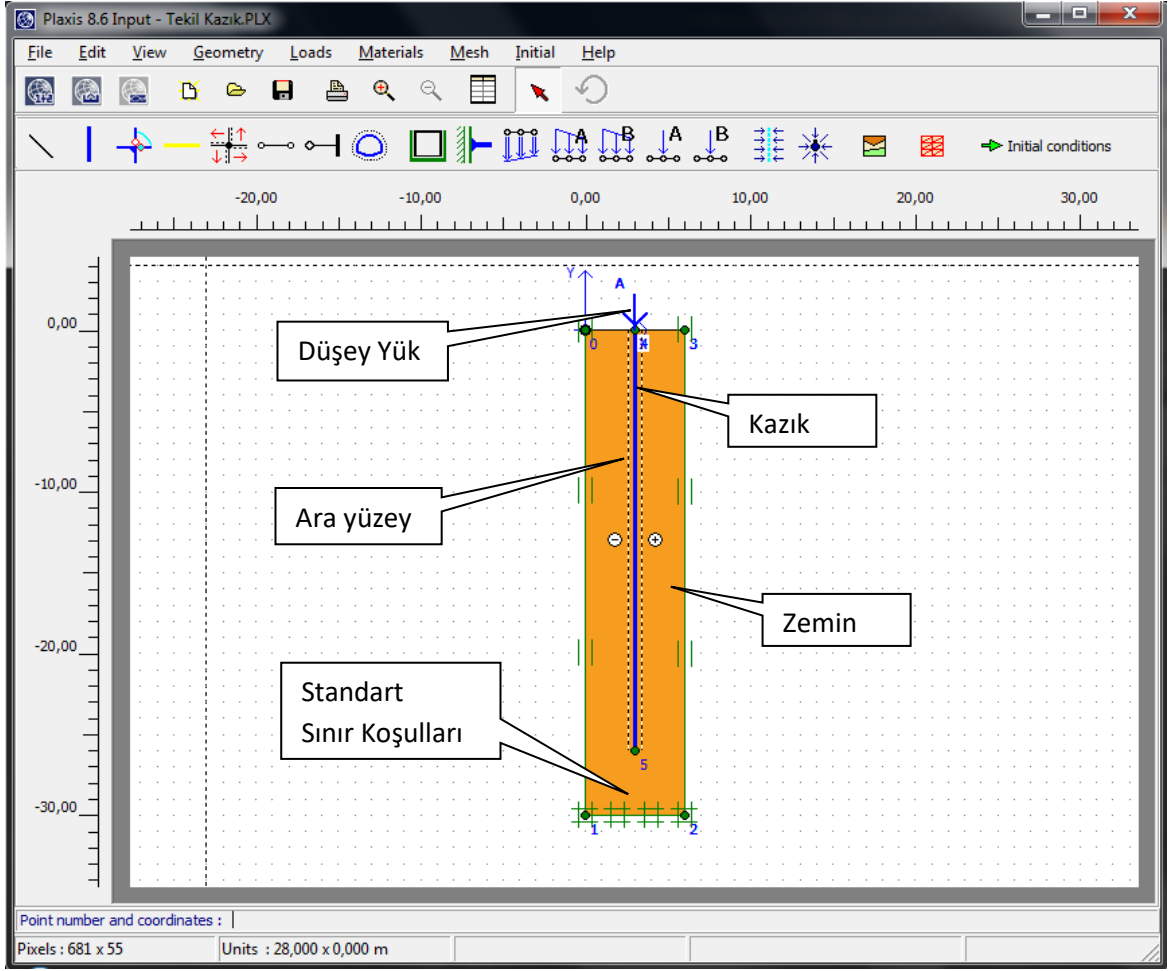
Şekil 7.12: Kiriş eleman özellikleri menüsü

Zeminlerin ve ara yüzeylerin özellikleri tanımlandıktan sonra sıra kirişlerin (plates) özelliklerinin tanımlanmasına geçilir. Kirişler için girdi parametreleri de Şekil 7.12’de görüldüğü gibidir. Kirişler için ilk olarak “plastik” ve “elastoplastik” malzeme tiplerinden biri seçilmelidir. Elastik tip seçilmesi durumunda, modellemede gerekli parametreler, aksenal rijitlik, eğilme rijitliği, ağırlık ve poisson oranıdır. Maksimum

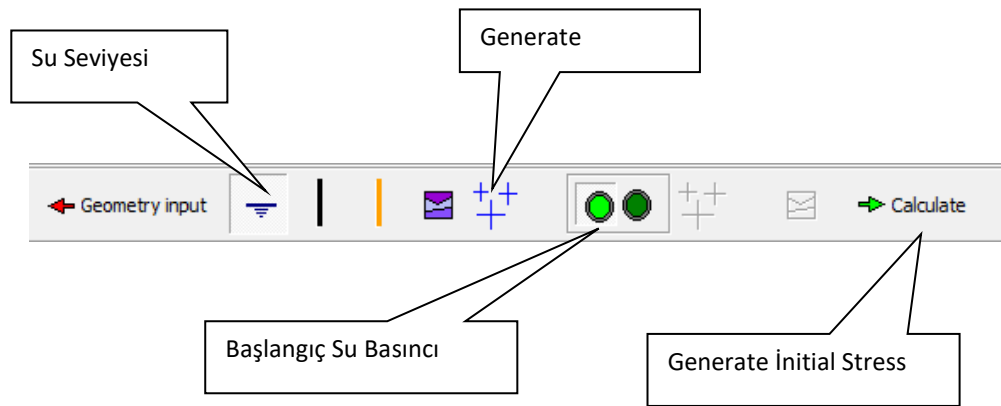
eğilme momenti ve maksimum aksenal yük değerleri (M_p ve N_p) otomatik olarak hesaplanır. Elato-plastik model kullanıldığında ise maksimum eğilme momenti değeri manuel olarak girilebilir ve plastisite de hesaplara katılmış olur. Eğer tanımlanan değerler aşırsa gerilmeler plastisite teorisine göre yeniden dağıtılır ve tersine döndürülemez deformasyonlara yol açar.

Analiz için model oluştururken öncelikle temel analiz parametreleri, çizim alanı ölçüleri ve birimler belirlenir. Oluşturulan yeni proje ekranında kazık ve zemin modelinin çizimi uygun elemanlar seçilerek yapılır. Zemin ve kazık için materyal oluşturulup tanımlama yapıldıktan sonra sisteme etki edecek yük seçilir ve daha sonra sistem meshlere ayrılır. Sonrasında yer altı suyu etkisi tanımlandıktan sonra hesaplama aşamasına geçilir. Burada dikkat edilmesi gereken husus yapılacak her bir işlemin aşamalı olarak tanımlanmasıdır. Tüm işlemler sonucunda analiz sonuçları elde edilmektedir.

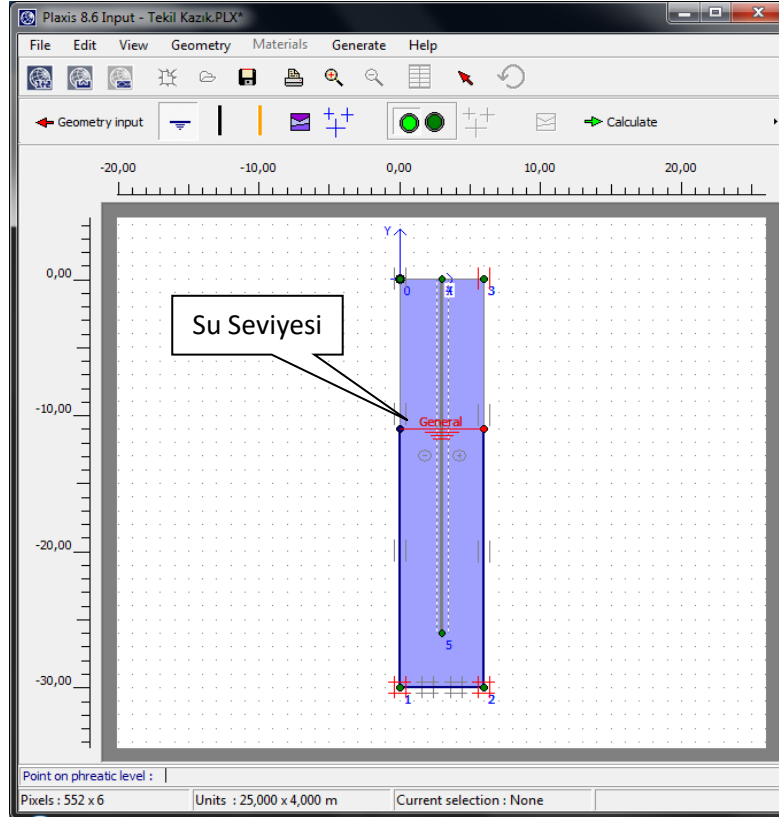
Programda analize başlanacağı zaman Şekil 7.13 gösterildiği üzere, önce çizim alanı sınırları belirlenir. Daha sonra tanımlamak istediğimiz elemanın çizimi yapılarak malzeme özellikleri ve parametreleri tanımlanır. Sisteme ait ara yüzey tanımlaması yapıldıktan sonra etki edecek yükler ve büyüklükleri tanımlanır. Oluşturulan model tamamlandıktan sonra başlangıç koşulları menüsü olarak adlandırılan ve Şekil 7.14'de belirtilen su seviyesi, başlangıç su basıncı tanımlamalarına geçilir. Şekil 7.15'de gösterildiği üzere sisteme ait yer altı su seviyesi belirlenir ve Şekil 7.16'da gösterildiği şekilde aktif su basıncı belirlenir. Su parametreleri tanımlandıktan sonra Şekil 7.17'deki gibi efektif gerilmeler hesaplanır. Şekil 7.18'de hesaplamalar için gerekli olan hesap fazları tanımlanır. Son olarak Şekil 7.19'da görüleceği gibi analiz sonrasında elde edilen sonlu eleman mesh ağı elde edilir.



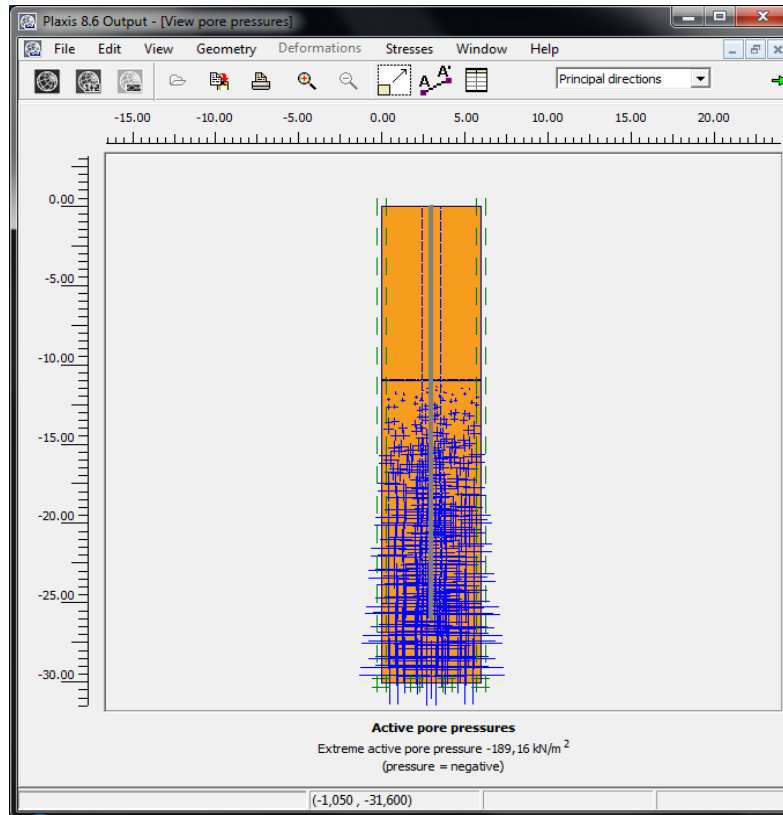
Şekil 7.13: Model oluşturma menüsü



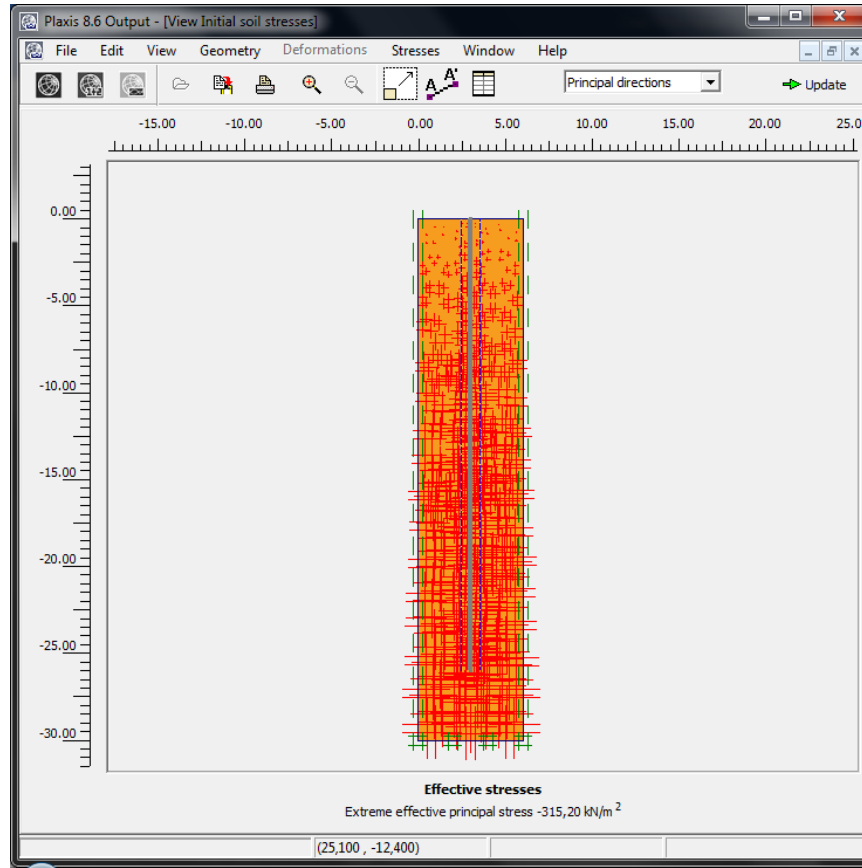
Şekil 7.14: Başlangıç koşulları araç çubuğu



Şekil 7.15: Yer altı su seviyesinin tanımlanması



Şekil 7.16: Aktif su basıncı



Şekil 7.17: Efektif gerilme

Plaxis 8.5 Calculations - Tekil Kazık.PLX

File Edit View Calculate Help

General Parameters Multipliers Preview

Phase
Number / ID.: 2 <Phase 2>
Start from phase: 1 - <Phase 1>

Calculation type
Plastic analysis
Advanced

Log info
Prescribed ultimate state fully reached

Comments

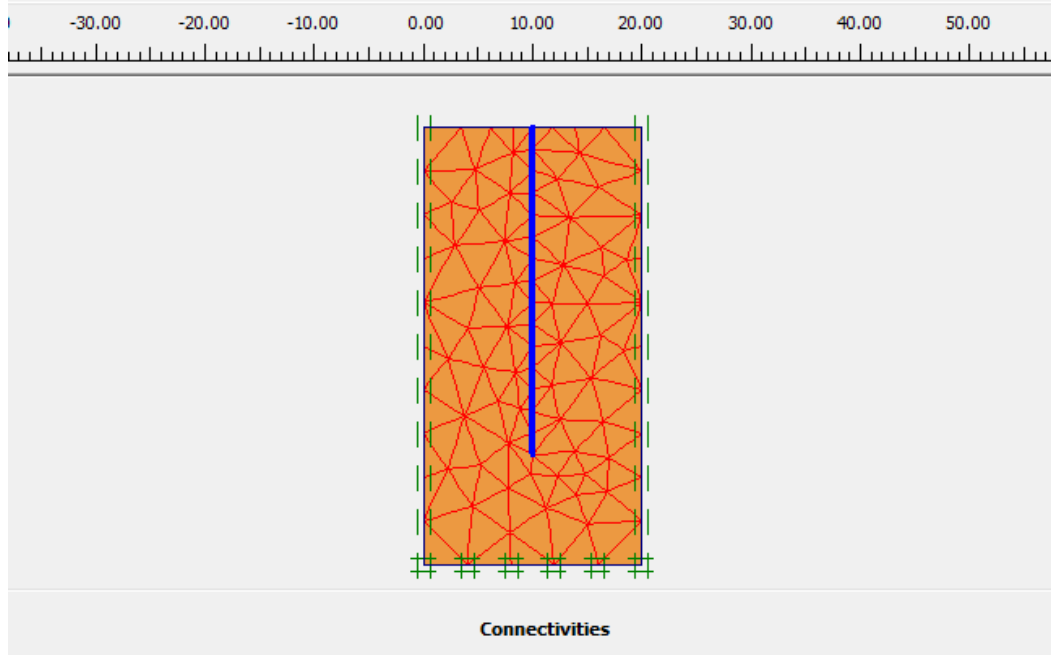
Parameters

Next Insert Delete...

Identification	Phase no.	Start from	Calculation	Loading input	Time	Wa...	First	Last
Initial phase	0	0	N/A	N/A	0,00 ...	0	0	0
✓ <Phase 1>	1	0	Plastic analysis	Staged construction	0,00 ...	1	1	2
✓ <Phase 2>	2	1	Plastic analysis	Staged construction	0,00 ...	2	3	5

Şekil 7.18: Sistem fazları tanımlama ekranı

Yapılan çalışmalarda kullanılan model, kohezyonlu ve kohezyonsuz olmak üzere iki ayrı zemin koşullarında teşkil edilen tekil bir kazığı temsil ediyor olmakla beraber, düşey ve yanal yük etkisi altındaki kazık davranışı iki boyutlu olarak sonlu elemanlar yöntemi ile araştırılmaktadır.



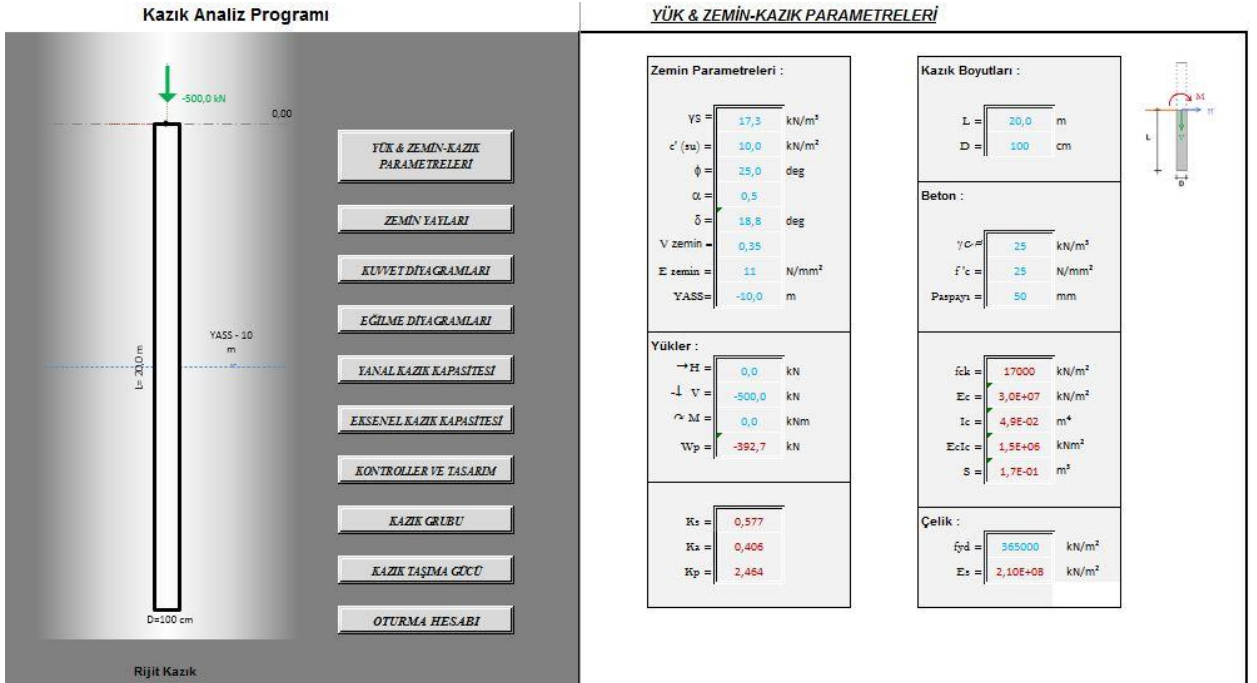
Şekil 7.19: Plaxis 2D sonlu elemanlar ağı

7.2 Kazık Analiz Programı

Sonlu eleman analizine paralel olarak, literatürde yer alan kazık taşıma gücü ve oturma hesap yöntemlerinden faydalanılarak hazırlanmış bir program yardımı ile sonuçların kıyaslaması yapılmıştır. Aynı kazık ve zemin parametreleri ile oluşacak sonuçlar irdelenmiştir.

7.2.1 Genel Bilgiler

Tekil kazık ve kazık gruplarına ait stabilite ve deformasyon analizleri gerçekleştirmeye yönelik kazık analiz programı geliştirilmiştir. Programın geliştirilmesinde temel amaç öncelikle sonlu elemanlar analizinin karmaşıklığından kaçınmak, hesaplamaları daha anlaşılabilir hale getirmek, analiz her aşamasını kontrol imkanı tanımak ve ekonomik açıdan kazanç sağlamaktır. Her ne kadar sonlu elemanlar analizi kadar kesin sonuç elde edilecek gibi görünse de, yapılan belli kabuller ile bu sorunu en aza indirmek hedeflenmiştir. Program ekranı açıldığında karşılaşıcağımız arayüz Şekil 7.20’de gösterilmektedir.

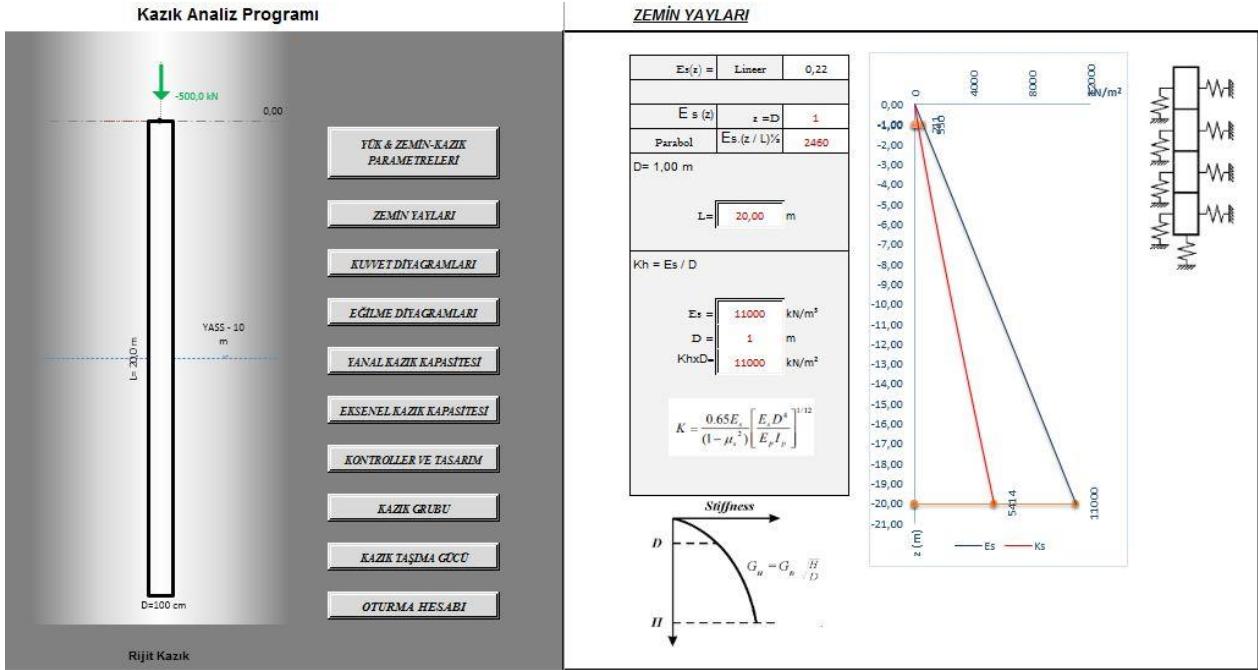


Şekil 7.20: Kazık analiz programı arayüzü

7.2.2 Programın Tanıtılması

Programın giriş sekmesinde her projede olduğu gibi analizi yapılacak olan sistemin parametrelerini girmek için sekmeler bulunmaktadır. Bununla birlikte sisteme etki eden yükleri tanımlama bölümü aynı sekme içerisinde yer almaktadır. Analize başlarken öncelikle zemine ait belli parametreleri bilmemiz gerekir. Zemin parametre değerlerini ilgili bölmelere girdikten sonra, kazık geometrik özelliklerini tanımlamak gerekir. Bu bölümde yapılacak değişiklikler eş zamanlı olarak ekranın sol bölümünde yer alan çizim alanında görüntülenebilmektedir. Çizim ekranında ayrıca sisteme etki

eden yük değerleri ve su seviyesi de görülebilmektedir. Buna ek olarak, kazık tasarımında etkili olan malzeme parametrelerinin giriş sekmeleri de bu ekrana yer almaktadır. Şekil 7.21’de kazık programında elde edilecek zemin yaylarının hesap ekranı gösterilmektedir.

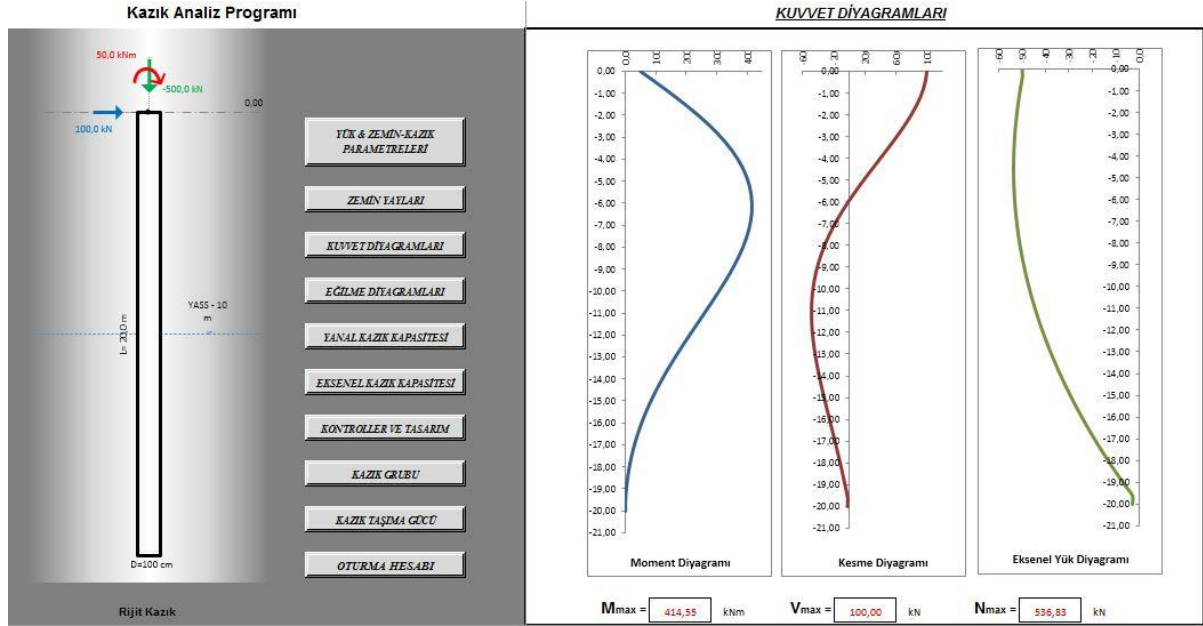


Şekil 7.21: Kazık analiz programı zemin yayları tayini

Sisteme ait yük, kazık ve zemin parametrelerinin tanımlanmasının ardından, tanımlanan bu parametreler kullanılarak program tarafından zemin elastisitesi ve boyuna yatak katsayısı eğrilerinin çizimi grafikte gibi yapılır. Analizi yapılacak zemin türüne göre dağılım değişkenlik gösterdiği, ihtiyaca göre idealize edilmiş eğri modeli istenildiği şekilde değiştirilebilir.

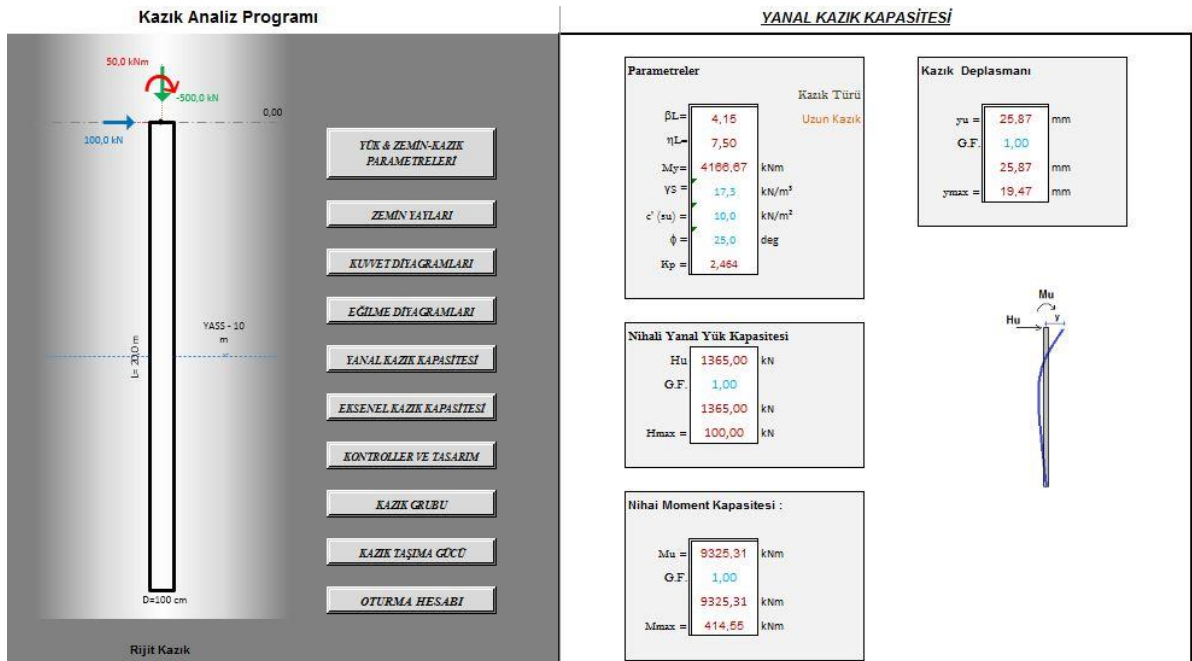
Analizin devam eden bölümünde farklı yükleme çeşitleri altında kazık kesitinde oluşacak reaksiyon kuvvetlerinin belirlenmesi yer almaktadır. Programa tanımlanan yükler, kazık parametreleri, zemin özellikleri doğrultusunda kazık profiline ait aksenal yük, kesme ve moment diyagramları çizimi yapılmaktadır. Kesite etki eden maksimum yük değerleri bu bölümde elde edilmektedir.

Kuvvet diyagramlarının belirlendiği görsel Şekil 7.22’de gösterilmektedir.



Şekil 7.22: Kazık analiz programı eksenel yük, moment ve kesme diyagramları

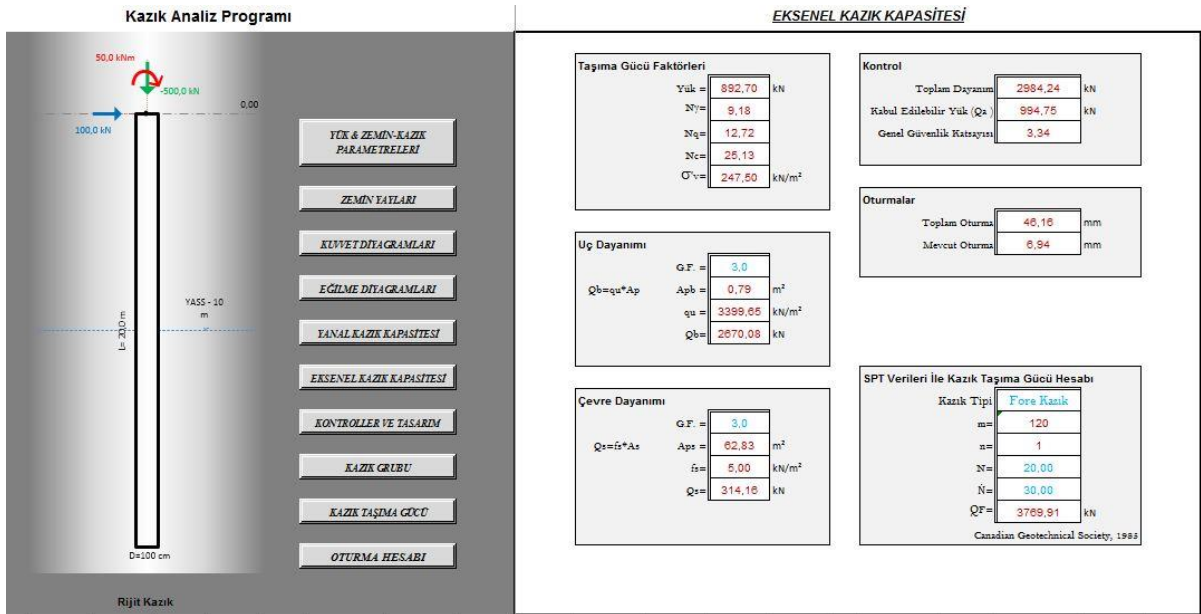
Bir sonraki aşamada ise yanıl kazık kapasitesi sekmesi yer almaktadır. Bu sekmede kuvvet diyagramlarından elde edilen yüklerle kıyaslama yapılarak hesaplanan maksimum yanıl yük ve moment taşıma kapasitesi değerleri kıyaslanmaktadır. Aynı zamanda tekil bir kazığın yanıl yük etkisi altında iken kazık ucunda oluşacak yanıl deplasman değeri belirlenmektedir. Bu sekmeğe ait ilgili görsel aşağıda gösterilmektedir. Şekil 7.23’de kazığa ait yanıl yük kapasitesi hesaplama ekranı gösterilmektedir.



Şekil 7.23: Kazık analiz programı yanıl kazık kapasitesi

Programın ilerleyen bölümünde tekil bir kazığa ait eksenel kazık kapasitesi kısmı yer almaktadır. Bu bölümde ilgili görselde görüleceği üzere hesaplamalarda kullanılacak olan taşıma gücü faktörleri belirlenmektedir. Ayrıca kazığın kendi ağırlığından dolayı oluşacak olan düşey yük, sisteme etki eden dış yük ile birlikte düşünülüp hesaplamalara dahil edilmektedir.

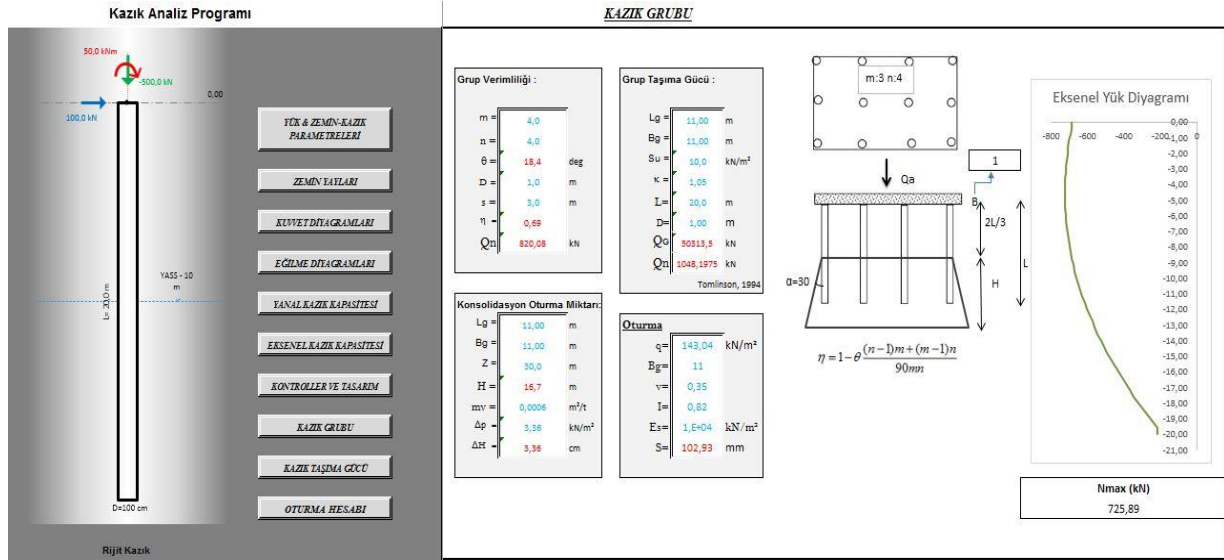
Bunun yanı sıra kazığa ait uç ve çevre dayanımı değerleri program tarafından hesaplanmaktadır. Hesap edilen uç ve çevre dayanım değerlerinden yola çıkılarak bir kazığın taşıyabileceği maksimum yük miktarı hesaplanmakta, aynı sekme içerisinde manuel olarak seçilecek güvenlik katsayıları ile izin verilebilir düşey yük belirlenmektedir. Zeminde meydana gelen oturma miktarı da aynı sekme içerisinde takip edilebilmektedir. Bununla birlikte arazi elde edilen SPT N vuruş sayıları mevcut ise bu veriler ile de doğrudan taşıma gücü hesabı yapılabilmektedir. Şekil 7.43'de kazığa ait eksenel yük kapasitesi hesaplama ekranı gösterilmektedir.



Şekil 7.24: Kazık analiz programı eksenel kazık kapasitesi

Bir sonraki aşamada tekil bir kazığa ait yanal ve eksenel kazık kapasiteleri hesaplandıktan sonra, kazığın bulunduğu gruba ait kontroller yer almaktadır. Bu sekmede kazık grubuna ait bazı parametrelerin tanımlanması gerekmektedir. Bir sıradaki kazık sayısı ve toplam kazık sıra sayısı gibi parametreler belirlendikten sonra program otomatik olarak grup içerisindeki bir kazığa ait nihai taşıma gücü değerini hesaplamaktadır. Aynı zamanda kohezyonlu zeminlerde oluşacak konsolidasyon oturmaları bu bölümde göz önüne alınmış olup, hesaplamalarda gerekli olan parametrelerin tanımlanmasıyla birlikte kazık grubunda meydana gelecek

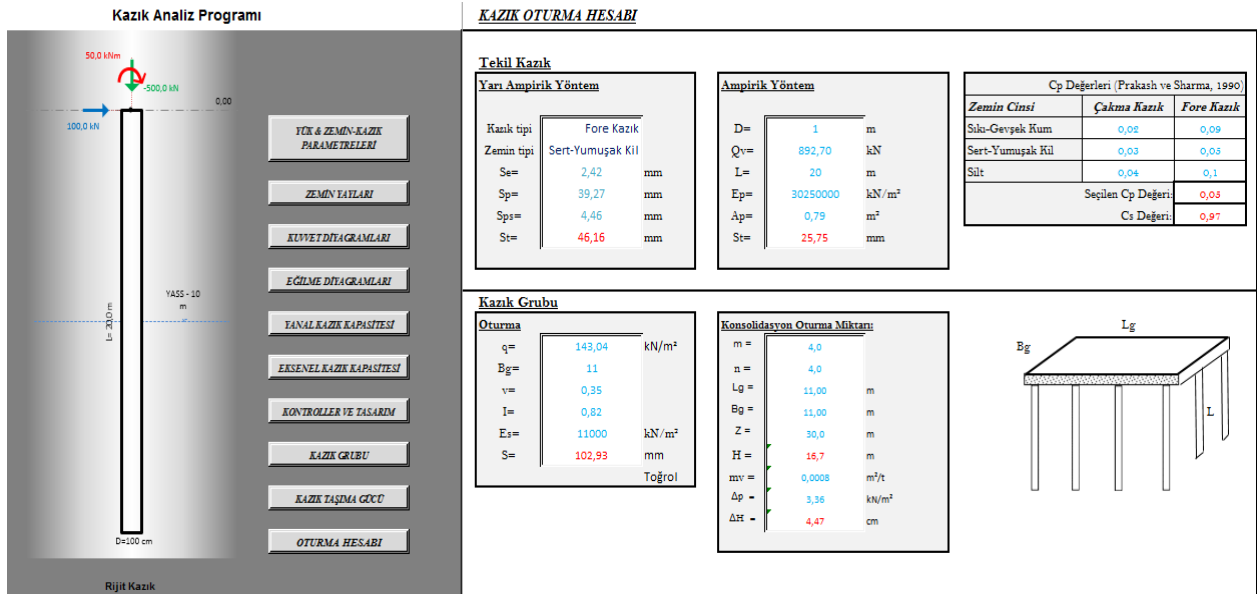
konsolidasyon oturma miktarı belirlenmektedir. Program içerisinde kullanıcıya yol göstermesi adına çeşitli şekil, abak ve açıklamalar yer almaktadır. Bu sekmeğe ait görsel aşağıda verilmektedir. Kazık grubunda yapılan hesaplamaların bulunduğu ekran görseli Şekil 7.25’de gösterilmektedir.

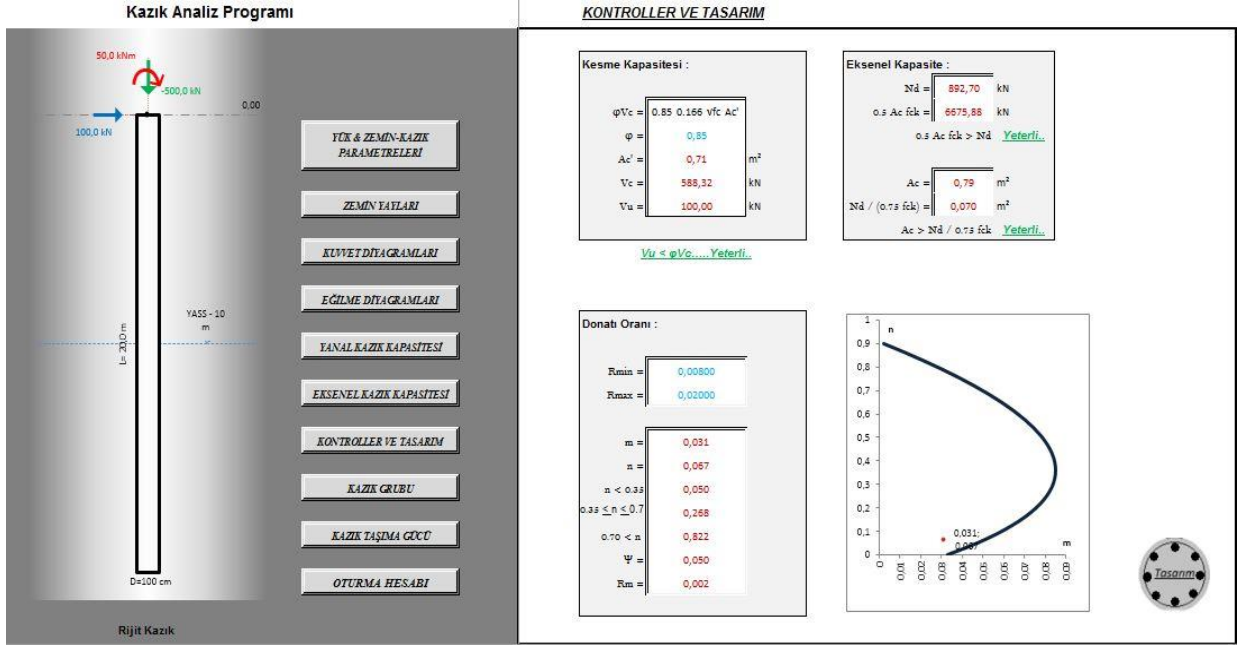


Şekil 7.25: Kazık analiz programı kazık grubu hesaplamaları

Aynı sekme içerisinde ayrıca kazık grubuna ait parametrelerin tanımlanmasıyla birlikte grup taşıma gücü değerleri elde edilmektedir. Aynı zamanda elde edilen değerler ile ilgili önerilen limit değerler belirtilmekte olup değerlendirme kullanıcıya bırakılmıştır. Sisteme ait oturma hesaplamaları Şekil 7.26’da gösterilmektedir.

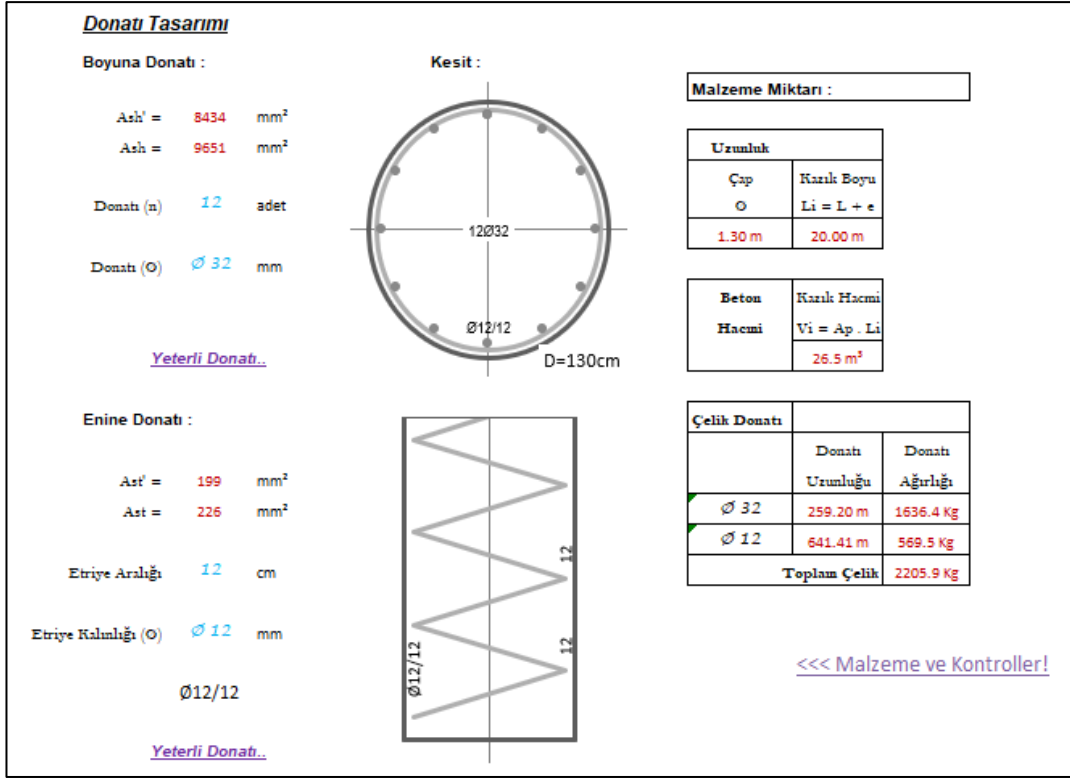
Şekil 7.26: Kazık analiz programı kazık oturma hesaplamaları





Şekil 7.27: Kazık kesiti betonarme hesaplamaları

Şekil 7.27’de gösterildiği üzere, kazığa ait taşıma gücü ve deformasyon hesaplamalarının tamamlanmasıyla birlikte kontrol ve tasarım aşamasına geçilmektedir. Elde edilen veriler yardımı ile kazık kesitine ait kesme ve eksenel yük taşıma kapasitesi kontrolleri yapılmaktadır. Kazık kesitinde yüklerin etkisiyle meydana gelen reaksiyon kuvvetleri yardımı ile kazığa ait donatı hesaplamalarına geçilmektedir. Kesit için yapılan betonarme hesaplamalar ile kazığın sahip olması gereken donatı miktarı belirlenir. Bu bölümde etkileşim şeması grafiği bulunmakla birlikte, tasarımda esas alınacak donatı oranları değerleri değiştirilebilmektedir. Kesitin gerekli donatı alanına ulaşması durumunda donatı yerleşimi yapılmaktadır. Tüm hesaplamalar tamamlandıktan sonra kazığın maruz kaldığı yükleri güvenli bir şekilde taşıması için gerekli toplam donatı ve beton miktarı Şekil 7.28’de gösterildiği şekilde hesaplanmaktadır. Bu uygulama sayesinde tasarımın ekonomik boyutu hakkında fikir sahibi olunabilmektedir.



Şekil 7.28: Kazık programı donatı tasarımı ve metraj hesaplamaları

8. MODELLEME VE ANALİZ

Aynı yük, zemin ve kazık parametreleri doğrultusunda iki boyutlu olarak sonlu elemanlar ve kazık analiz programı ile hesaplamalar yapılmıştır. Kohezyonlu ve kohezyonsuz olmak üzere iki ana başlık altında değerlendirme yapılmakta olup kazık başlığında yanal ve düşey yük etki etmektedir. Yapılan analizlerde yer altı suları etkisinin göz önüne alınarak ve alınmadan farklı hesaplamalar yapılmıştır. Öte yandan aynı zemin ve kazık koşulları altında kazık grubuna ait analizler yapılmıştır. Analizler sonucunda oluşacak deplasmanlar, gerilmeler, kuvvet ve eğilme diyagramları, düşey ve yatay kazık taşıma kapasitesi elde edilmekte ve bir kazığa ait donatı hesapları yapılmaktadır.

8.1 Kohezyonlu Zeminde Teşkil Edilen Tekil Kazığın Yatay ve Düşey Yükler Altında Analizi (YASS: -30m)

8.1.1 Plaxis İle Analiz

Analizlerde kullanılacak zemin ve kazık parametreleri Tablo 8.1 ve Tablo 8.2'de gösterilmektedir.

Tablo 8.1: Zemin parametreleri

<i>Zemin Cinsi</i>	Kohezyonlu
<i>Tabaka Kalınlığı (m)</i>	30
<i>γ (kN/m³)</i>	17,3
<i>γ_{sat} (kN/m³)</i>	18,58
<i>γ_{unsat} (kN/m³)</i>	13,9
<i>k_x, k_y (m/s)</i>	10 ⁻⁹
<i>Eref (kN/m²)</i>	11000
<i>Gref (kN/m²)</i>	4074,074
<i>ν</i>	0,35
<i>c (kN/m²)</i>	5
<i>ϕ(°)</i>	25

Model-Element	Plane Strain-15 Noded
Model Ölçüleri	X:0;20m, Y:-30;0m
YASS	-30m

Tablo 8.2: Kazık parametreleri

<i>D (m)</i>	1
<i>L (m)</i>	20
<i>A (m²)</i>	0,79
<i>d (m)</i>	0,886
<i>E (kN/m²)</i>	3.10 ⁷
<i>EA (kN)</i>	23561945
<i>EI (kNm²)</i>	1484893,4
<i>W (kN/m)</i>	7,7
<i>v</i>	0,2

γ : Doğal birim hacim ağırlığı

k_x, k_y : Permeabilite

γ_{unsat} : Kuru birim hacim ağırlığı

E_{ref} : Elastisite modülü

γ_{sat} : Doygun birim hacim ağırlığı

ν : Poisson oranı

c : Kohezyon değeri

\emptyset : İçsel sürtünme açısı

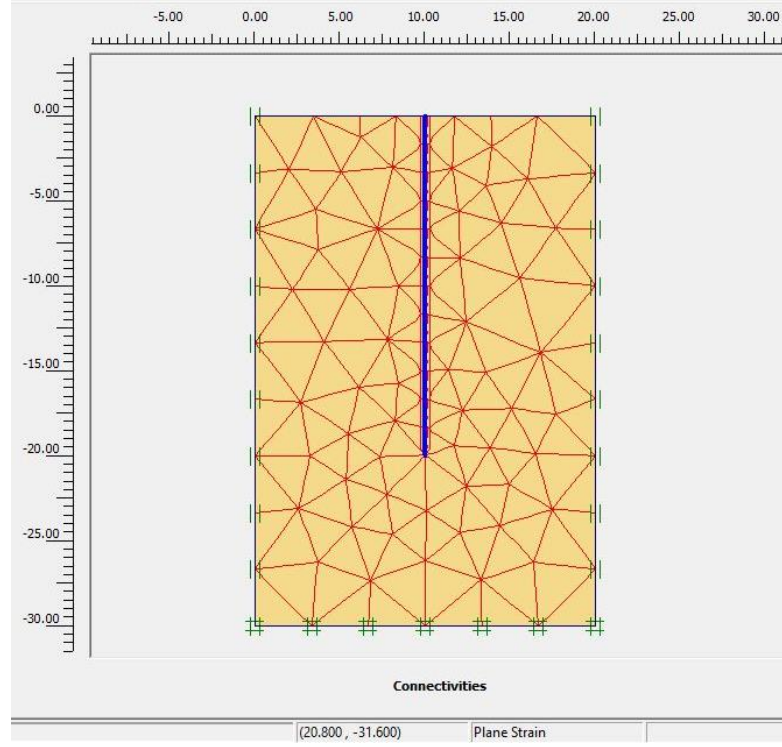
I : Atalet momenti

W : Kazığın birim ağırlığı

$$W_{kazık} = (\gamma_{beton} - \gamma_{zemin}) * D$$

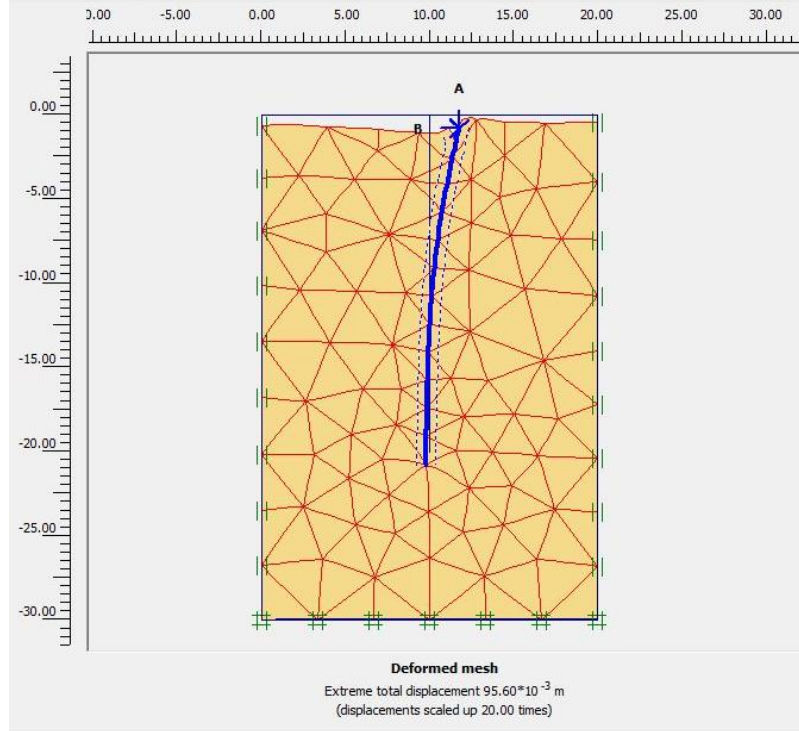
G_{ref} : Kayma modülü

Belirtilen zemin ve kazık parametreleri doğrultusunda iki boyutlu olarak sistem modellenmesi yapılmıştır. (Şekil 8.1)

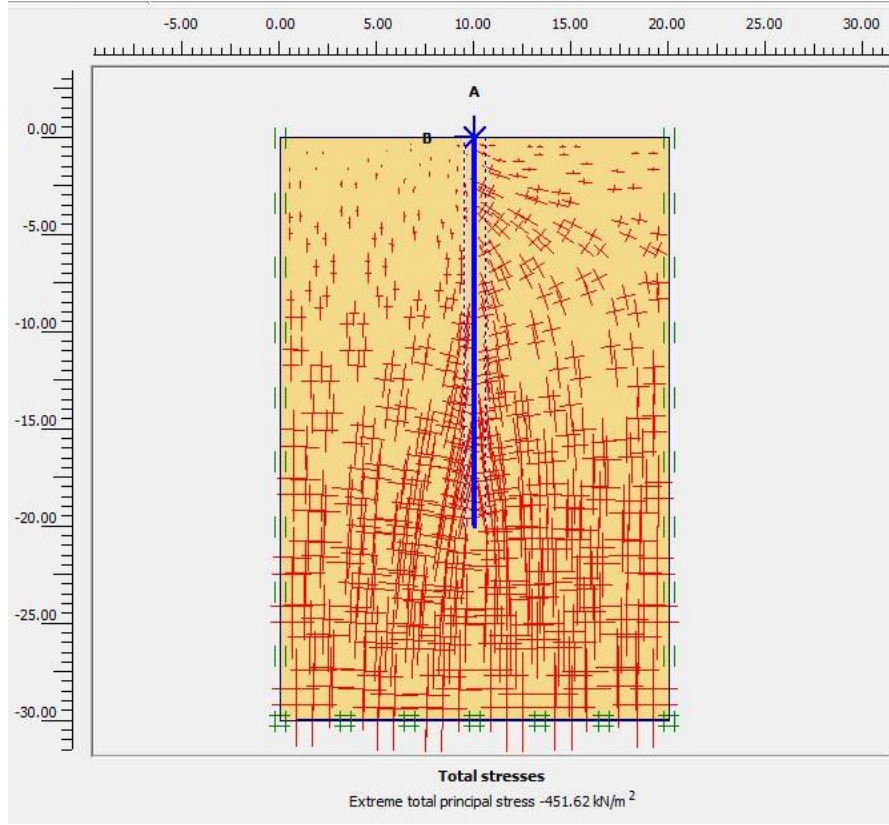


Şekil 8.2: Plaxis 2D sistem mesh ağı

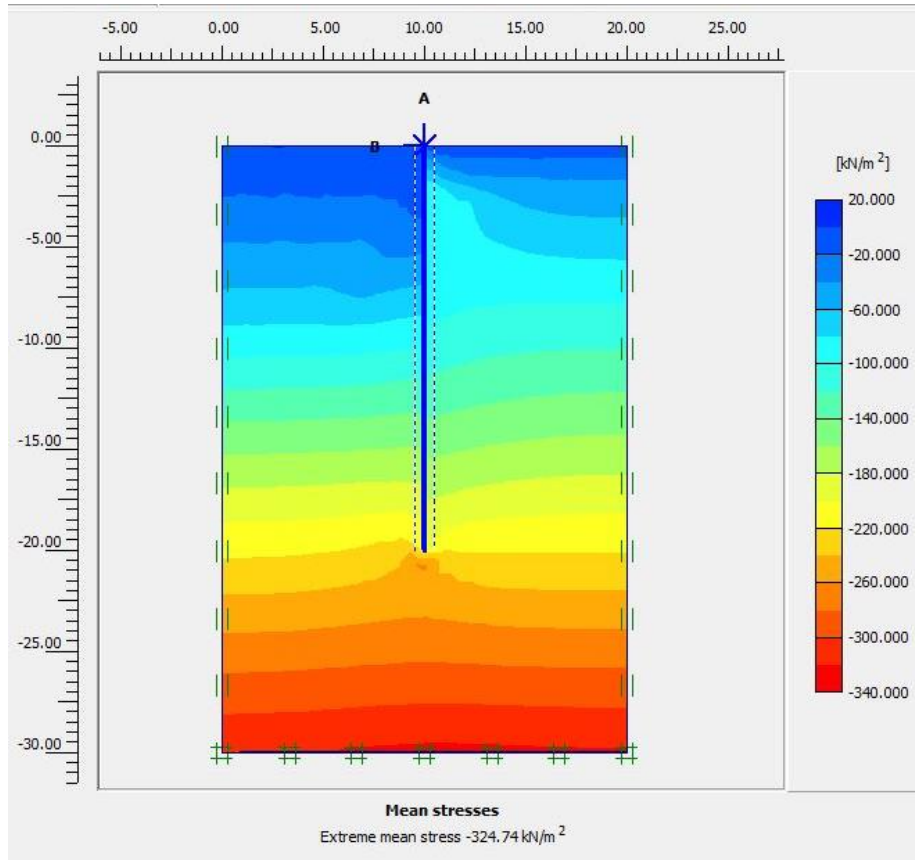
Yatay ve düşey yük altında sistemde oluşan deformasyonlar ve deforme mesh ağı aşağıda gösterilmektedir. Daha sonra analiz fazları tanımlanarak sisteme ait analiz sonuçları elde edilmiştir.



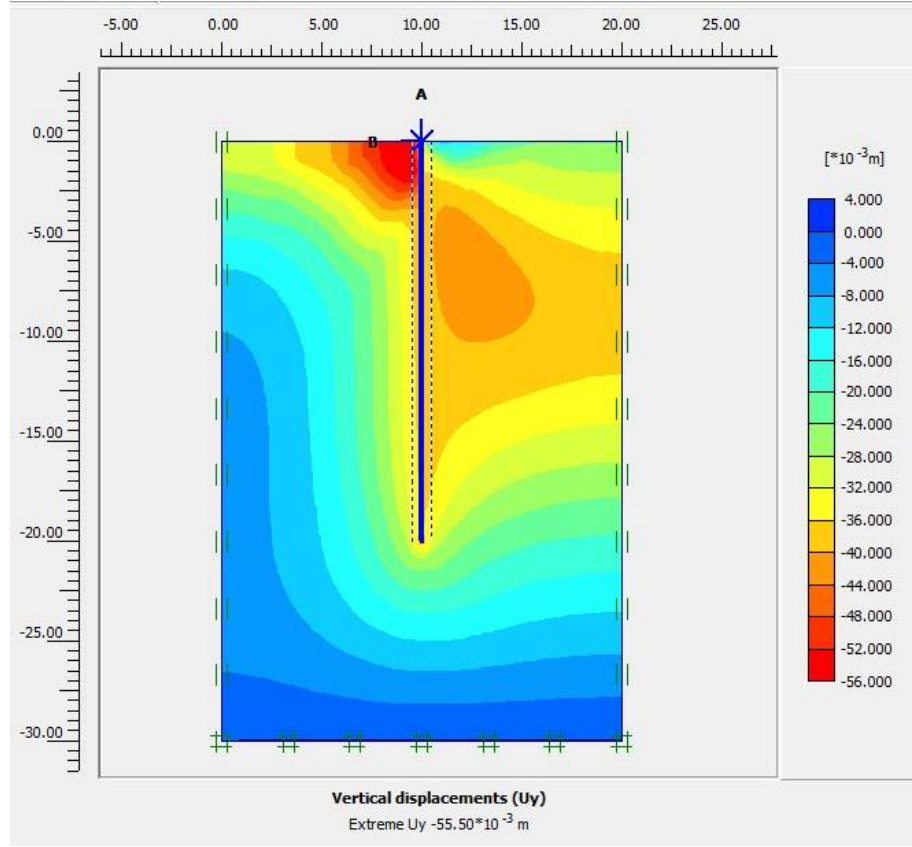
Şekil 8.3: Plaxis 2D sistemin deforme olmuş hali ve deforme mesh ağı



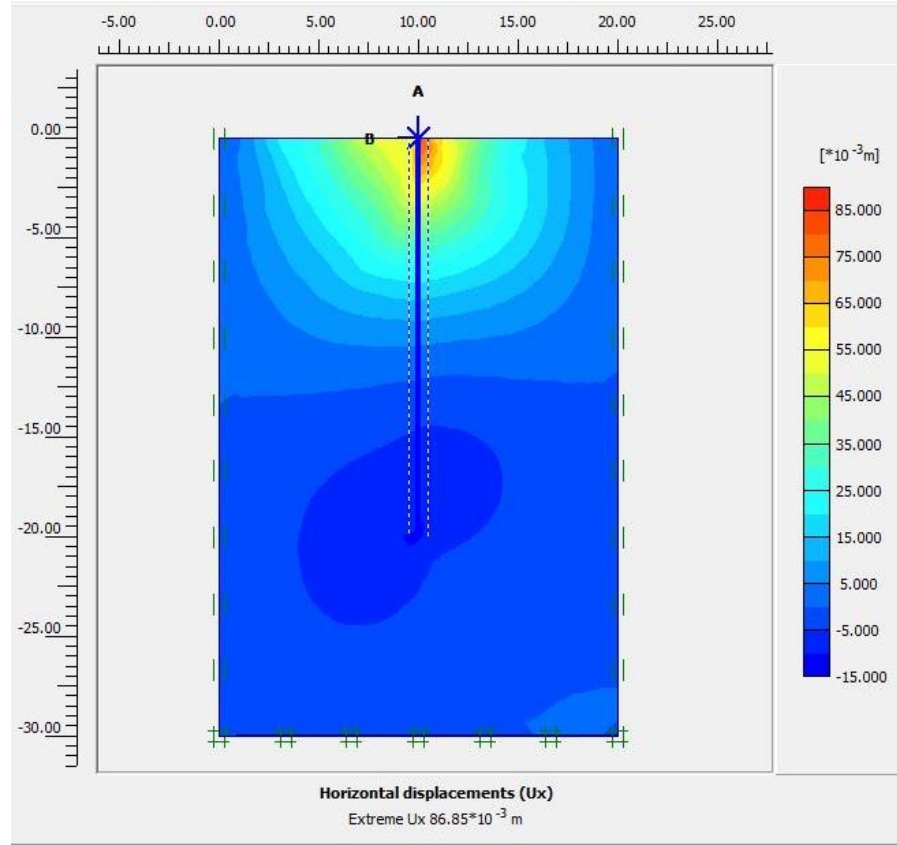
Şekil 8.4: Plaxis 2D toplam gerilme



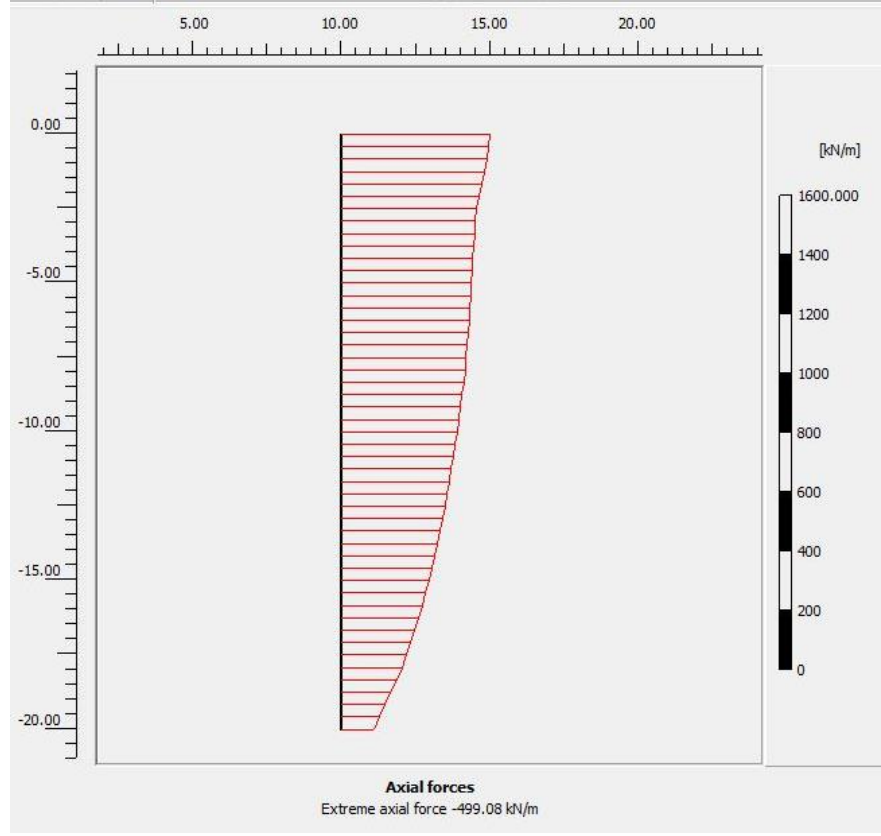
Şekil 8.5: Plaxis 2D ortalama gerilme



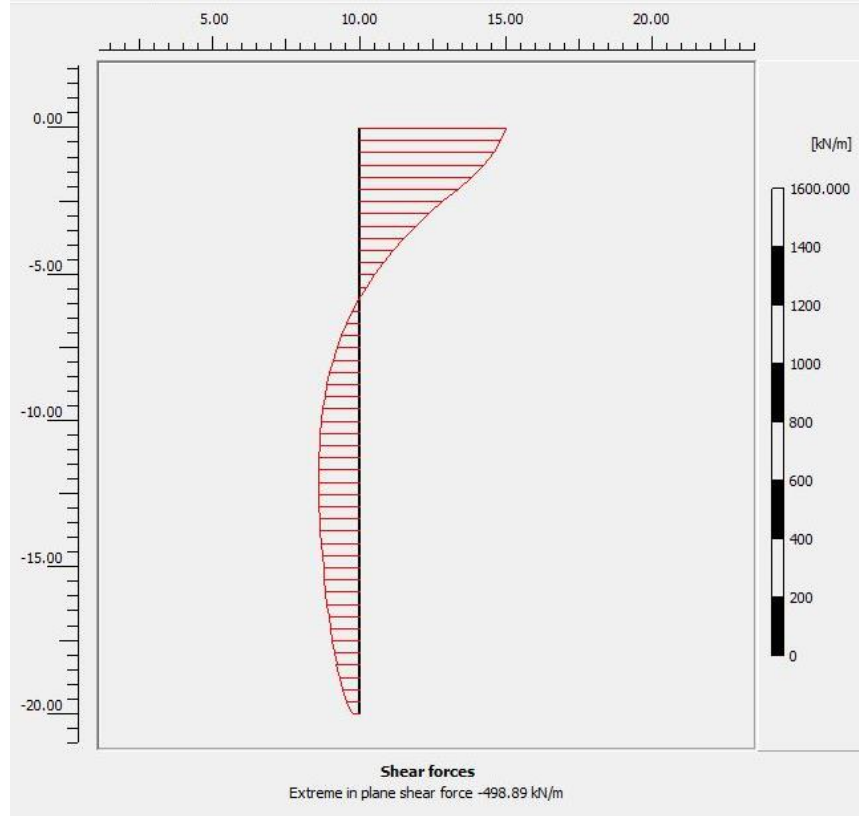
Şekil 8.6: Plaxis 2D düşey deplasman miktarı



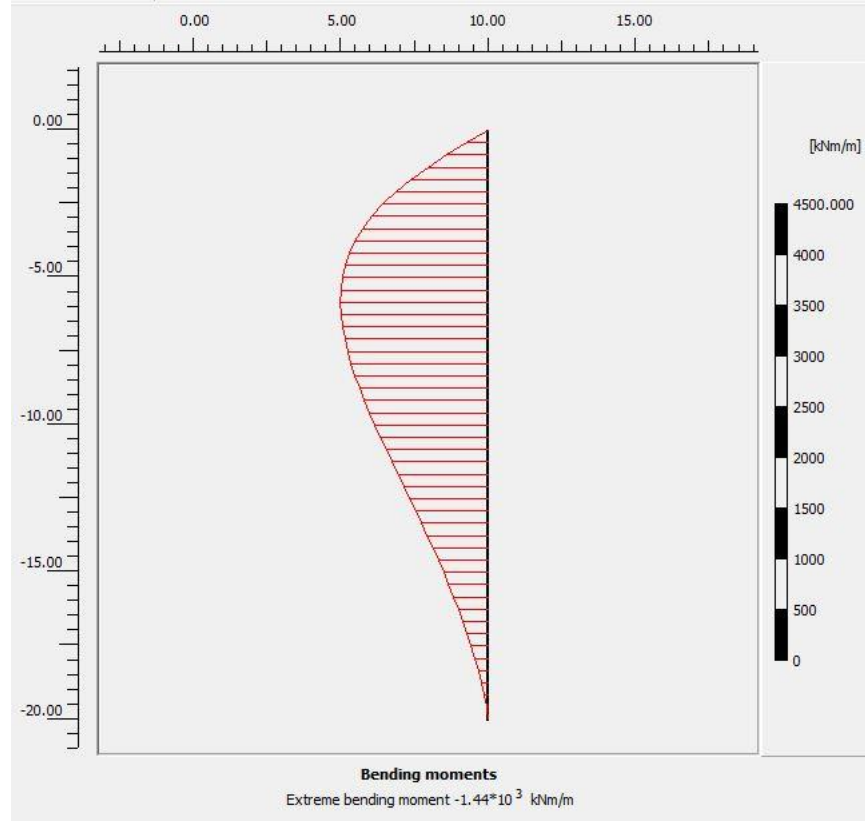
Şekil 8.7: Plaxis 2D yatay deplasman miktarı



Şekil 8.8: Plaxis 2D kazığa ait aksenal kuvvet diyagramı



Şekil 8.9: Plaxis 2D kazığa ait kesme kuvveti diyagramı



Şekil 8.10: Plaxis 2D kazığa ait moment diyagramı

Analizde elde edilen veriler özet olarak Tablo 3.3’de verilmektedir.

Tablo 8.3: Plaxis analiz sonuçları

<i>Toplam gerilme</i>	451,62 kN/m ²
<i>Ortalama gerilme</i>	324,74 kN/m ²
<i>Düşey deplasman</i>	$55,5 \times 10^{-3}$ m
<i>Yatay deplasman</i>	$86,85 \times 10^{-3}$ m
<i>Maksimum aksenal kuvvet</i>	499,09 kN
<i>Maksimum kesme kuvveti</i>	498,89 kN
<i>Maksimum moment</i>	$1,44 \times 10^3$ kNm

8.1.2 Kazık Programı İle Analiz

Kazık programıyla yapılacak analizlerde kullanılan zemin, yük ve kazık parametreleri Tablo 8.4 ve Tablo 8.5’de belirtilmektedir. Analizde elde edilen veriler görsel olarak aşağıda sıralanmaktadır.

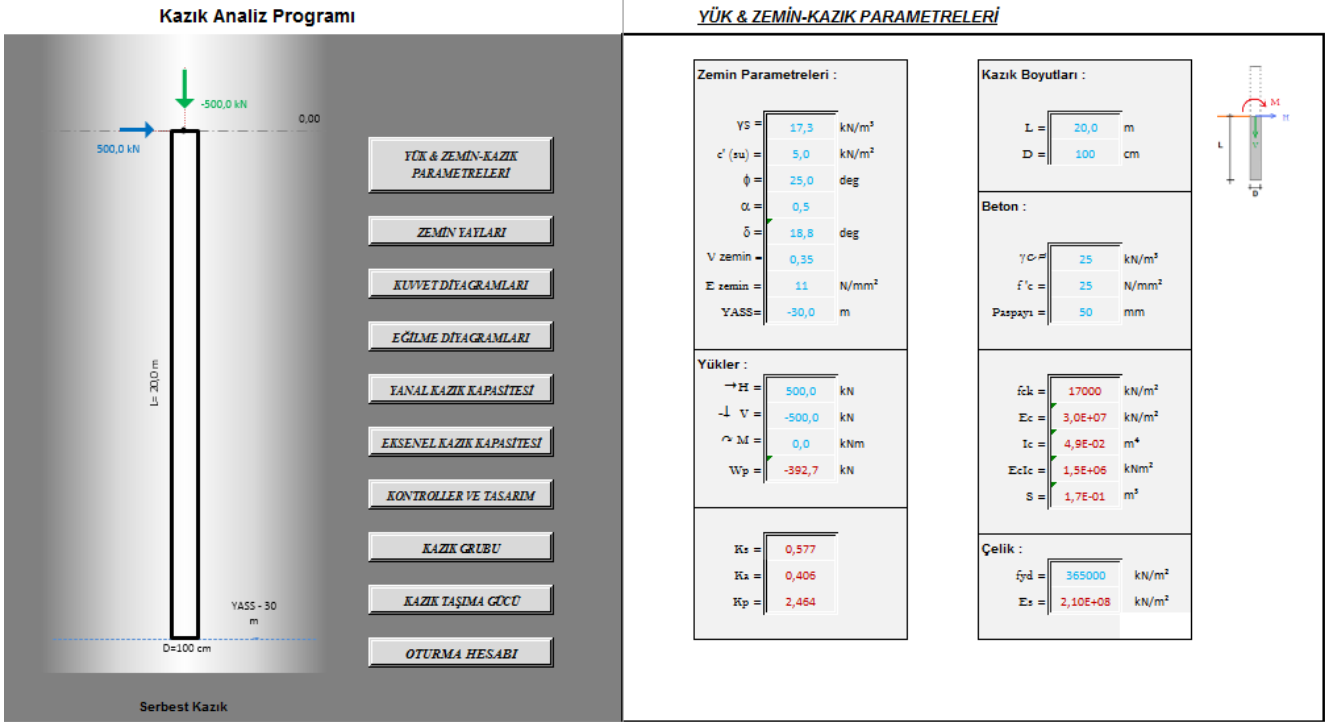
Tablo 8.4: Zemin parametreleri

<i>Zemin Cinsi</i>	Kohezyonlu
<i>Tabaka Kalınlığı (m)</i>	30
γ (kN/m ³)	17,3
ϕ (°)	25
<i>c</i> (kN/m ²)	5
<i>Eref</i> (kN/m ²)	11000
<i>α</i> (Adhezyon)	0,5
<i>δ</i> (Sürtünme açısı)	18,8
<i>v</i>	0,35
YASS	-30m

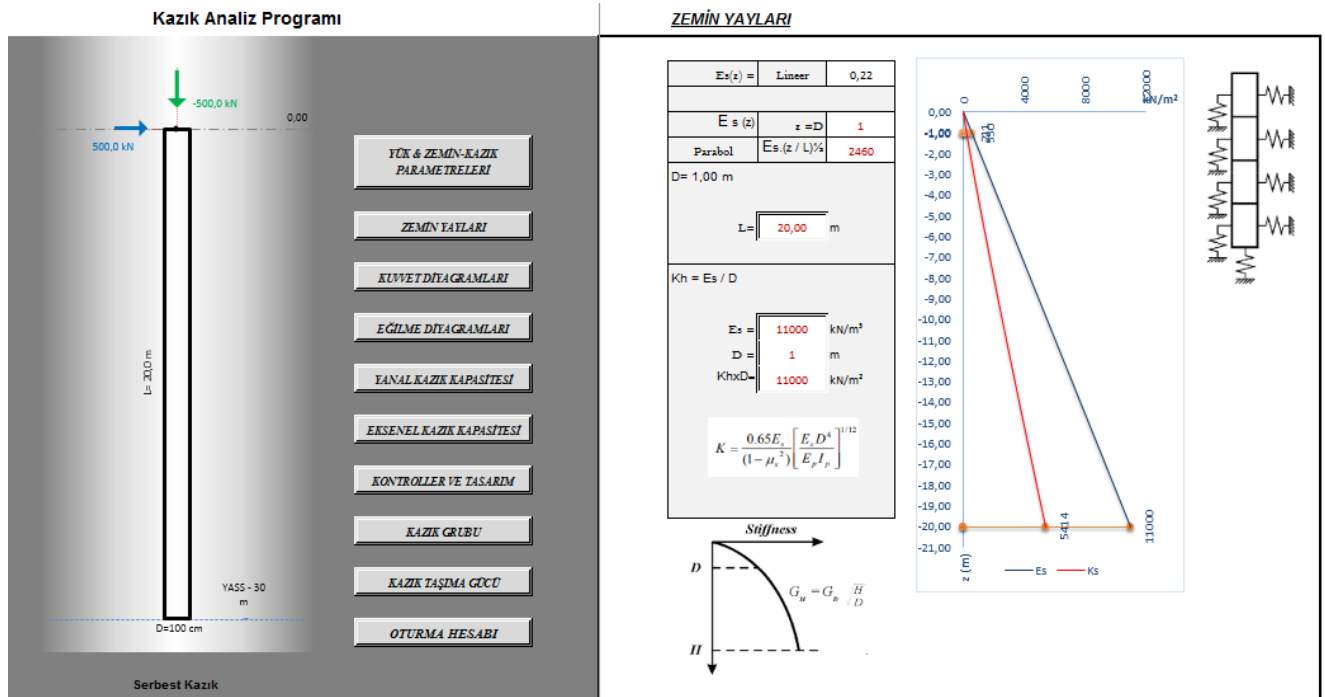
Tablo 8.5: Kazık parametreleri

<i>D</i> (m)	1
<i>L</i> (m)	20
<i>A</i> (m ²)	0,79
<i>E</i> (kN/m ²)	3.10 ⁷
<i>EA</i> (kN)	23561945
<i>EI</i> (kNm ²)	1484893,4
<i>S</i> (m ³)	0,167
<i>v</i>	0,2

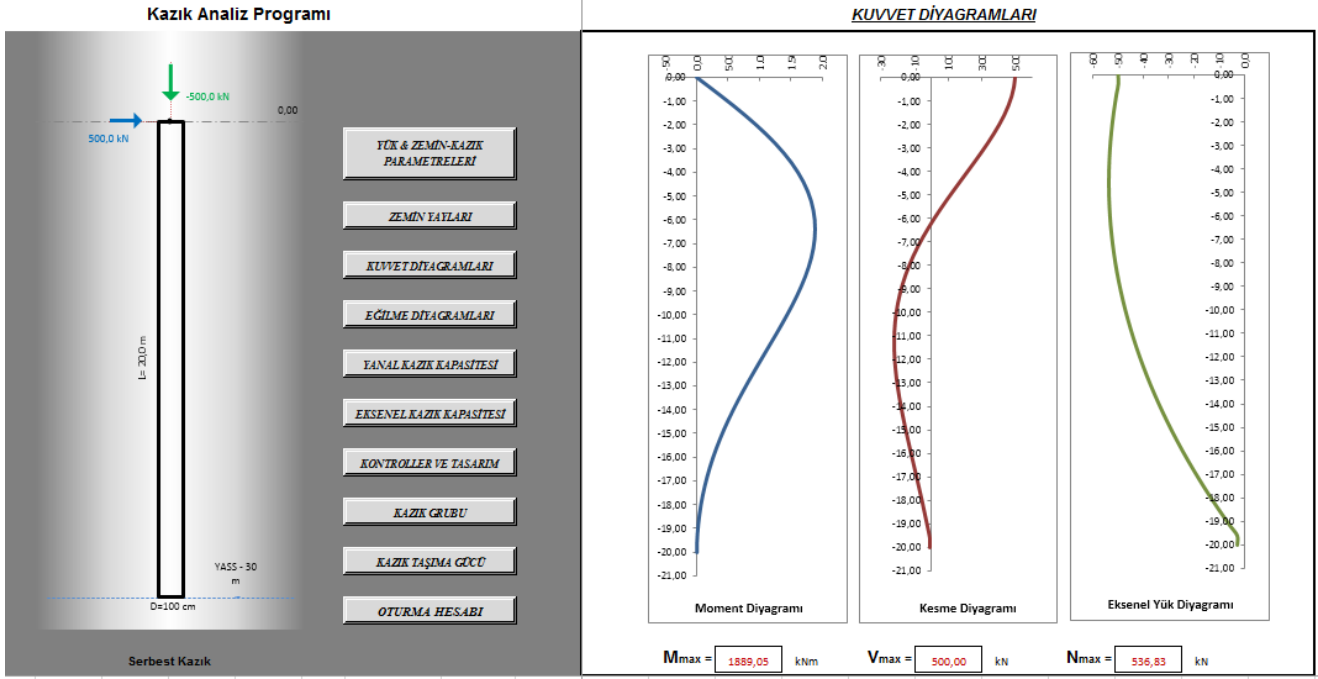
Yükler yatayda H=500kN ve düşeyde V=500kN olmak üzere seçilmiştir.



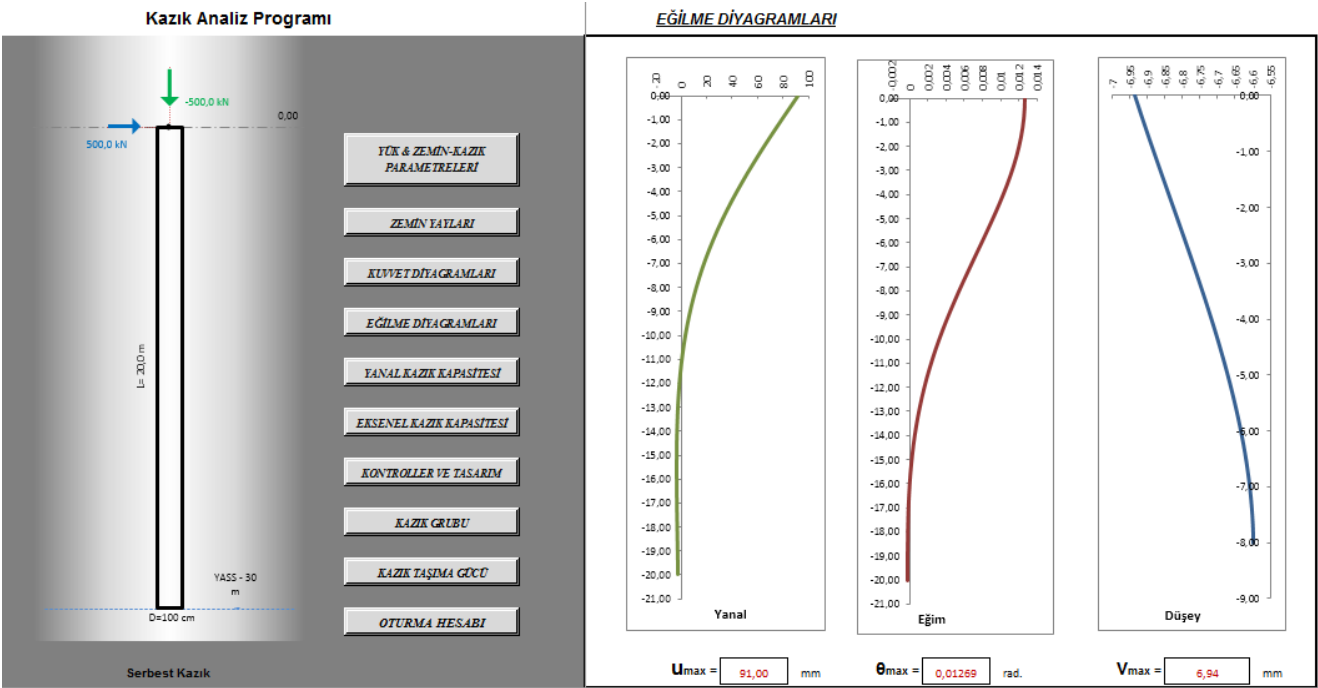
Şekil 8.11: Kazık analiz programı yük, zemin ve kazık parametrelerinin tayini



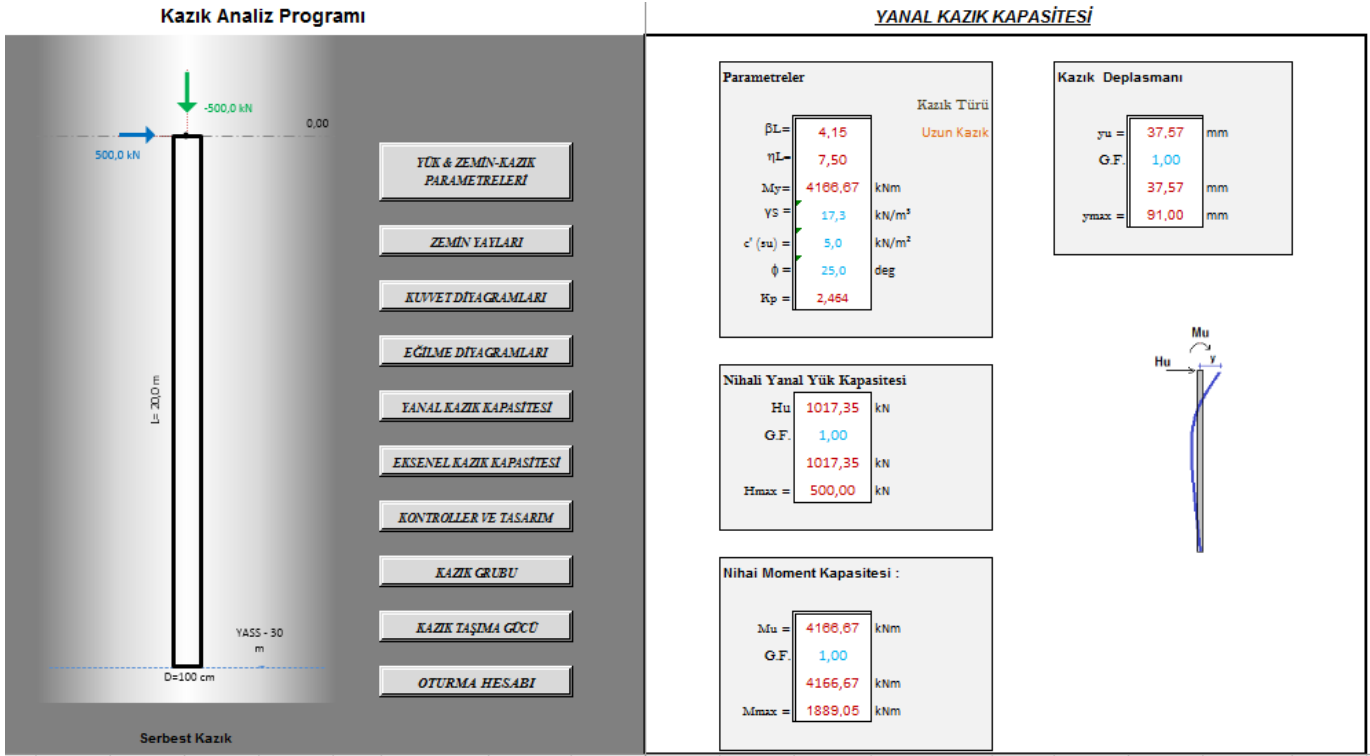
8.12: Kazık analiz programı zemin yaylarının tanımlanması



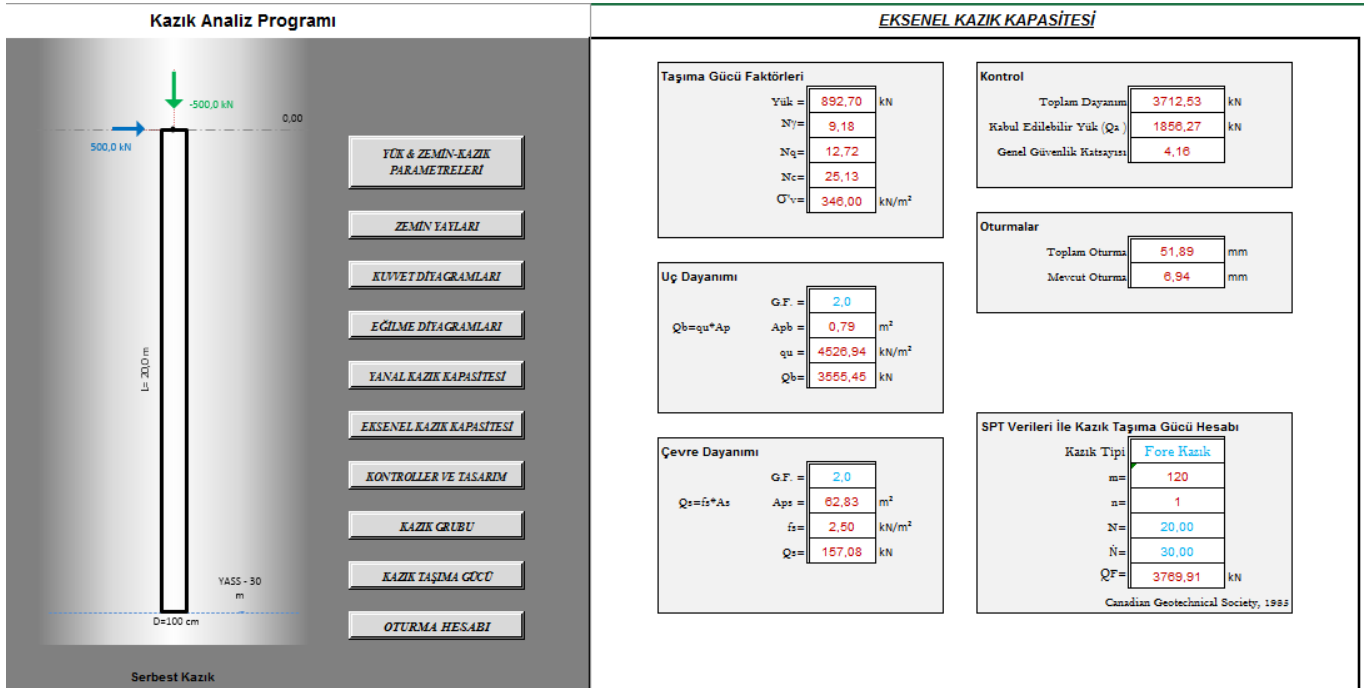
8.13: Kazık analiz programı kuvvet diyagramlarının elde edilmesi



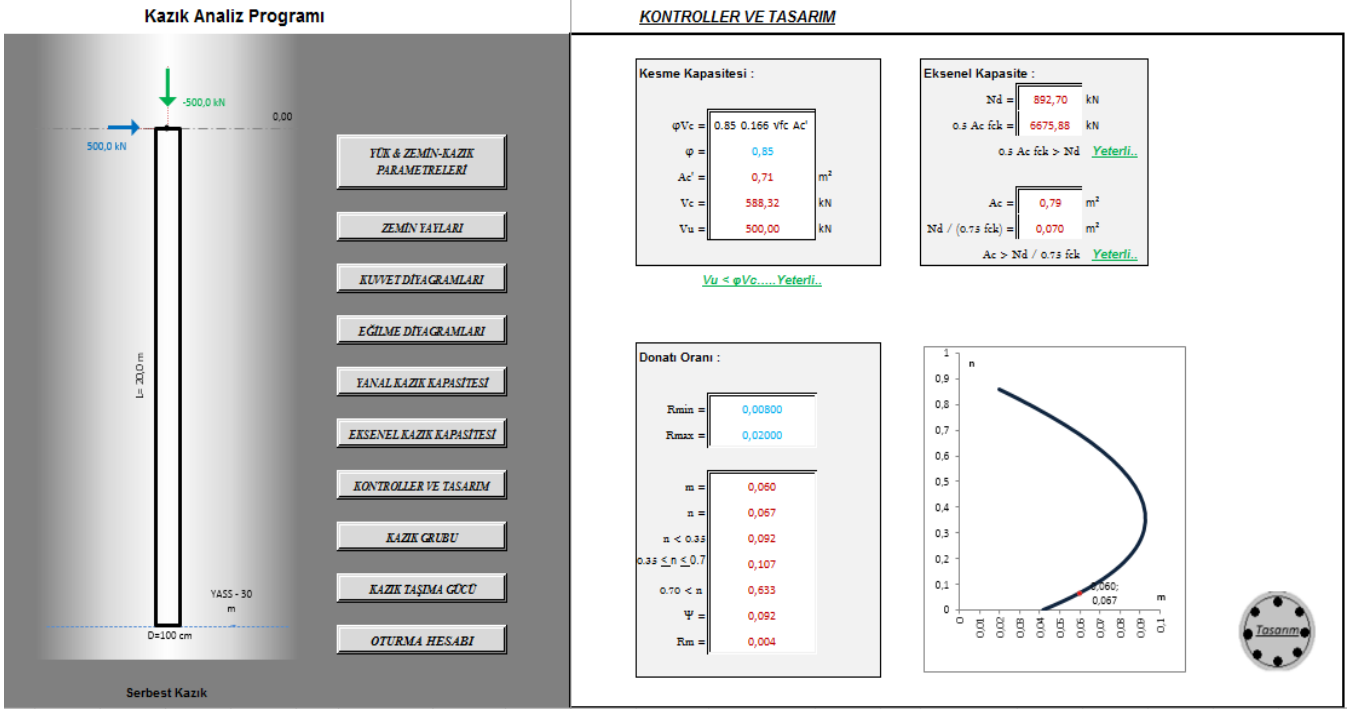
8.14: Kazık analiz programı deplasmanların elde edilmesi



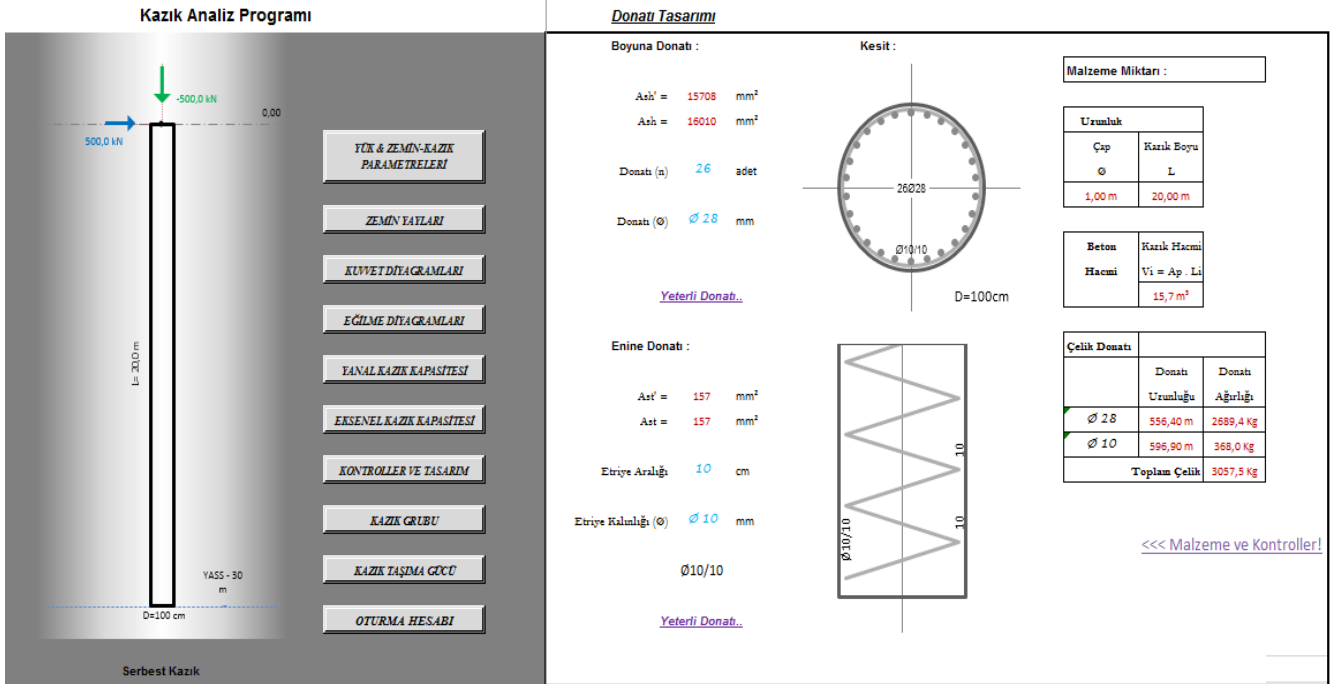
8.15: Kazık analiz programı yanal kazık kapasitesinin elde edilmesi



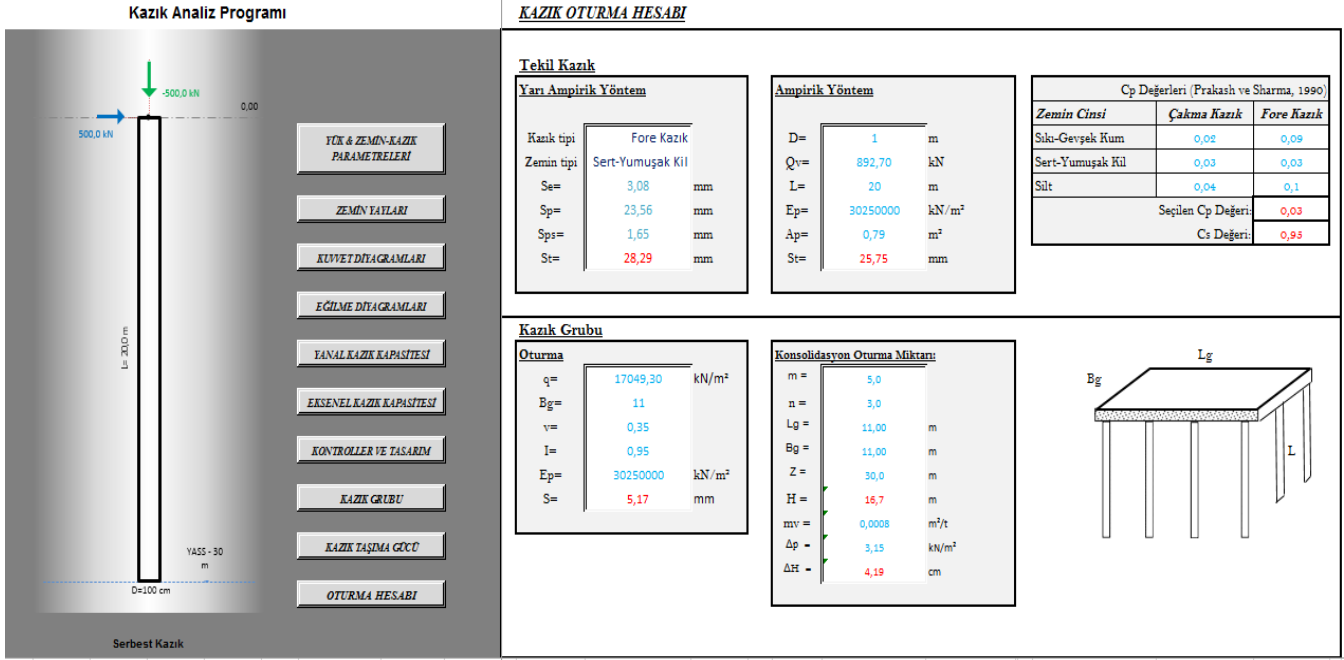
8.16: Kazık analiz programı eksenel kazık kapasitesinin elde edilmesi



8.17: Kazık analiz programı betonarme kesit tasarım hesaplamaları



8.18: Kazık analiz programı donatı ve metraj hesaplamaları



8.19: Kazık analiz programı oturma hesaplamaları

Yapılan analizler neticesinde elde edilen analiz sonuçları özet tablo olarak Tablo 8.6'da sunulmaktadır.

Tablo 8.6: Kazık analiz programı ile elde edilen analiz sonuçları özeti

Maksimum moment (knM)	1889,05
Maksimum kesme kuvveti (kN)	500,00
Maksimum aksenal kuvvet (kN)	536,83
Yatay deplasman (mm)	51,89
Düşey deplasman (mm)	91,00
Başlık dönme açısı (rad)	0,01269
İzin verilebilir yanıl yük (kN)	1017,35
İzin verilebilir moment (kNm)	4166,67
İzin verilebilir düşey yük (kN)	1856,27

8.2 Kohezyonlu Zeminde Teşkil Edilen Tekil Kazığın Yatay ve Düşey Yükler Altında Analizi (YASS:-10m)

8.2.1 Plaxis İle Analiz

Analizlerde kullanılacak zemin ve kazık parametreleri Tablo 8.7 ve Tablo 8.8'de gösterilmektedir.

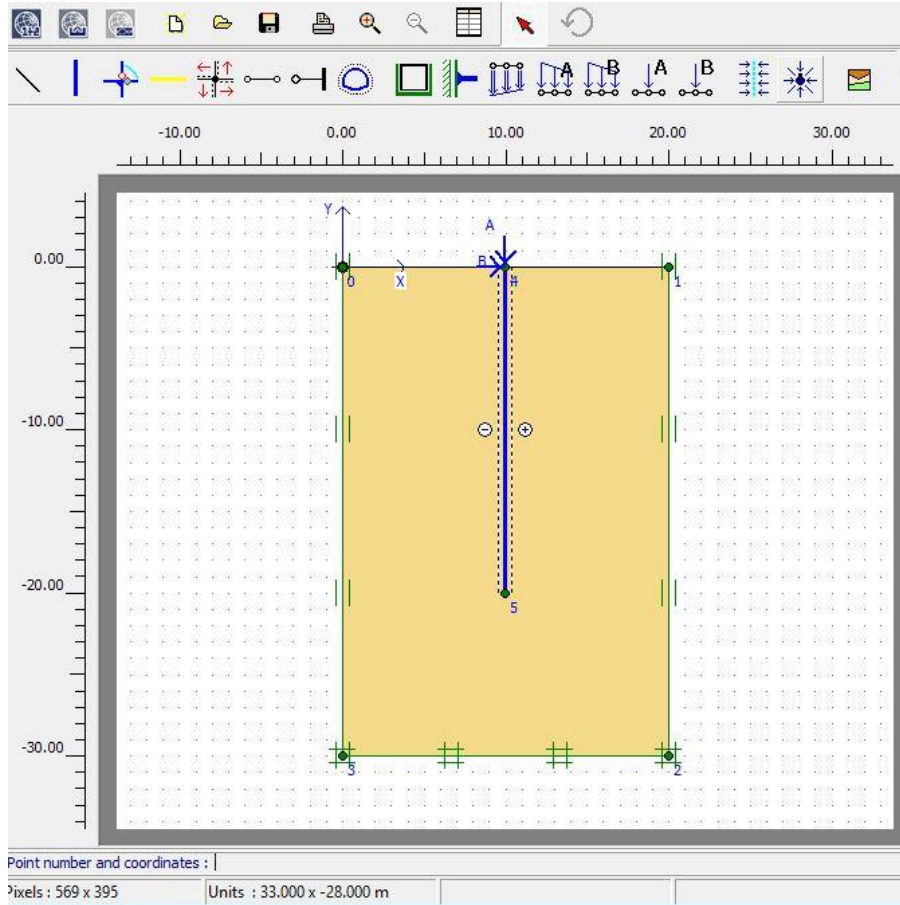
Tablo 8.7: Zemin parametreleri

<i>Zemin Cinsi</i>	Kohezyonlu
<i>Tabaka Kalınlığı (m)</i>	30
<i>γ (kN/m³)</i>	17,3
<i>γ_{sat} (kN/m³)</i>	18,58
<i>γ_{unsat} (kN/m³)</i>	13,9
<i>k_x, k_y (m/s)</i>	10 ⁻⁹
<i>Eref (kN/m²)</i>	11000
<i>Gref (kN/m²)</i>	4074,074
<i>ν</i>	0,35
<i>c (kN/m²)</i>	5
<i>\emptyset(°)</i>	25
<i>Model-Element</i>	Plane Strain-15 Noded
<i>Model Ölçüleri</i>	X:0;20m, Y:-30;0m
<i>YASS</i>	-10m

Tablo 8.8: Kazık parametreleri

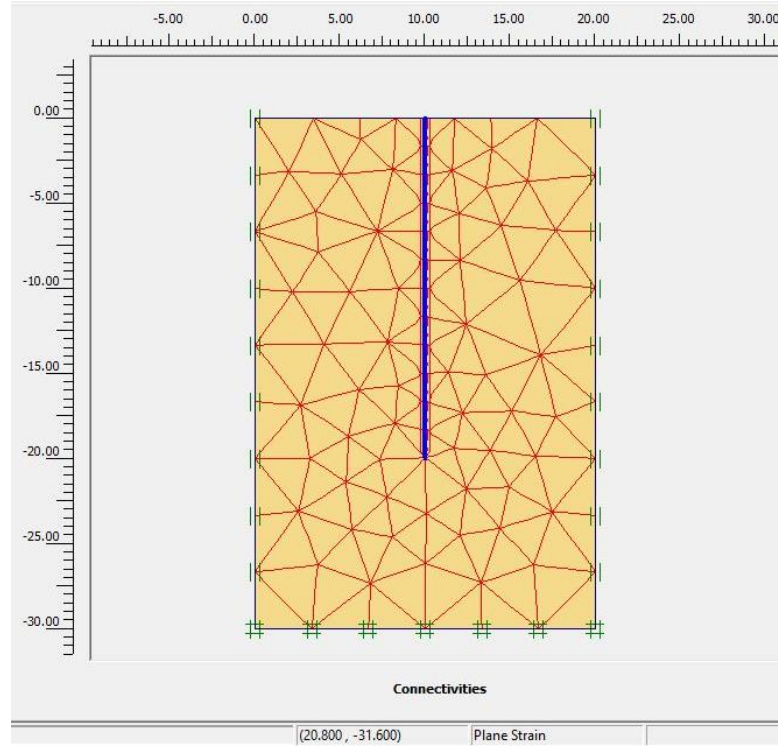
D (m)	1
L (m)	20
A (m ²)	0,79
d (m)	0,886
E (kN/m ²)	$3 \cdot 10^7$
EA (kN)	23561945
EI (kNm ²)	1484893,4
W (kN/m)	7,7
ν	0,2

Belirtilen zemin ve kazık parametreleri doğrultusunda iki boyutlu olarak sistem modellenmesi yapılmıştır. (Şekil 8.20)



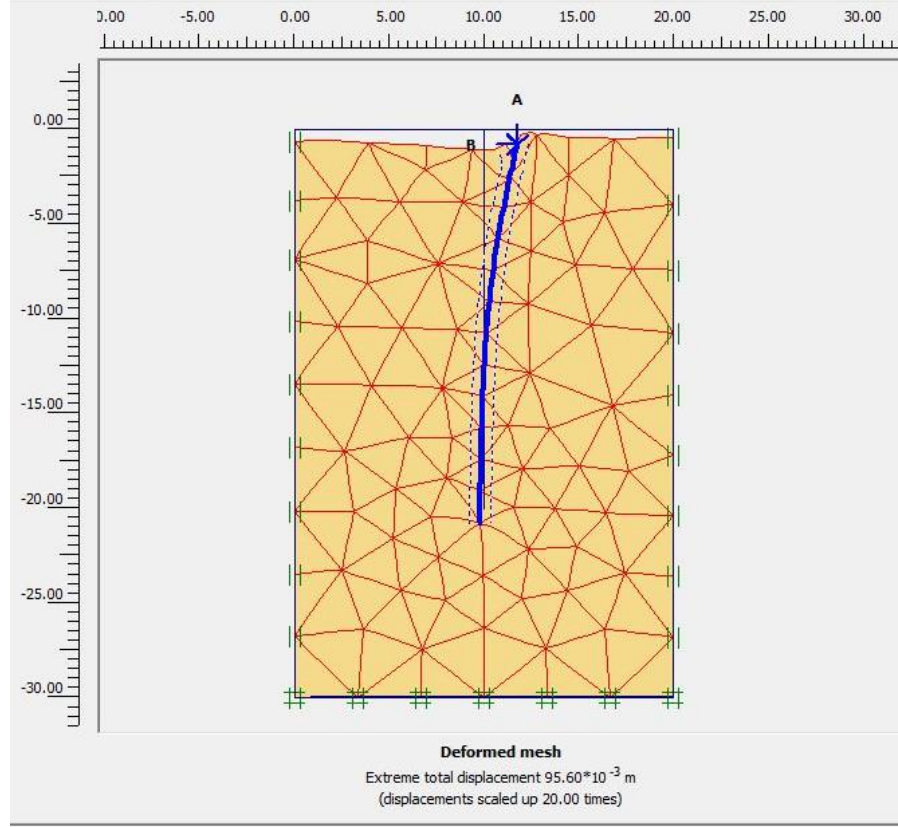
Şekil 8.20: Plaxis 2D sistem modeli

Bu aşamada ara yüz tanımlama, sınır koşulları belirleme işlemleri tamamlandıktan sonra sisteme etki edecek yükler tanımlanmıştır. Yükler yatayda $H=500\text{kN}$ ve düşeyde $V=500\text{kN}$ olmak üzere seçilmiştir. Zemin ve kazığa ait malzeme parametreleri tanımlandıktan sonra mesh ağı oluşturulmuştur. (Şekil 8.21)

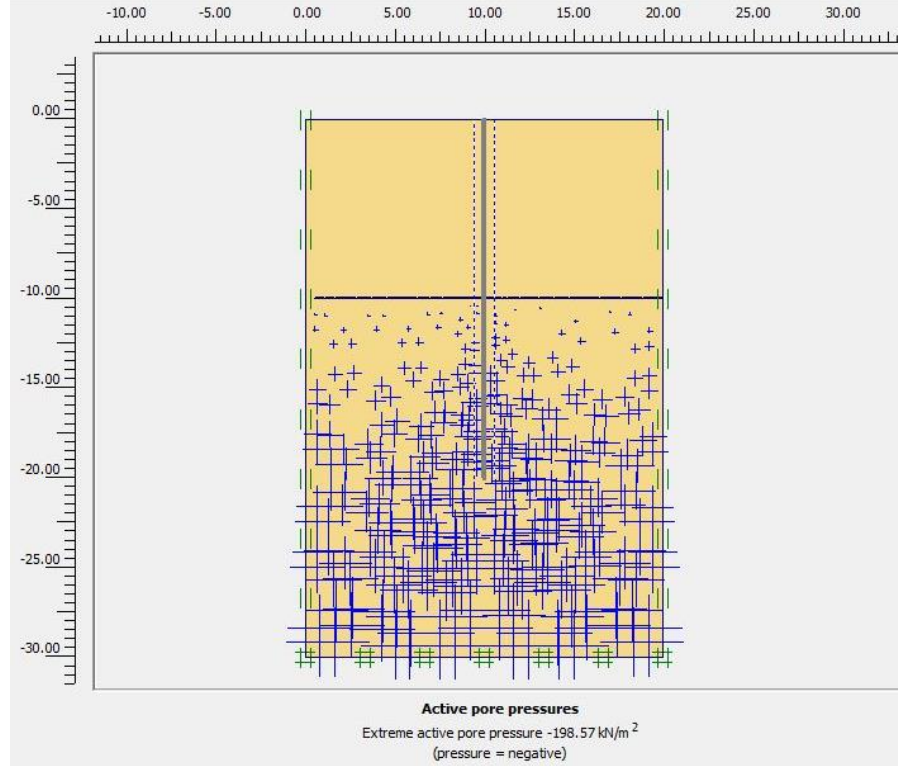


Şekil 8.21: Plaxis 2D sistem mesh ağı

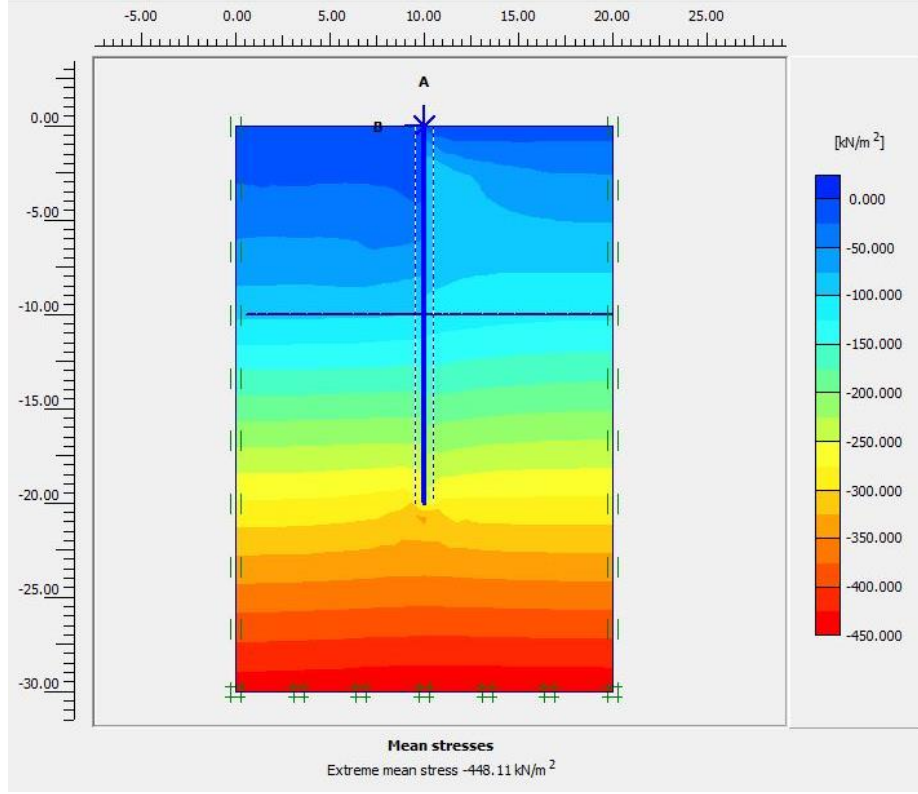
Yatay ve düşey yük altında sistemde oluşan deformasyonlar ve deforme mesh ağı aşağıda gösterilmektedir. Daha sonra analiz fazları tanımlanarak sisteme ait analiz sonuçları elde edilmiştir.



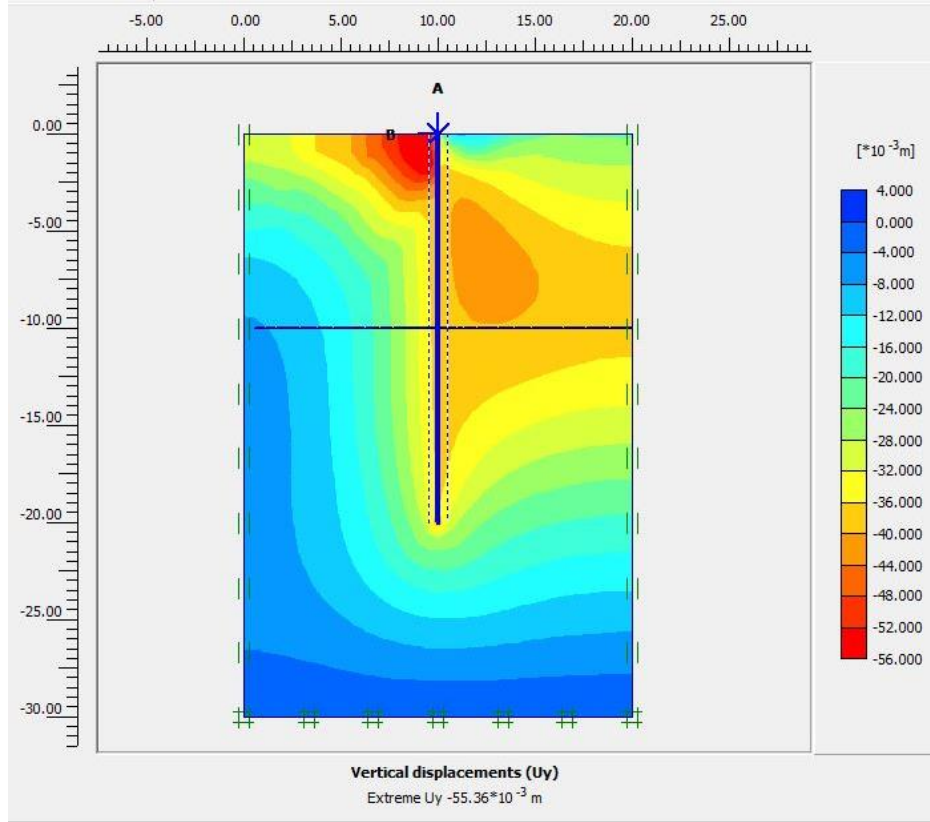
Şekil 8.22: Plaxis 2D sistemin deforme olmuş hali ve deforme mesh ağı



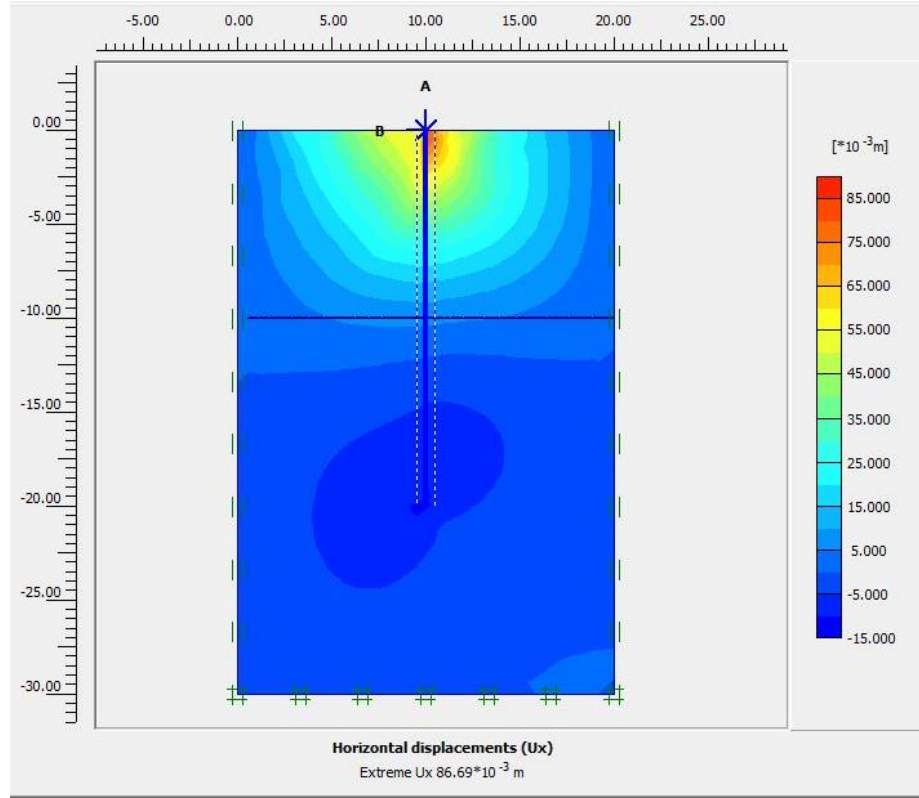
Şekil 8.23: Plaxis 2D aktif gözenek basıncı



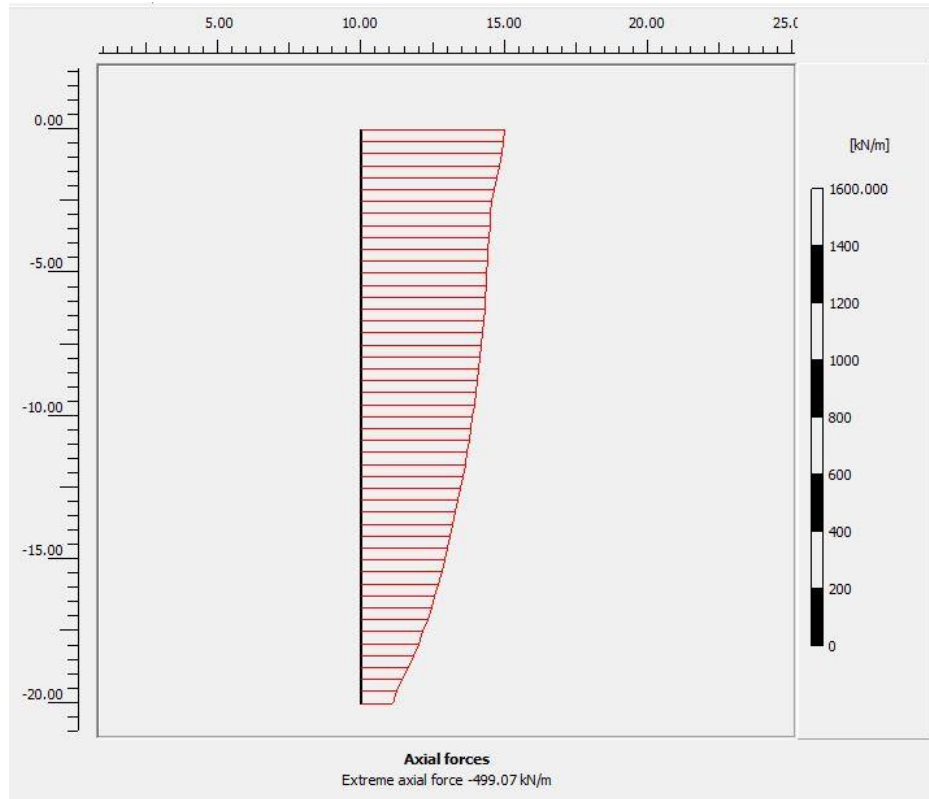
Şekil 8.24: Plaxis 2D ortalama gerilme



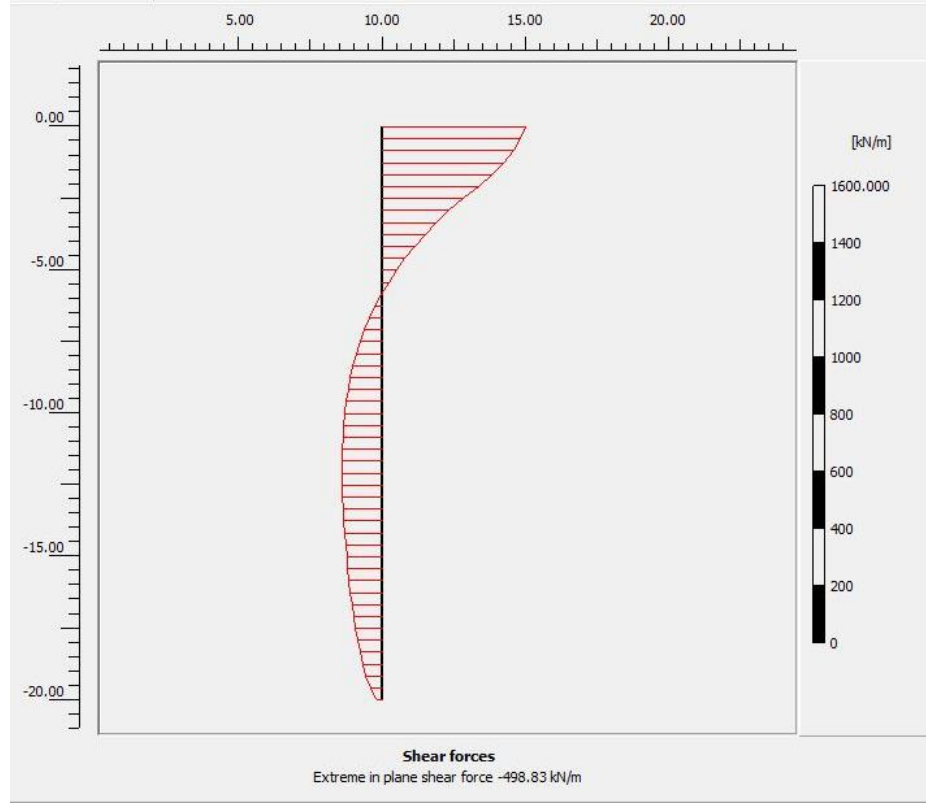
Şekil 8.25: Plaxis 2D düşey deplasman miktarı



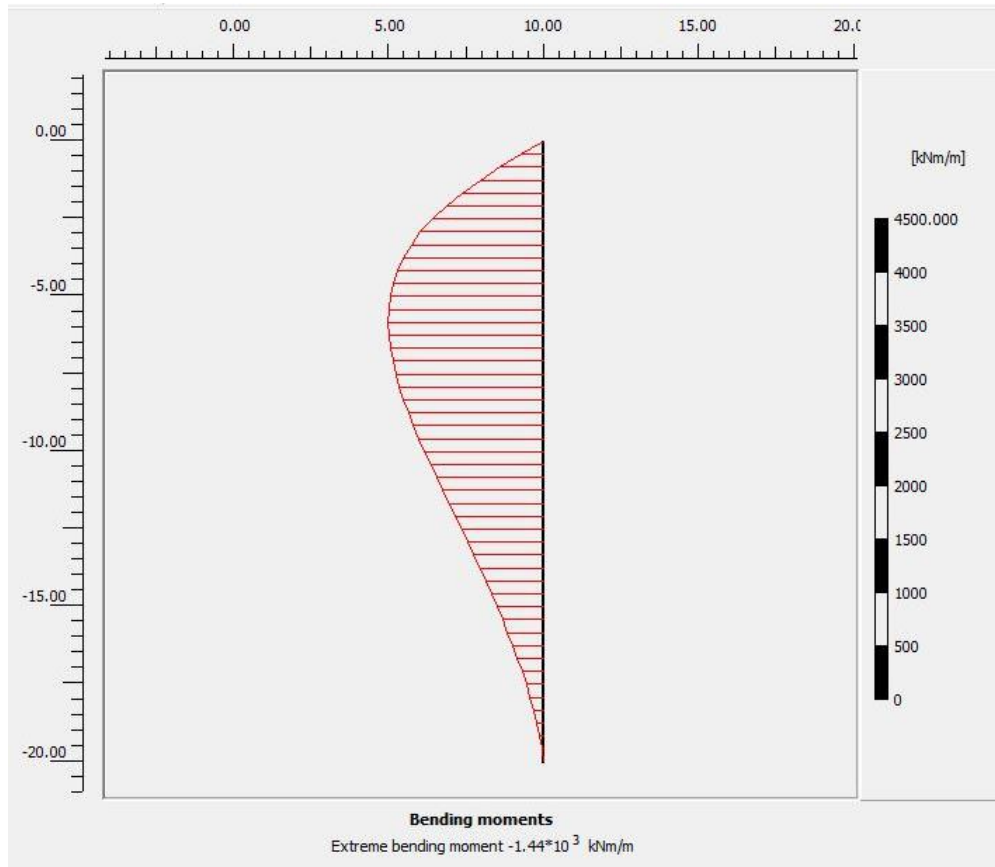
Şekil 8.26: Plaxis 2D yatay deplasman miktarı



Şekil 8.27: Plaxis 2D kazığa ait eksenel kuvvet diyagramı



Şekil 8.28: Plaxis 2D kazığa ait kesme kuvveti diyagramı



Şekil 8.29: Plaxis 2D kazığa ait moment diyagramı

Analizde elde edilen veriler özet olarak Tablo 8.9’de verilmektedir.

Tablo 8.9: Plaxis analiz sonuçları

<i>Toplam gerilme</i>	544,25 kN/m ²
<i>Efektif gerilme</i>	381,30 kN/m ²
<i>Ortalama gerilme</i>	248,11 kN/m ²
<i>Düşey deplasman</i>	55,36x10 ⁻³ m
<i>Yatay deplasman</i>	86,96x10 ⁻³ m
<i>Maksimum aksenal kuvvet</i>	499,07 kN
<i>Maksimum kesme kuvveti</i>	498,83 kN
<i>Maksimum moment</i>	1,44x10 ³ kNm

8.2.2 Kazık Programı İle Analiz

Kazık programıyla yapılacak analizlerde kullanılan zemin, yük ve kazık parametreleri Tablo 8.10 ve Tablo 8.11’de belirtilmektedir. Analizde elde edilen veriler görsel olarak aşağıda sıralanmaktadır.

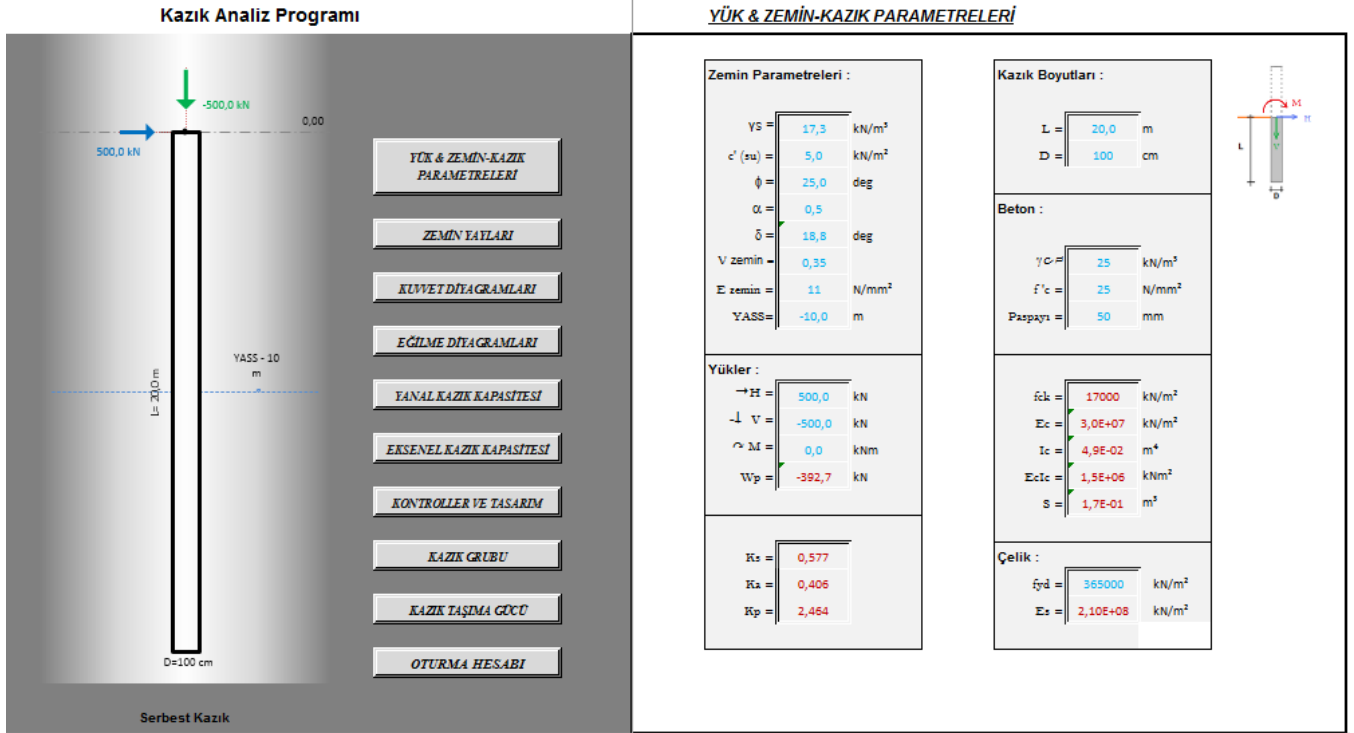
Tablo 8.10: Zemin parametreleri

<i>Zemin Cinsi</i>	Kohezyonlu
<i>Tabaka Kalınlığı (m)</i>	30
γ (kN/m ³)	17,3
ϕ (°)	25
<i>c</i> (kN/m ²)	5
<i>Eref</i> (kN/m ²)	11000
<i>a</i> (Adhezyon)	0,5
δ (Sürtünme açısı)	18,8
<i>v</i>	0,35
YASS	-10m

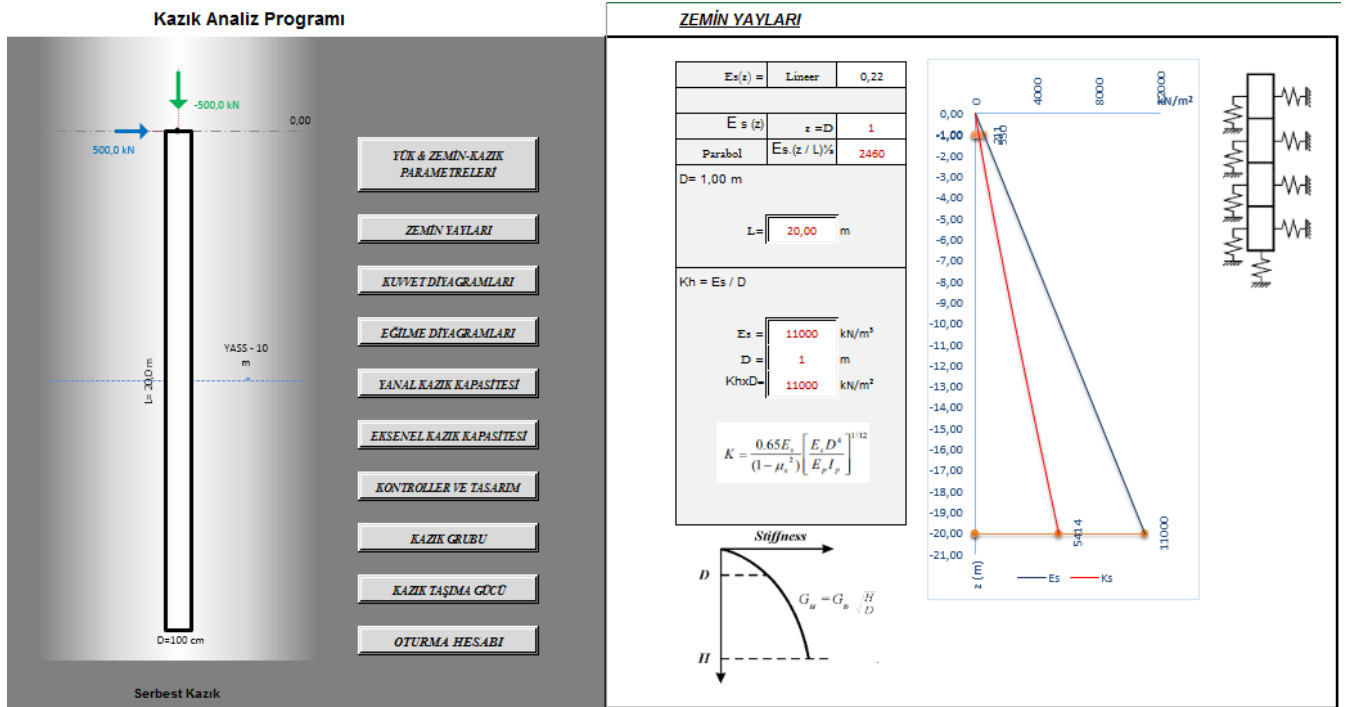
Tablo 8.11: Kazık parametreleri

<i>D</i> (m)	1
<i>L</i> (m)	20
<i>A</i> (m ²)	0,79
<i>E</i> (kN/m ²)	3.10 ⁷
<i>EA</i> (kN)	23561945
<i>EI</i> (kNm ²)	1484893,4
<i>S</i> (m ³)	0,167
<i>v</i>	0,2

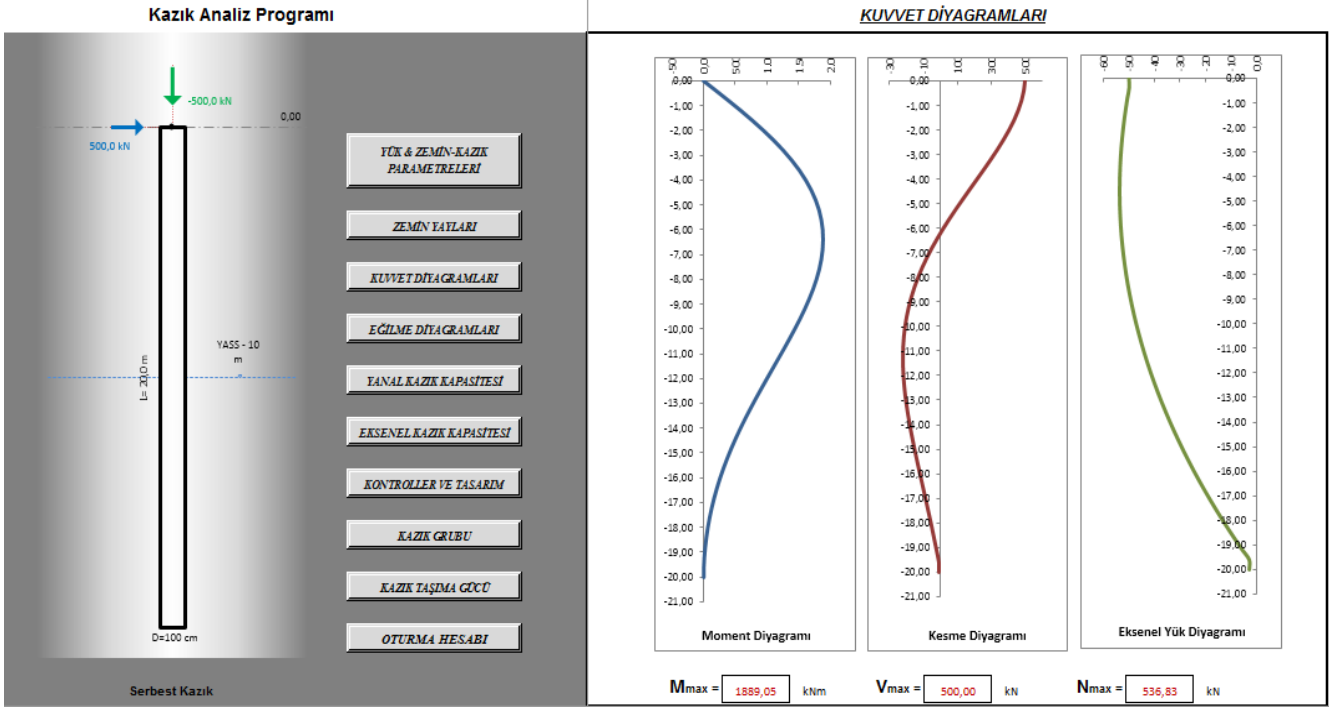
Yükler yatayda H=500kN ve düşeyde V=500kN olmak üzere seçilmiştir.



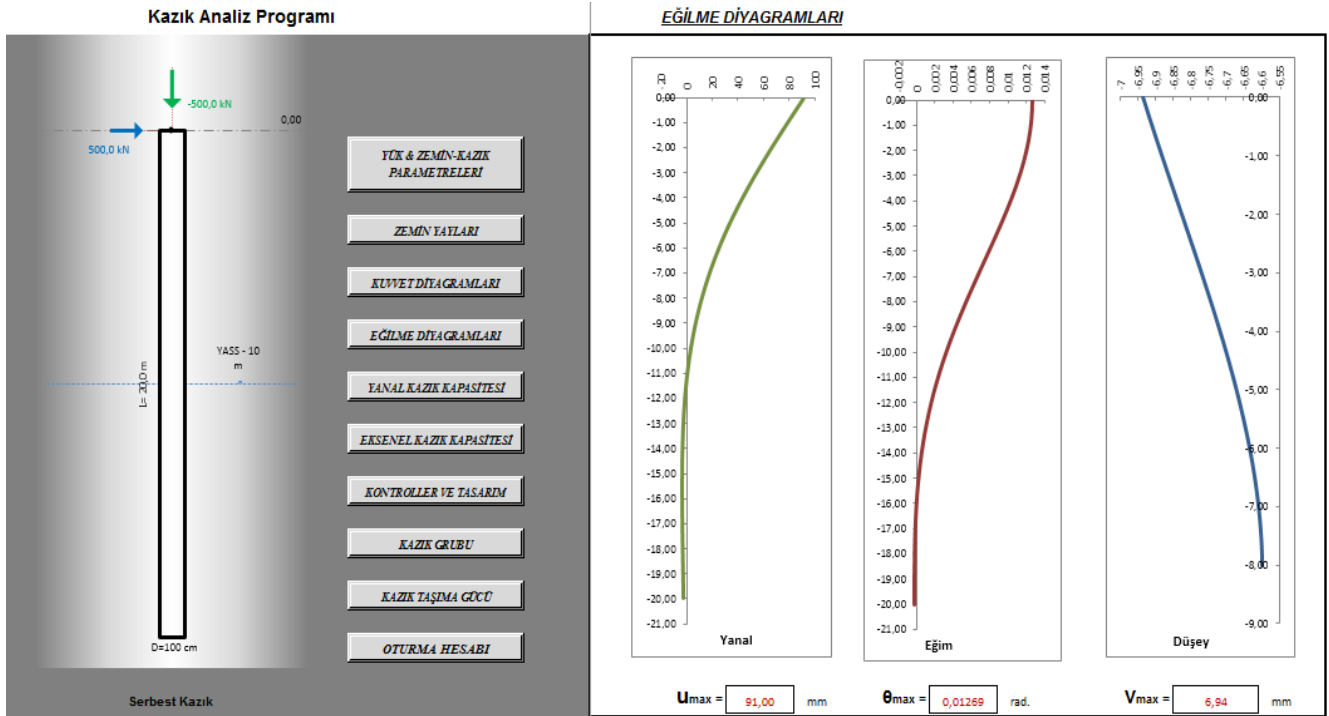
Şekil 8.30: Kazık analiz programı yük, zemin ve kazık parametrelerinin tayini



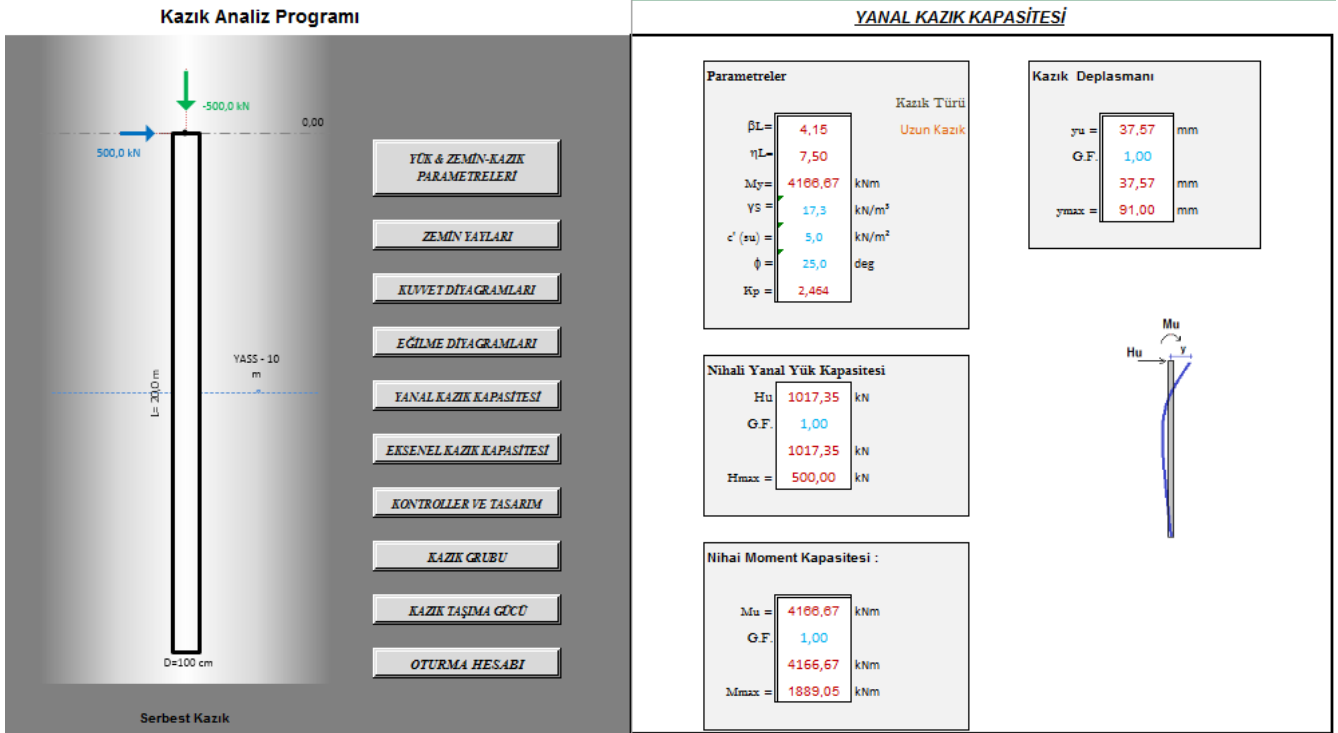
8.31: Kazık analiz programı zemin yaylarının tanımlanması



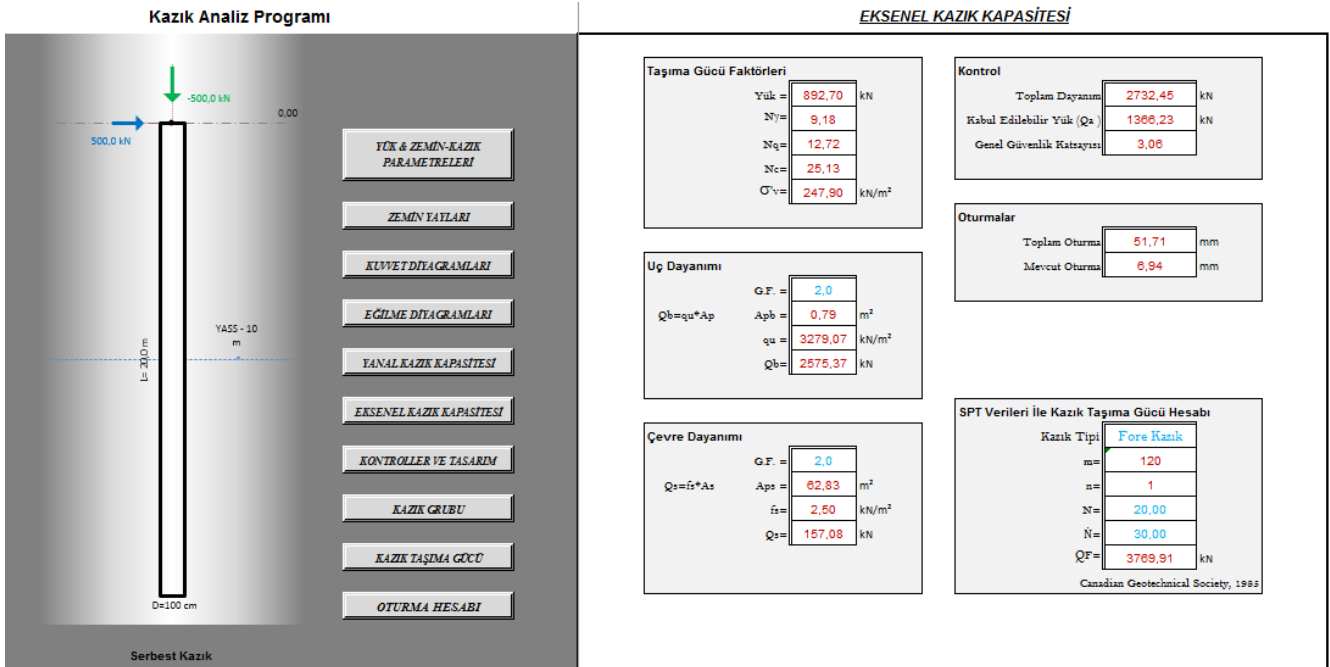
8.32: Kazık analiz programı kuvvet diyagramlarının elde edilmesi



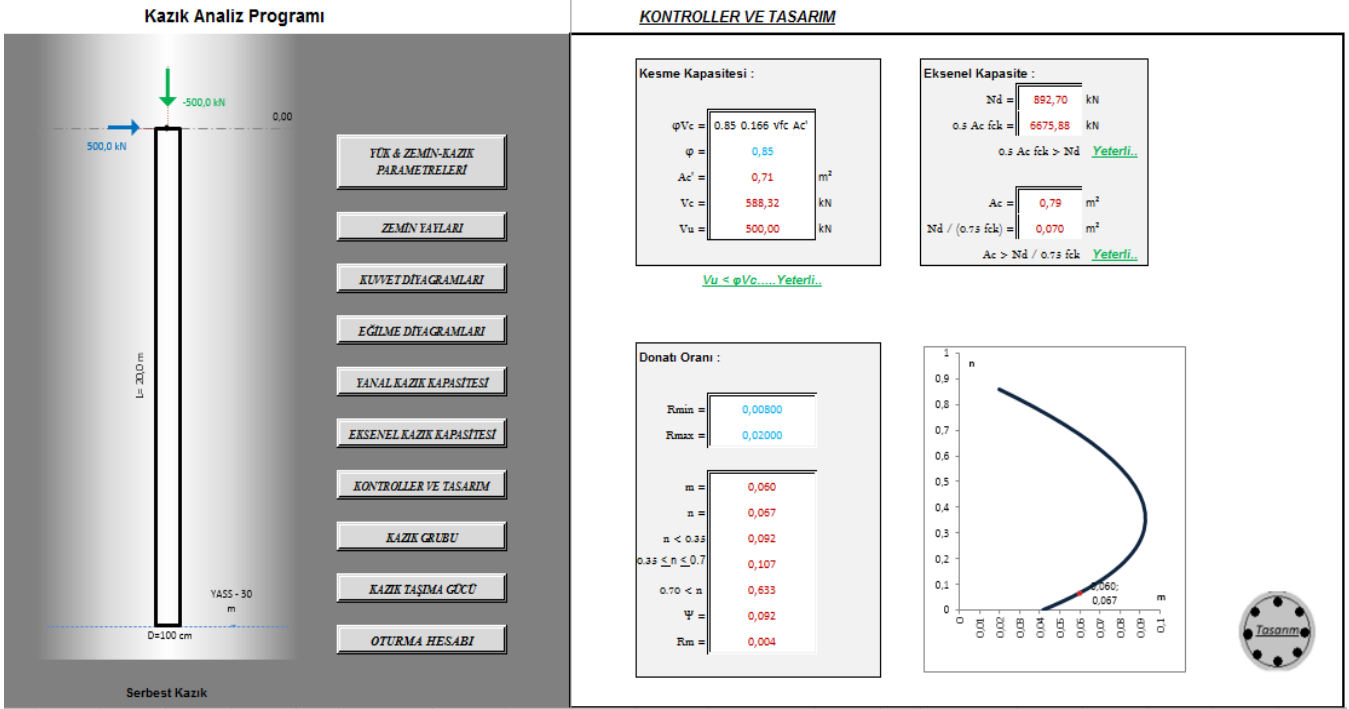
8.33: Kazık analiz programı deplasmanların elde edilmesi



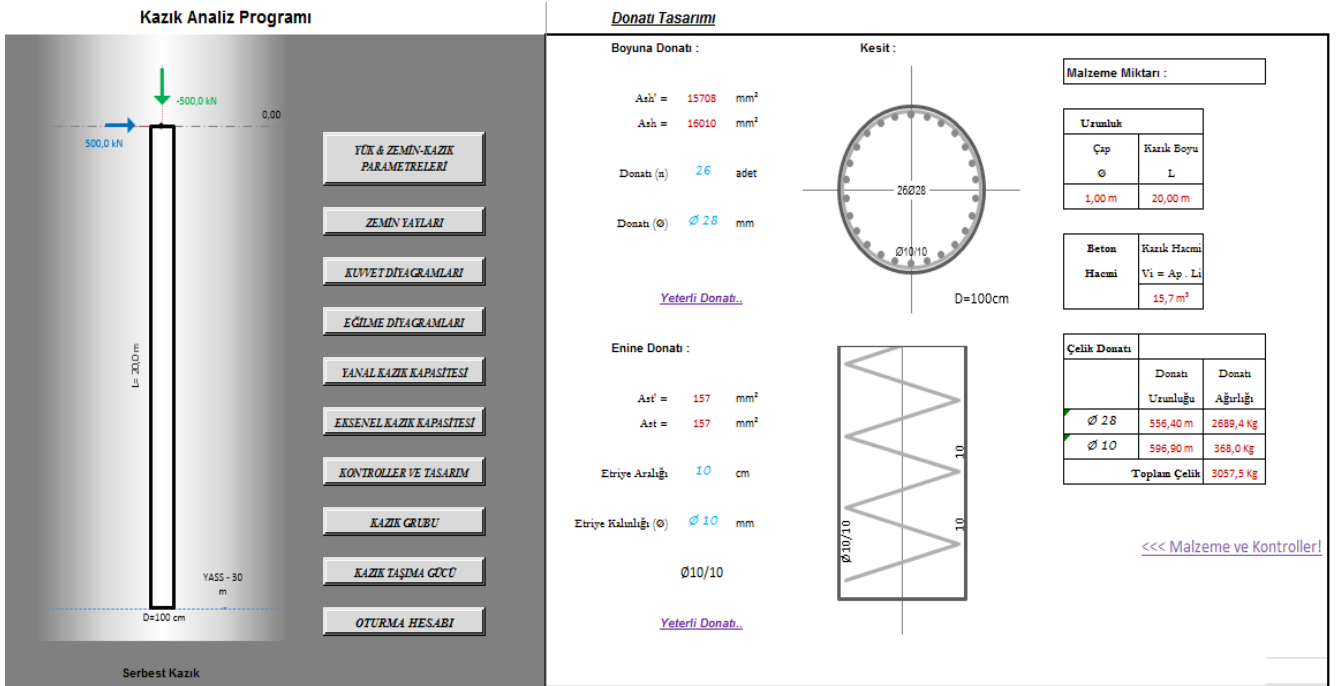
8.34: Kazık analiz programı yanıl kazık kapasitesinin elde edilmesi



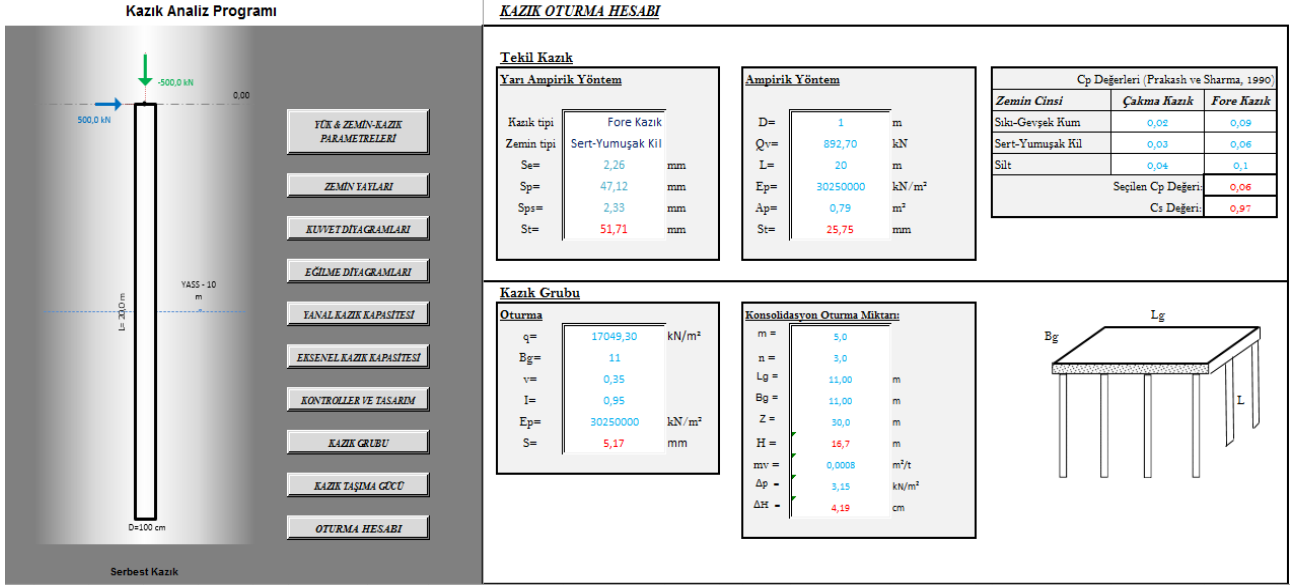
8.35: Kazık analiz programı eksenel kazık kapasitesinin elde edilmesi



8.36: Kazık analiz programı betonarme kesit tasarım hesaplamaları



8.37: Kazık analiz programı donatı ve metraj hesaplamaları



8.38: Kazık analiz programı oturma hesaplamaları

Yapılan analizler neticesinde elde edilen analiz sonuçları özet tablo olarak Tablo 8.12’de sunulmaktadır.

Tablo 8.12: Kazık analiz programı ile elde edilen analiz sonuçları özeti

Maksimum moment (kNm)	1889,05
Maksimum kesme kuvveti (kN)	500,00
Maksimum eksenel kuvvet (kN)	536,83
Yatay deplasman (mm)	37,57
Düşey deplasman (mm)	91,00
Başlık dönme açısı (rad)	0,01269
İzin verilebilir yanal yük (kN)	1017,35
İzin verilebilir moment (kNm)	4166,67
İzin verilebilir düşey yük (kN)	1366,23

8.3 Kohezyonsuz Zeminde Teşkil Edilen Tekil Kazığın Yatay ve Düşey Yükler Altında Analizi (YASS:-30m)

8.3.1 Plaxis İle Analiz

Analizlerde kullanılacak zemin ve kazık parametreleri Tablo 8.13 ve Tablo 8.14'de gösterilmektedir.

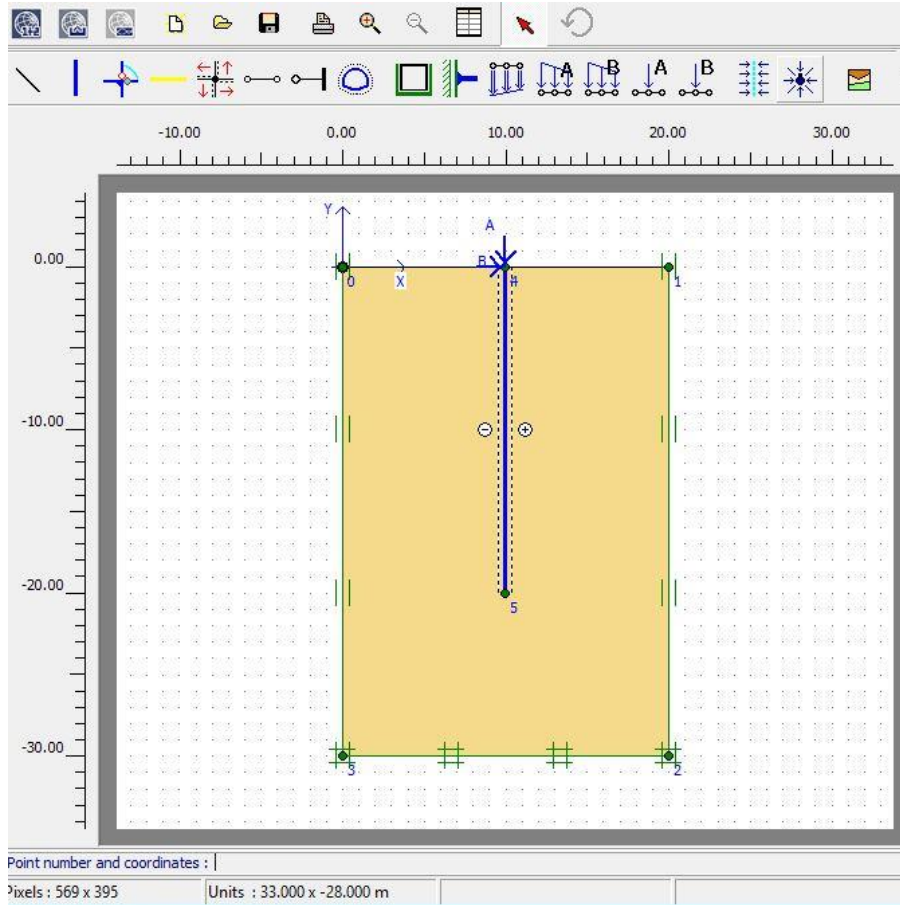
Tablo 8.13: Zemin parametreleri

<i>Zemin Cinsi</i>	Kohezyonsuz
<i>Tabaka Kalınlığı (m)</i>	30
<i>γ (kN/m³)</i>	17,3
<i>γ_{sat} (kN/m³)</i>	18,58
<i>γ_{unsat} (kN/m³)</i>	13,9
<i>k_x, k_y (m/s)</i>	10 ⁻⁹
<i>Eref (kN/m²)</i>	11000
<i>Gref (kN/m²)</i>	4074,074
<i>ν</i>	0,35
<i>c (kN/m²)</i>	0
<i>\emptyset(°)</i>	25
<i>Model-Element</i>	Plane Strain-15 Noded
<i>Model Ölçüleri</i>	X:0;20m, Y:-30;0m
<i>YASS</i>	-30m

Tablo 8.14: Kazık parametreleri

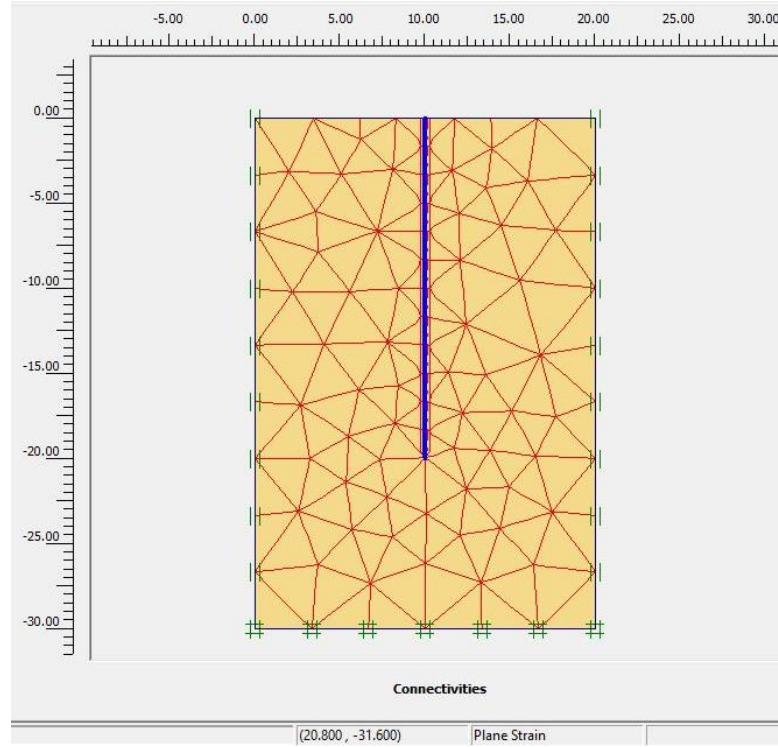
D (m)	1
L (m)	20
A (m ²)	0,79
d (m)	0,886
E (kN/m ²)	$3 \cdot 10^7$
EA (kN)	23561945
EI (kNm ²)	1484893,4
W (kN/m)	7,7
ν	0,2

Belirtilen zemin ve kazık parametreleri doğrultusunda iki boyutlu olarak sistem modellenmesi yapılmıştır. (Şekil 8.39)



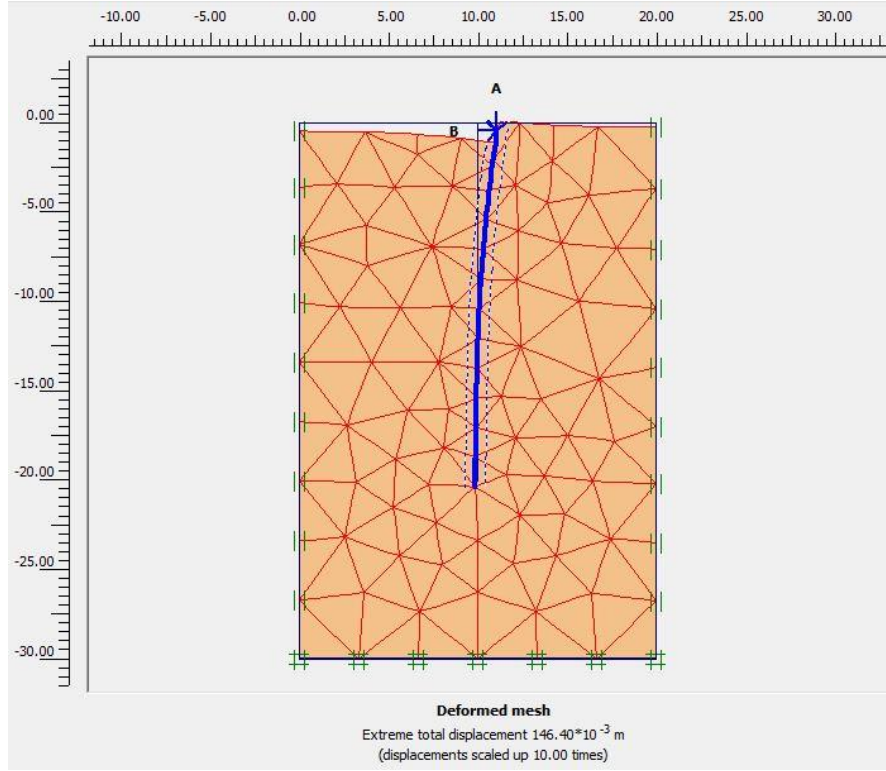
Şekil 8.39: Plaxis 2D sistem modeli

Bu aşamada ara yüz tanımlama, sınır koşulları belirleme işlemleri tamamlandıktan sonra sisteme etki edecek yükler tanımlanmıştır. Yükler yatayda $H=500\text{kN}$ ve düşeyde $V=500\text{kN}$ olmak üzere seçilmiştir. Zemin ve kazığa ait malzeme parametreleri tanımlandıktan sonra mesh ağı oluşturulmuştur. (Şekil 8.40)

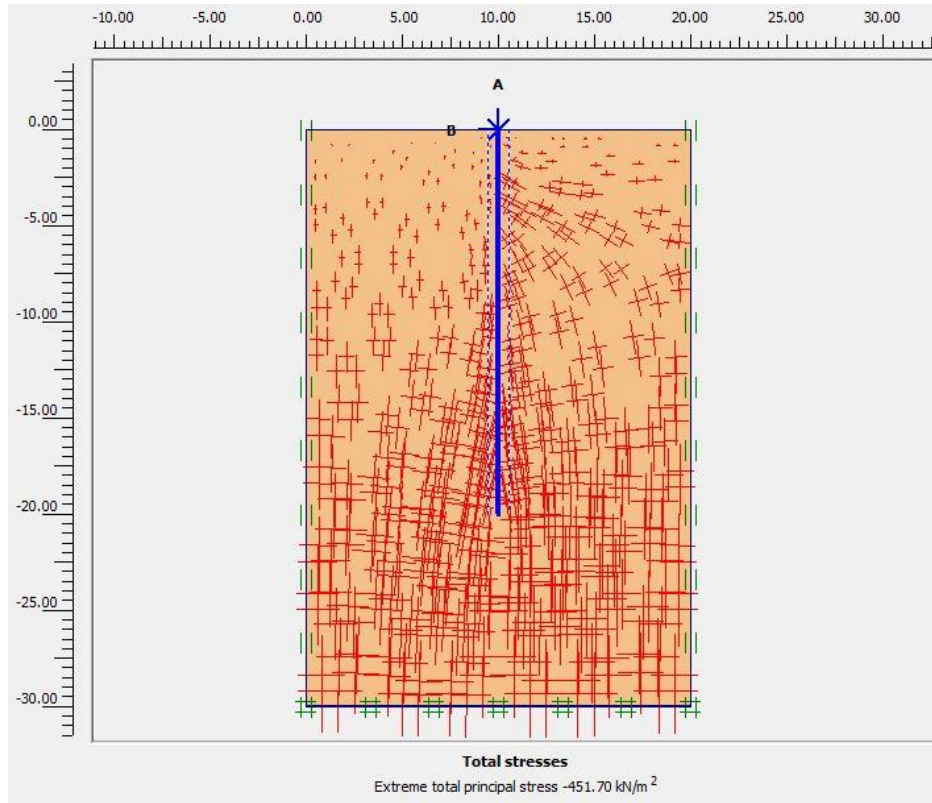


Şekil 8.40: Plaxis 2D sistem mesh ağı

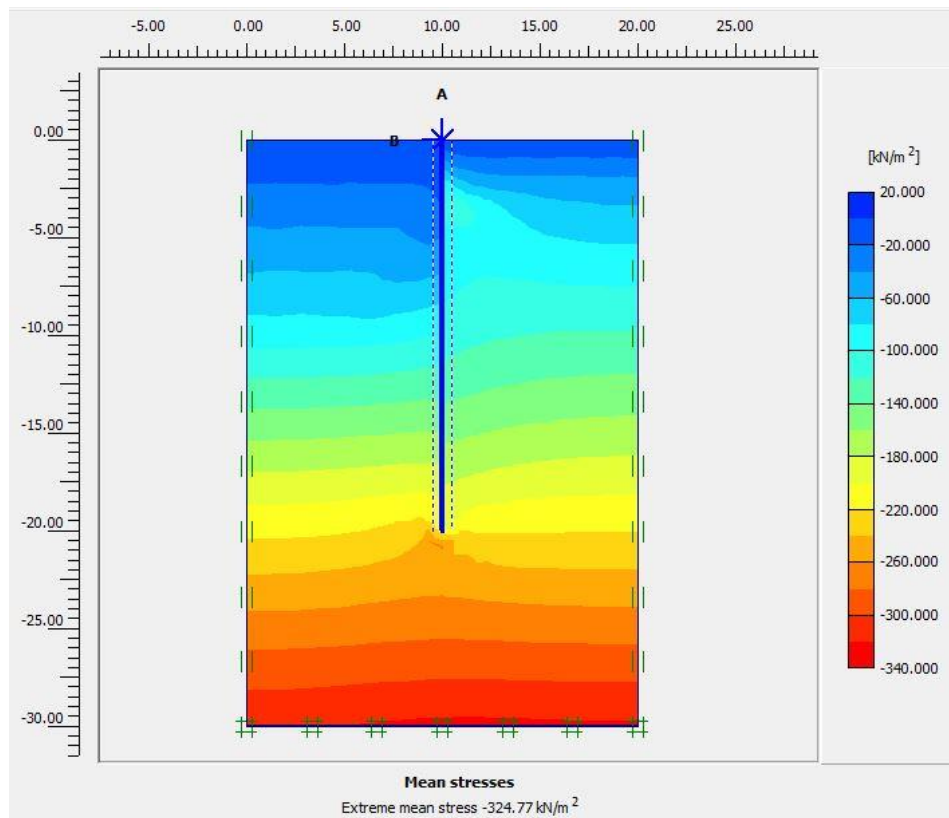
Yatay ve düşey yük altında sistemde oluşan deformasyonlar ve deforme mesh ağı aşağıda gösterilmektedir. Daha sonra analiz fazları tanımlanarak sisteme ait analiz sonuçları elde edilmiştir.



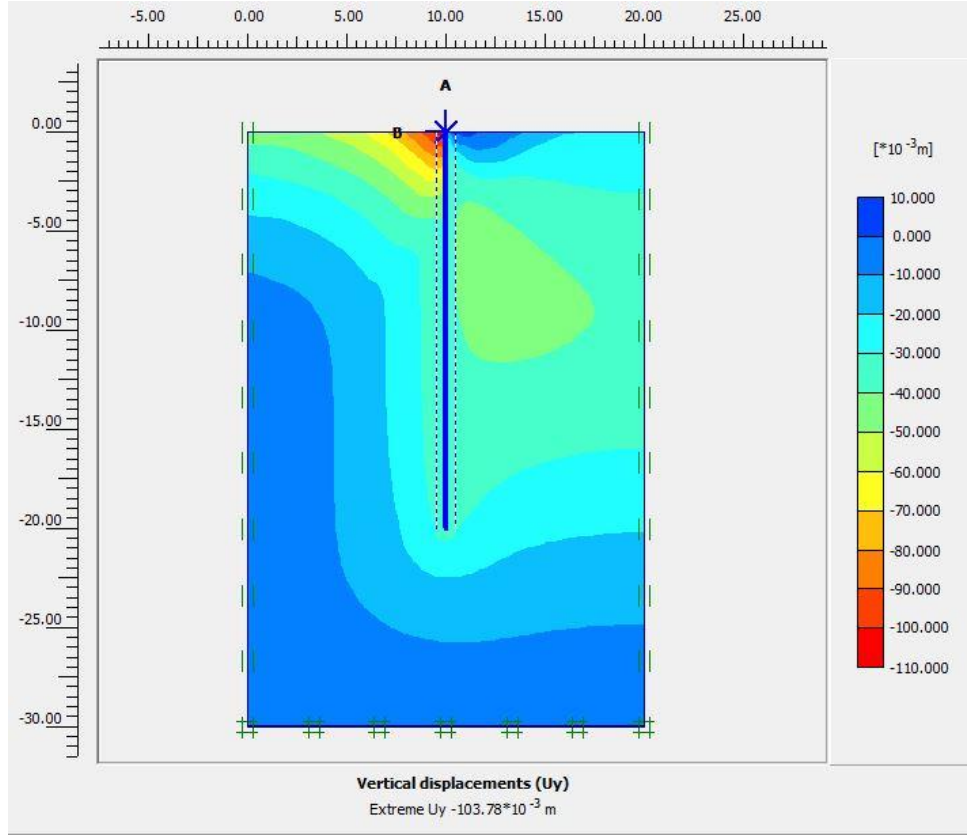
Şekil 8.41: Plaxis 2D sistemin deforme olmuş hali ve deforme mesh ağı



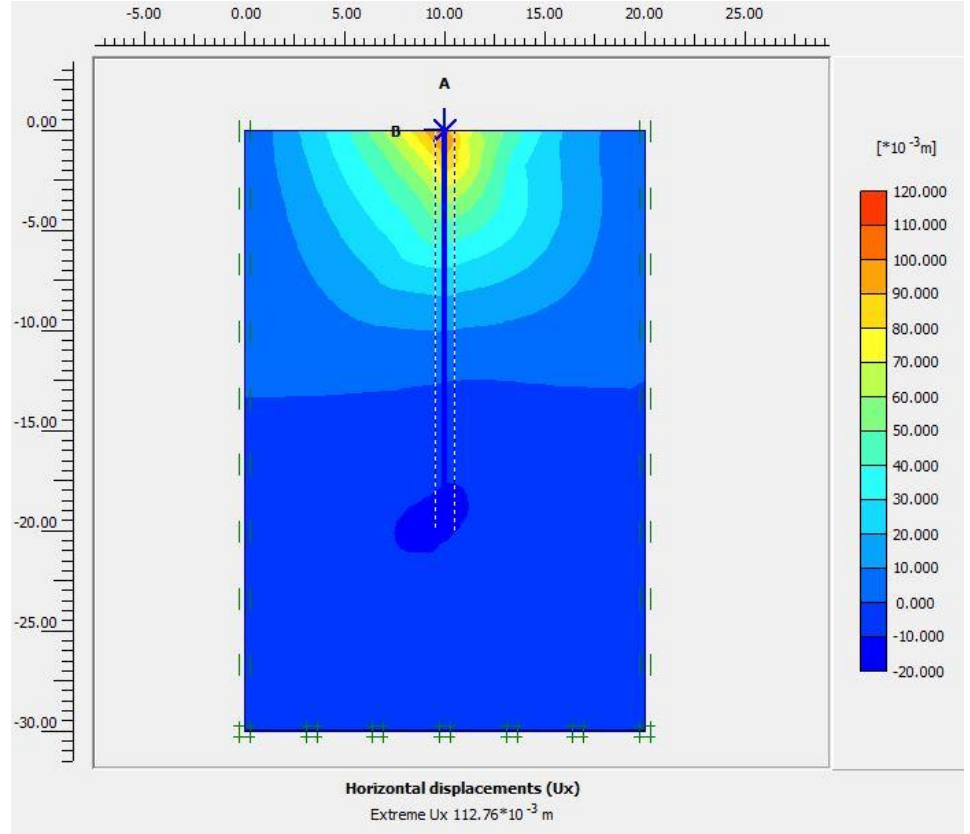
Şekil 8.42: Plaxis 2D toplam gerilme miktarı



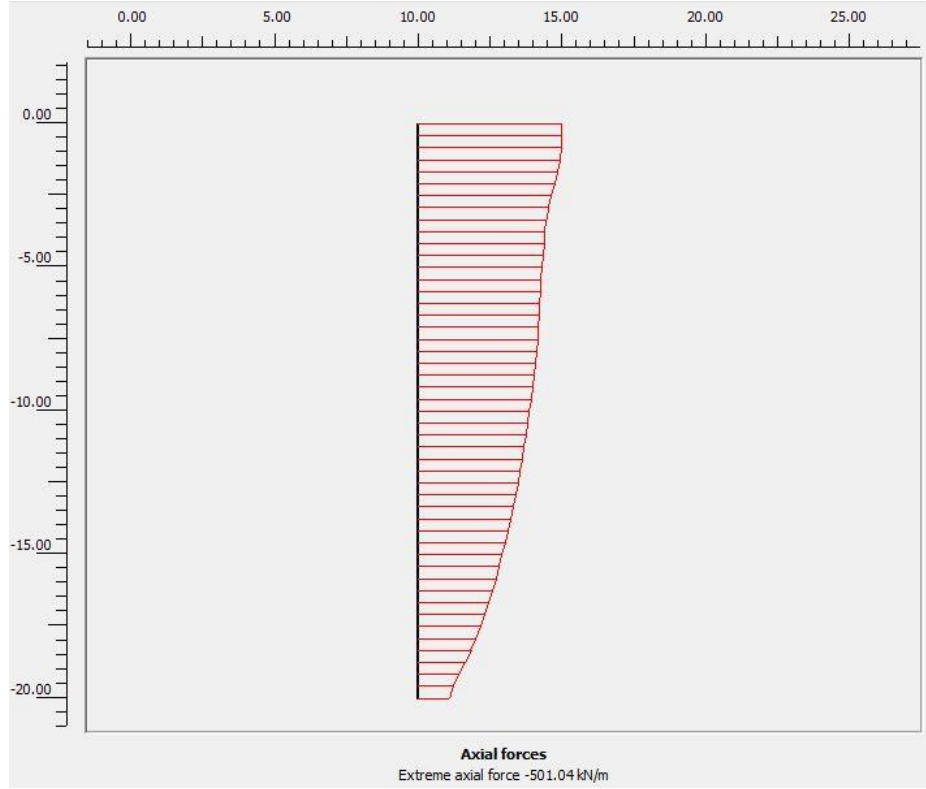
Şekil 8.43: Plaxis 2D ortalama gerilme



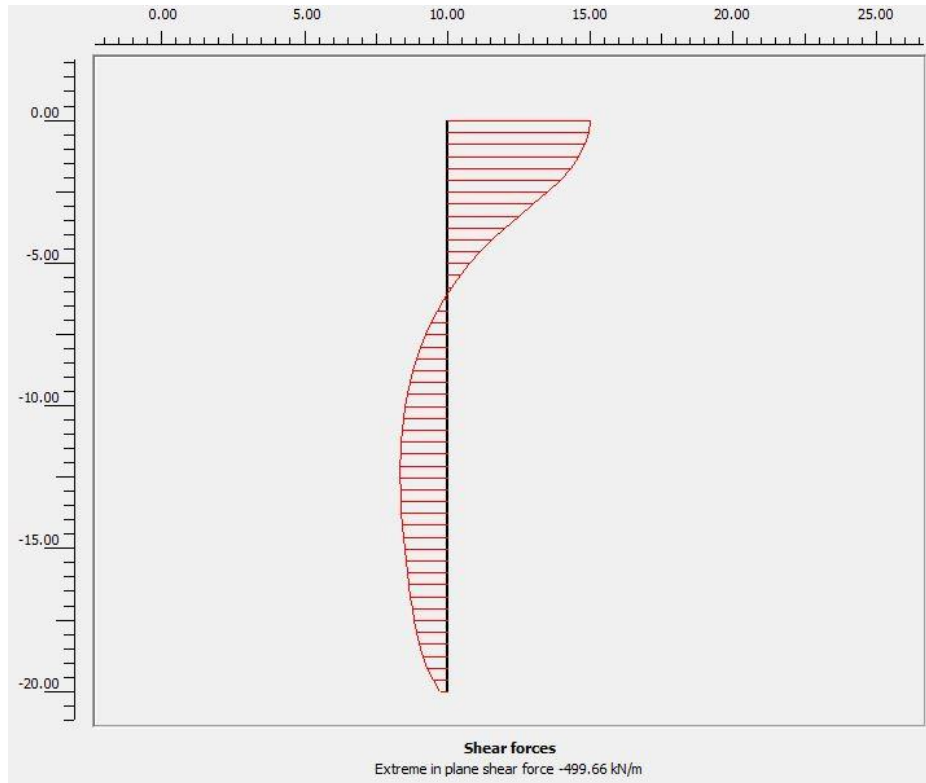
Şekil 8.44: Plaxis 2D düşey deplasman miktarı



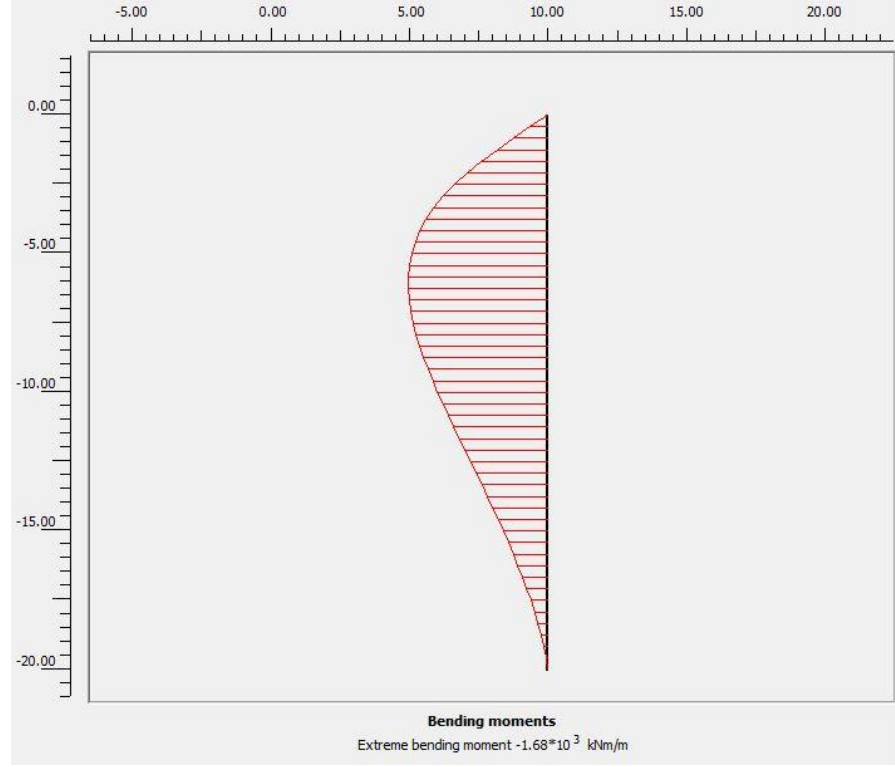
Şekil 8.45: Plaxis 2D yatay deplasman miktarı



Şekil 8.46: Plaxis 2D kazığa ait aksel kuvvet diyagramı



Şekil 8.47: Plaxis 2D kazığa ait kesme kuvveti diyagramı



Şekil 8.48: Plaxis 2D kazığa ait moment diyagramı

Analizde elde edilen veriler özet olarak Tablo 8.15’de verilmektedir.

Tablo 8.15: Plaxis analiz sonuçları

<i>Toplam gerilme</i>	451,70 kN/m ²
<i>Ortalama gerilme</i>	324,77 kN/m ²
<i>Düşey deplasman</i>	103,78 x 10 ⁻³ m
<i>Yatay deplasman</i>	112,76 x 10 ⁻³ m
<i>Maksimum aksenal kuvvet</i>	501,04 kN
<i>Maksimum kesme kuvveti</i>	499,66 kN
<i>Maksimum moment</i>	1,68x10 ³ kNm

8.3.2 Kazık Programı İle Analiz

Kazık programıyla yapılacak analizlerde kullanılan zemin, yük ve kazık parametreleri Tablo 8.16 ve Tablo 8.17’de belirtilmektedir. Analizde elde edilen veriler görsel olarak aşağıda sıralanmaktadır.

Tablo 8.16: Zemin parametreleri

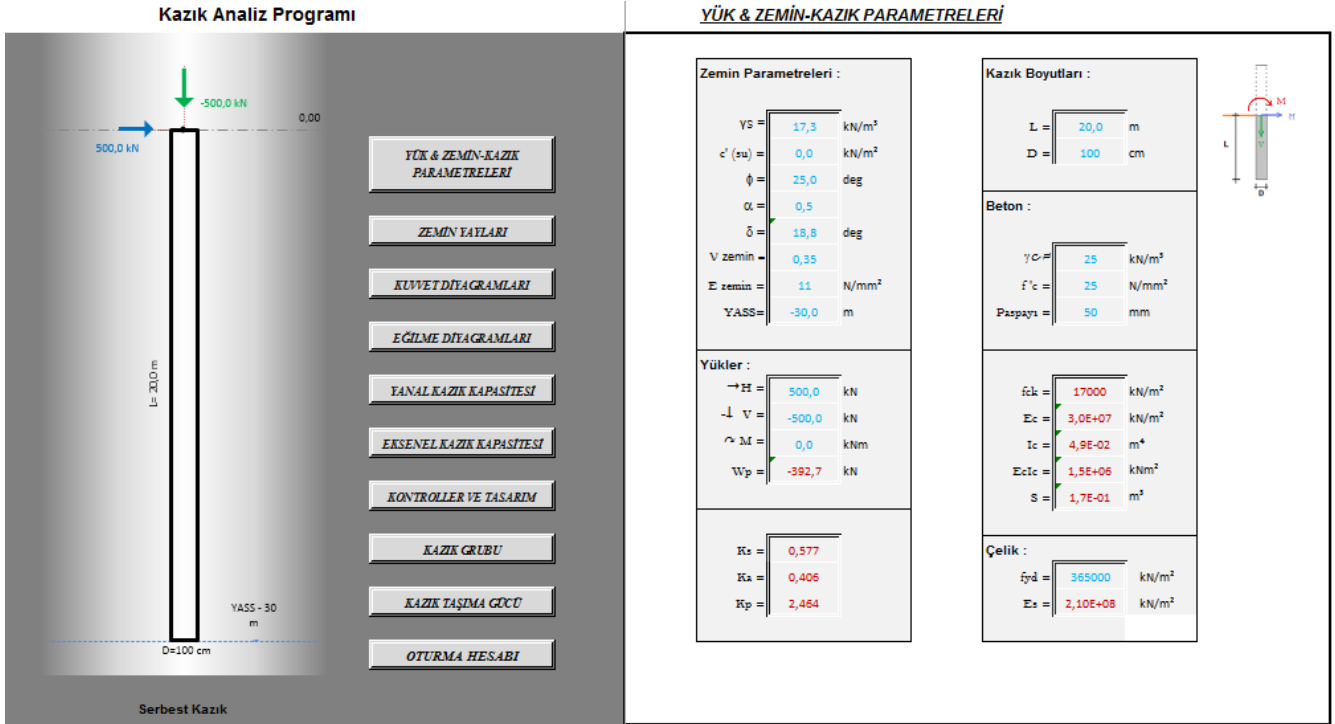
<i>Zemin Cinsi</i>	Kohezyonsuz
<i>Tabaka Kalınlığı (m)</i>	30
<i>γ (kN/m³)</i>	17,3
<i>\emptyset(°)</i>	25
<i>c (kN/m²)</i>	0
<i>E_{ref} (kN/m²)</i>	11000
<i>α (Adhezyon)</i>	0
<i>δ (Sürtünme açısı)</i>	18,8

<i>v</i>	0,35
YASS	-30m

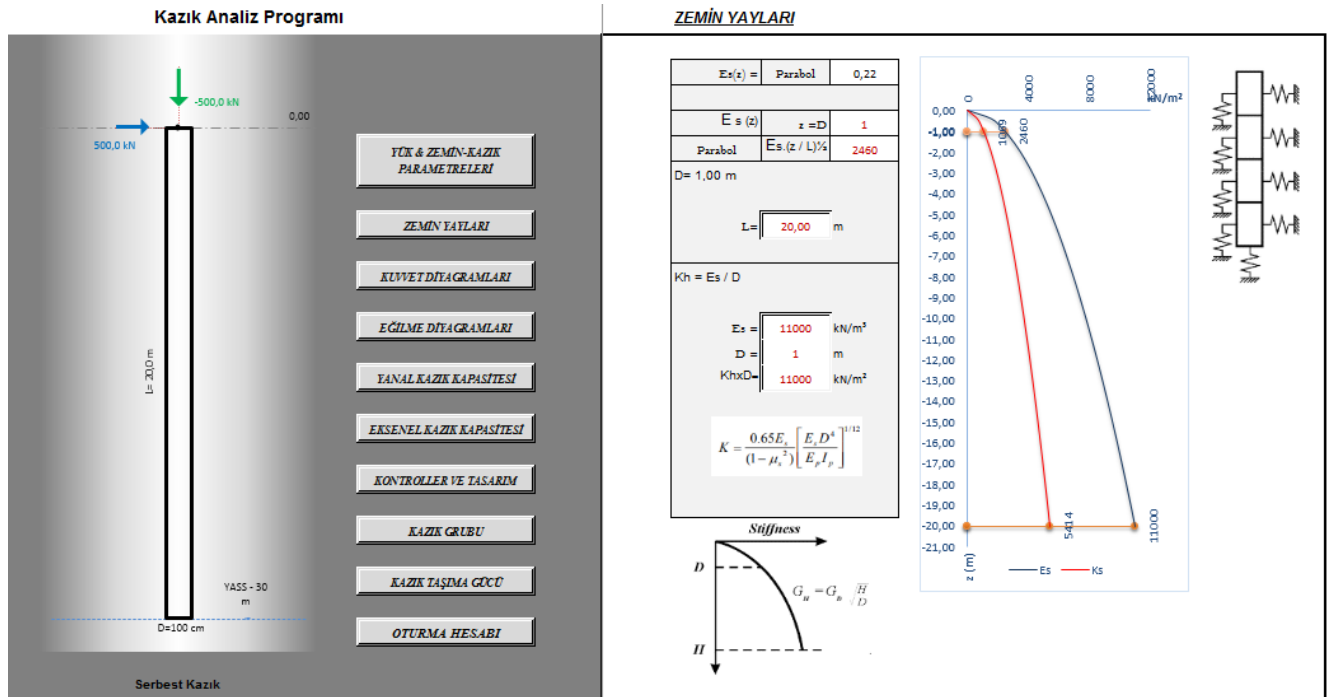
Tablo 8.17: Kazık parametreleri

<i>D (m)</i>	1
<i>L (m)</i>	20
<i>A (m²)</i>	0,79
<i>E (kN/m²)</i>	3.10 ⁷
<i>EA (kN)</i>	23561945
<i>EI (kNm²)</i>	1484893,4
<i>S (m³)</i>	0,167
<i>v</i>	0,2

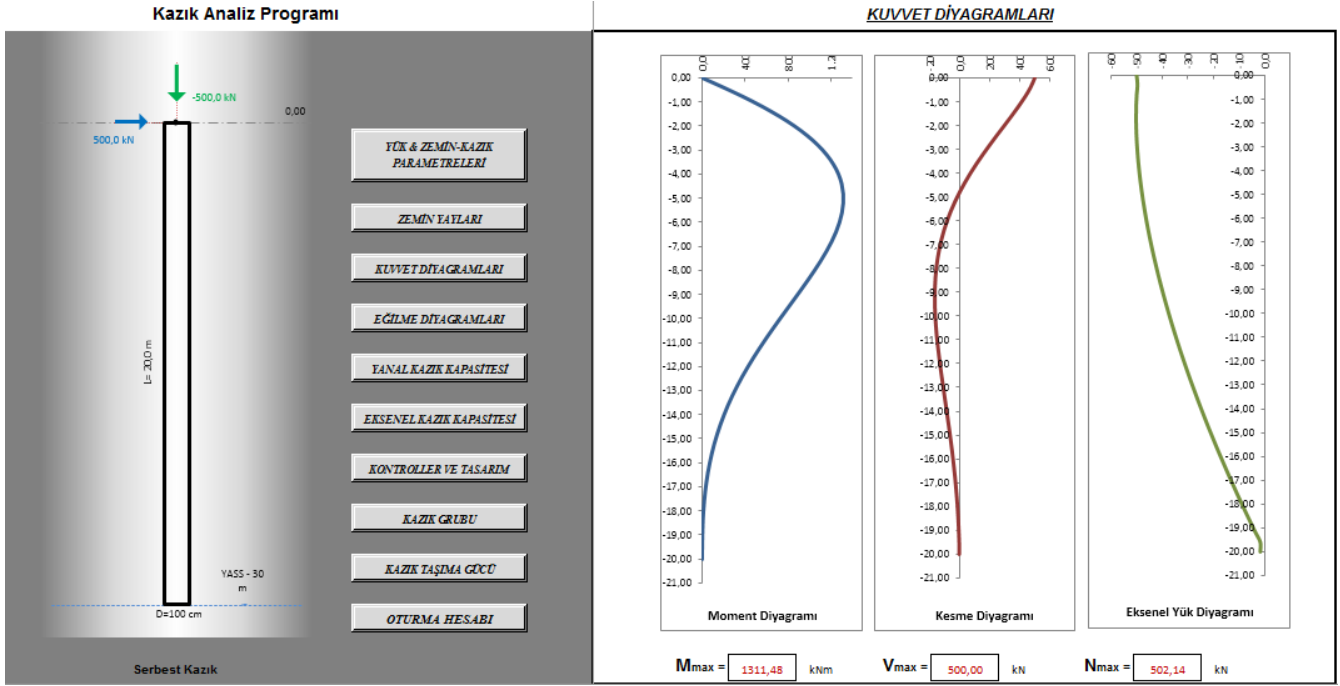
Yükler yatayda H=500kN ve düşeyde V=500kN olmak üzere seçilmiştir.



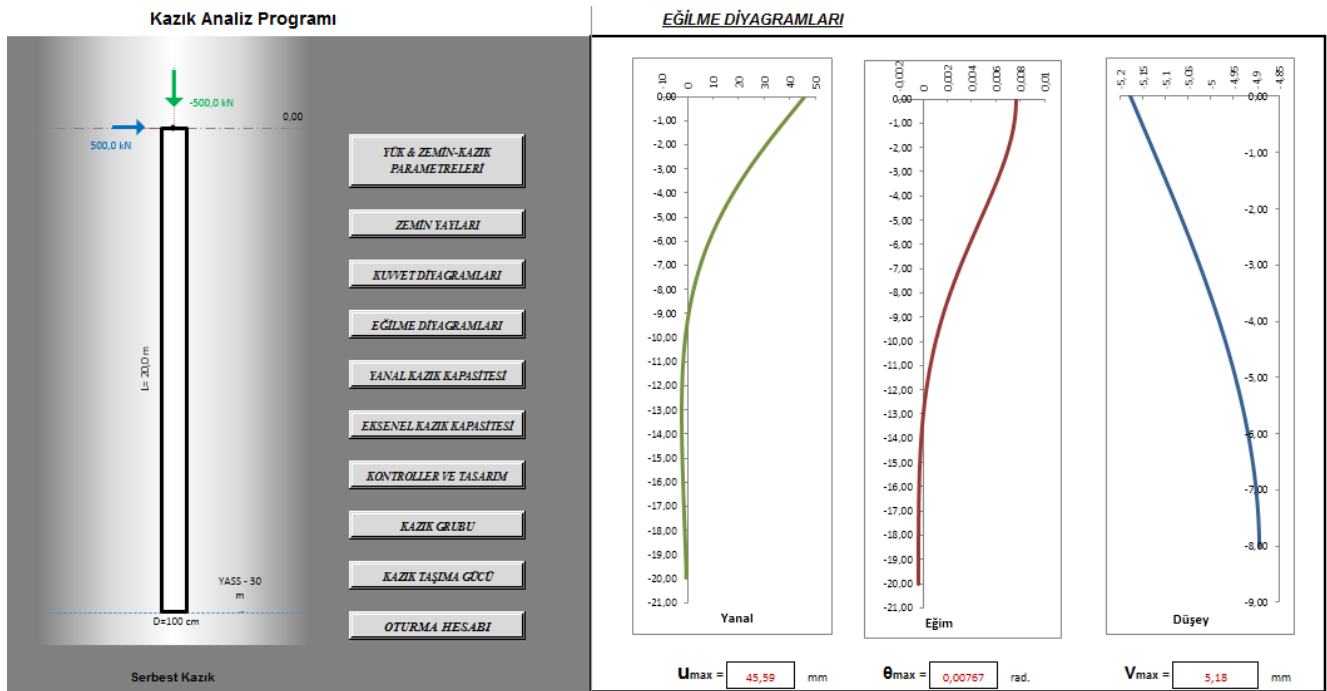
Şekil 8.49: Kazık analiz programı yük, zemin ve kazık parametrelerinin tayini



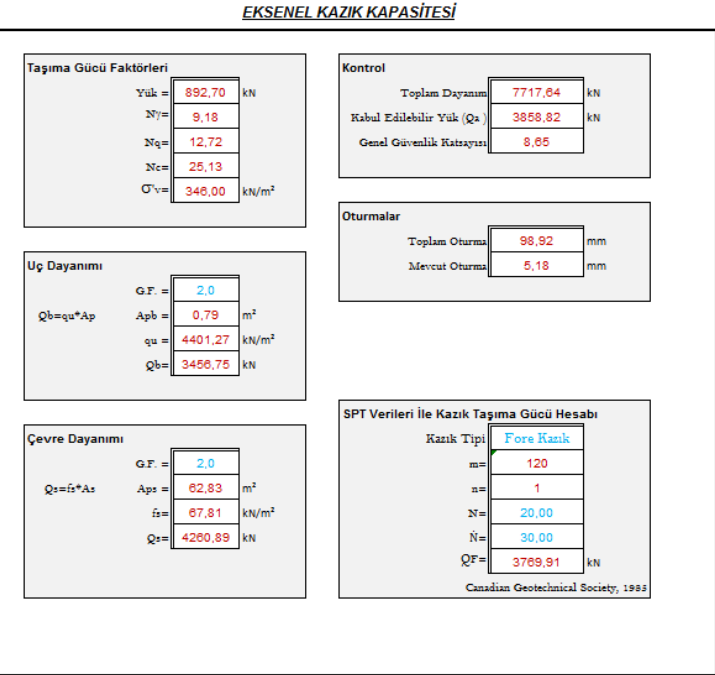
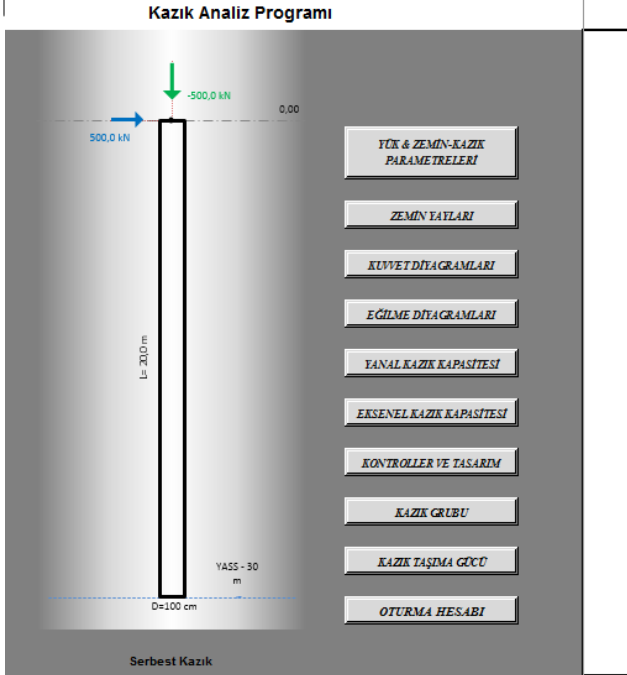
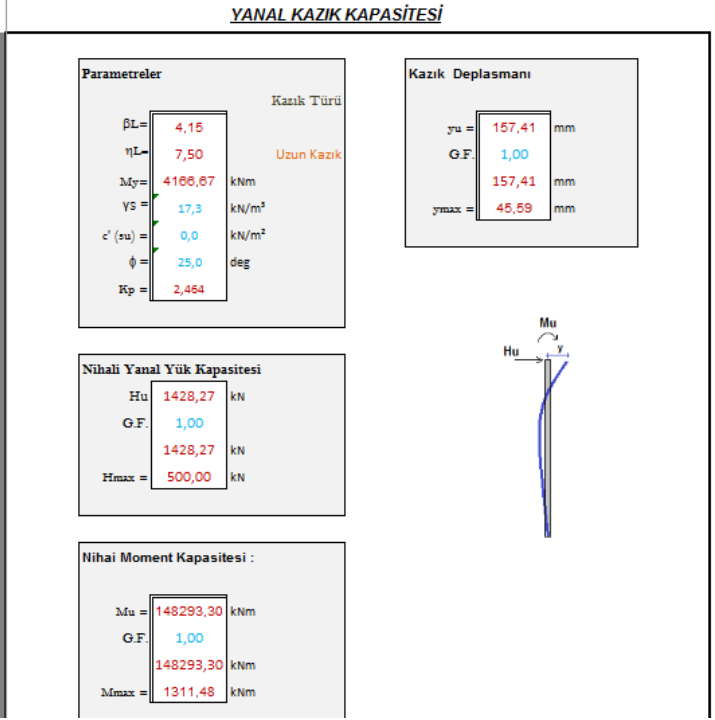
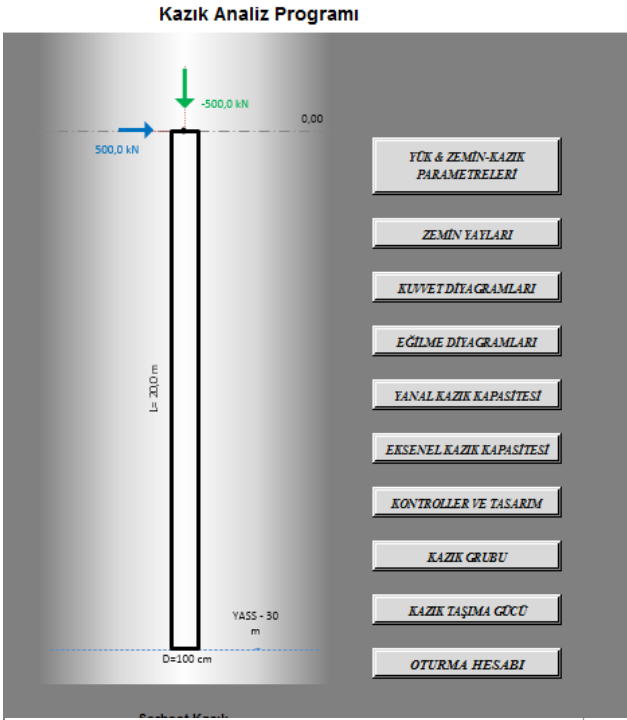
8.50: Kazık analiz programı zemin yaylarının tanımlanması



8.51: Kazık analiz programı kuvvet diyagramlarının elde edilmesi



8.52: Kazık analiz programı deplasmanların elde edilmesi

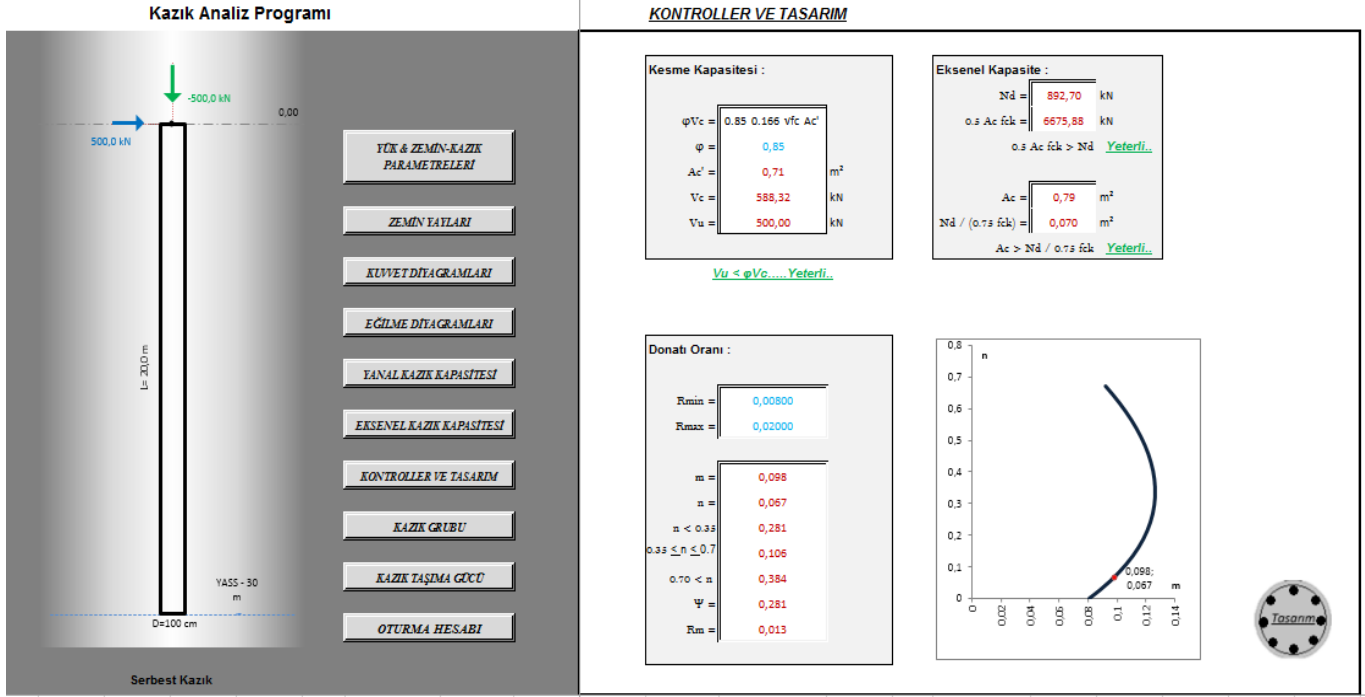


Oturmalar

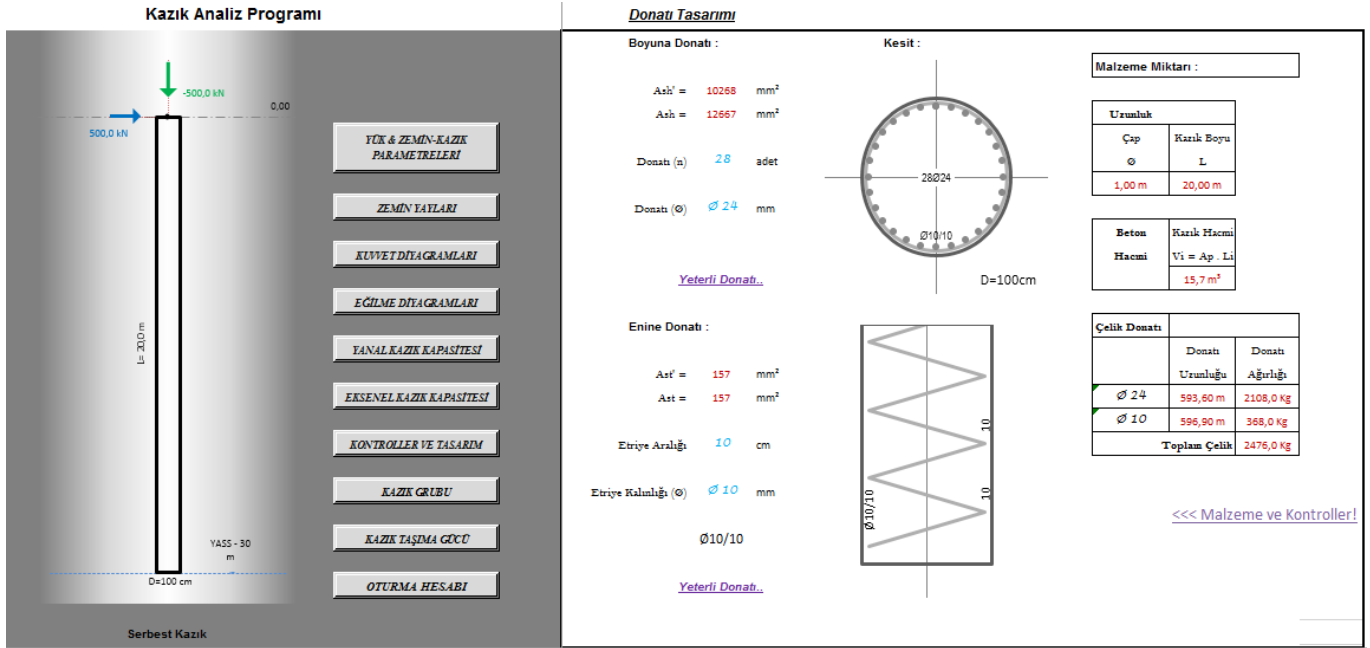
Toplam Oturma	98,92	mm
Mevcut Oturma	5,18	mm

8.53: Kazık analiz programı yanıl kazık kapasitesinin elde edilmesi

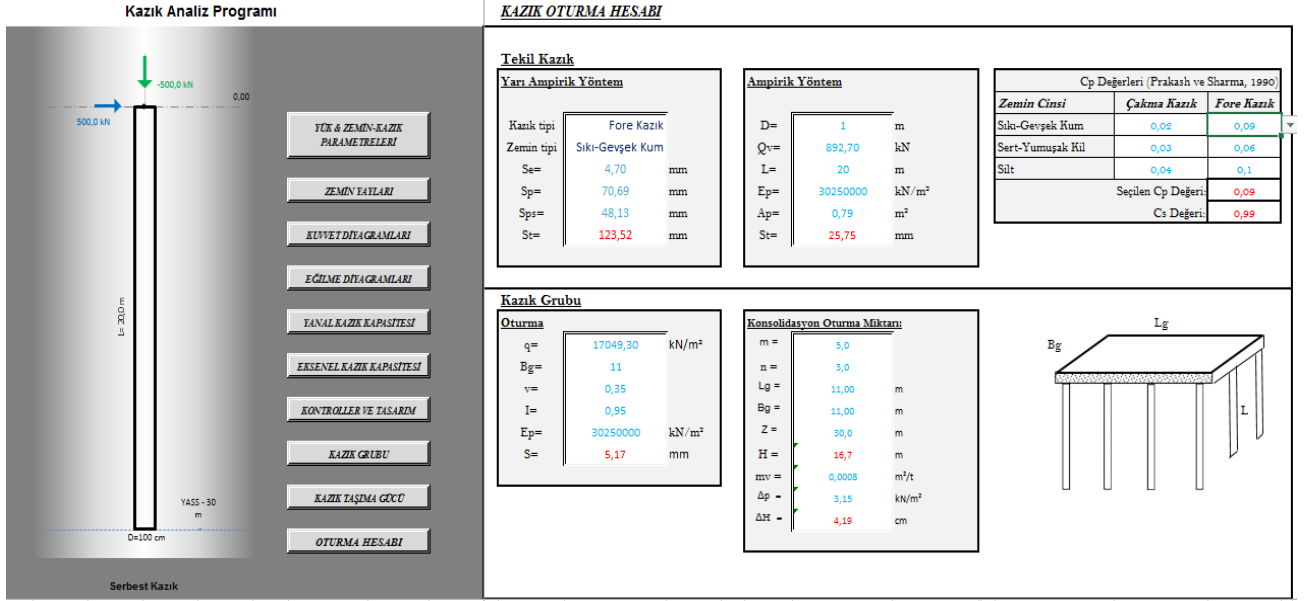
8.54: Kazık analiz programı eksenel kazık kapasitesinin elde edilmesi



8.55: Kazık analiz programı betonarme kesit tasarım hesaplamaları



8.56: Kazık analiz programı donatı ve metraj hesaplamaları



8.57: Kazık analiz programı oturma hesaplamaları

Yapılan analizler neticesinde elde edilen analiz sonuçları özet tablo olarak Tablo 8.18’de sunulmaktadır.

Tablo 8.18: Kazık analiz programı ile elde edilen analiz sonuçları özeti

Maksimum moment (knM)	1311,48
Maksimum kesme kuvveti (kN)	500,00
Maksimum aksenal kuvvet (kN)	502,14
Yatay deplasman (mm)	157,41
Düşey deplasman (mm)	123,52
Başlık dönme açısı (rad)	0,00767
İzin verilebilir yanal yük (kN)	1428,27
İzin verilebilir moment (kNm)	148293
İzin verilebilir düşey yük (kN)	3858,82

8.4 Kohezyonsuz Zeminde Teşkil Edilen Tekil Kazığın Yatay ve Düşey Yükler Altında Analizi (YASS:-10m)

8.4.1 Plaxis İle Analiz

Analizlerde kullanılacak zemin ve kazık parametreleri Tablo 8.19 ve Tablo 8.20'de gösterilmektedir.

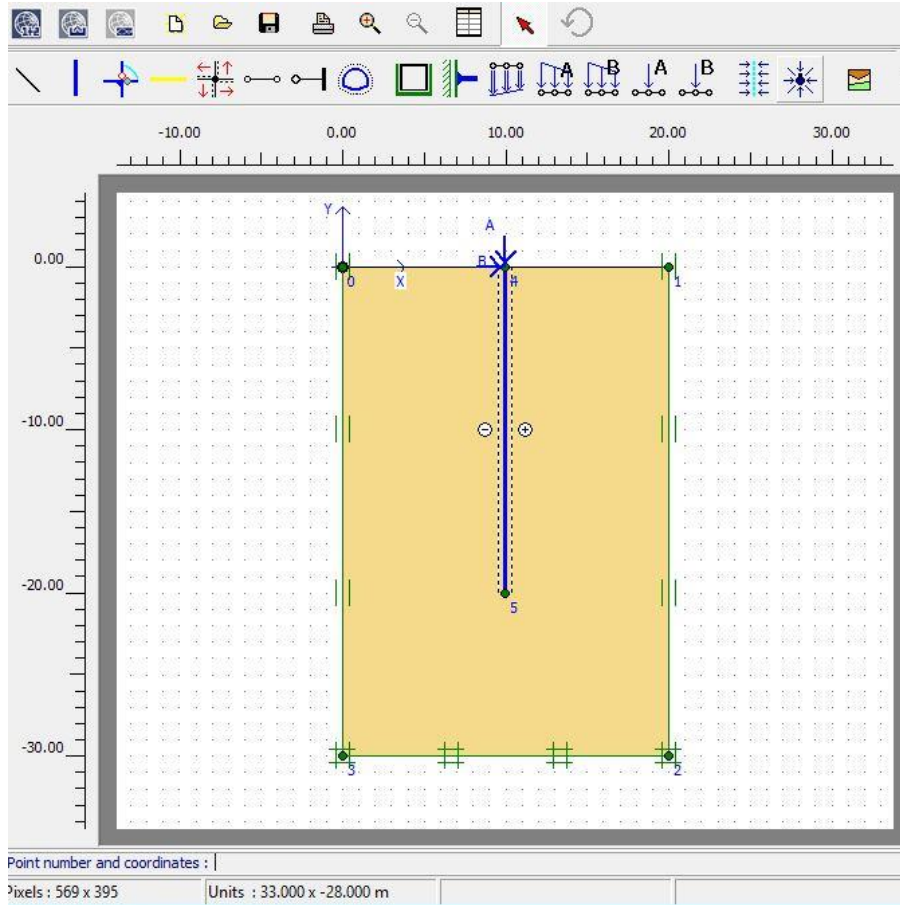
Tablo 8.19: Zemin parametreleri

<i>Zemin Cinsi</i>	Kohezyonsuz
<i>Tabaka Kalınlığı (m)</i>	30
<i>γ (kN/m³)</i>	17,3
<i>γ_{sat} (kN/m³)</i>	18,58
<i>γ_{unsat} (kN/m³)</i>	13,9
<i>k_x, k_y (m/s)</i>	10 ⁻⁹
<i>Eref (kN/m²)</i>	11000
<i>Gref (kN/m²)</i>	4074,074
<i>ν</i>	0,35
<i>c (kN/m²)</i>	0
<i>\emptyset(°)</i>	25
<i>Model-Element</i>	Plane Strain-15 Noded
<i>Model Ölçüleri</i>	X:0;20m, Y:-30;0m
<i>YASS</i>	-10m

Tablo 8.20: Kazık parametreleri

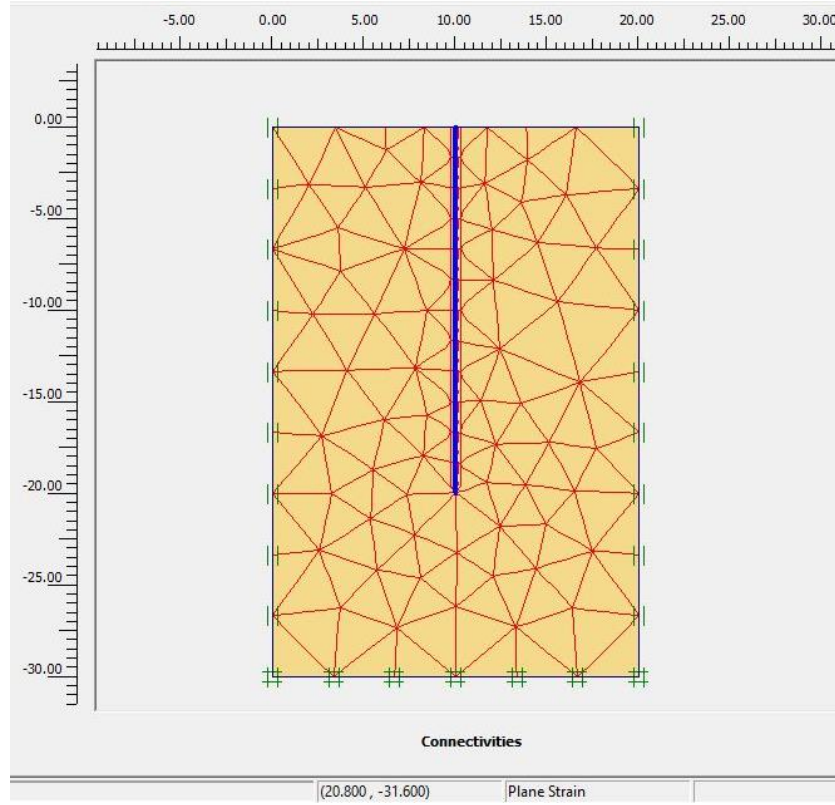
D (m)	1
L (m)	20
A (m ²)	0,79
d (m)	0,886
E (kN/m ²)	$3 \cdot 10^7$
EA (kN)	23561945
EI (kNm ²)	1484893,4
W (kN/m)	7,7
ν	0,2

Belirtilen zemin ve kazık parametreleri doğrultusunda iki boyutlu olarak sistem modellenmesi yapılmıştır. (Şekil 8.58)



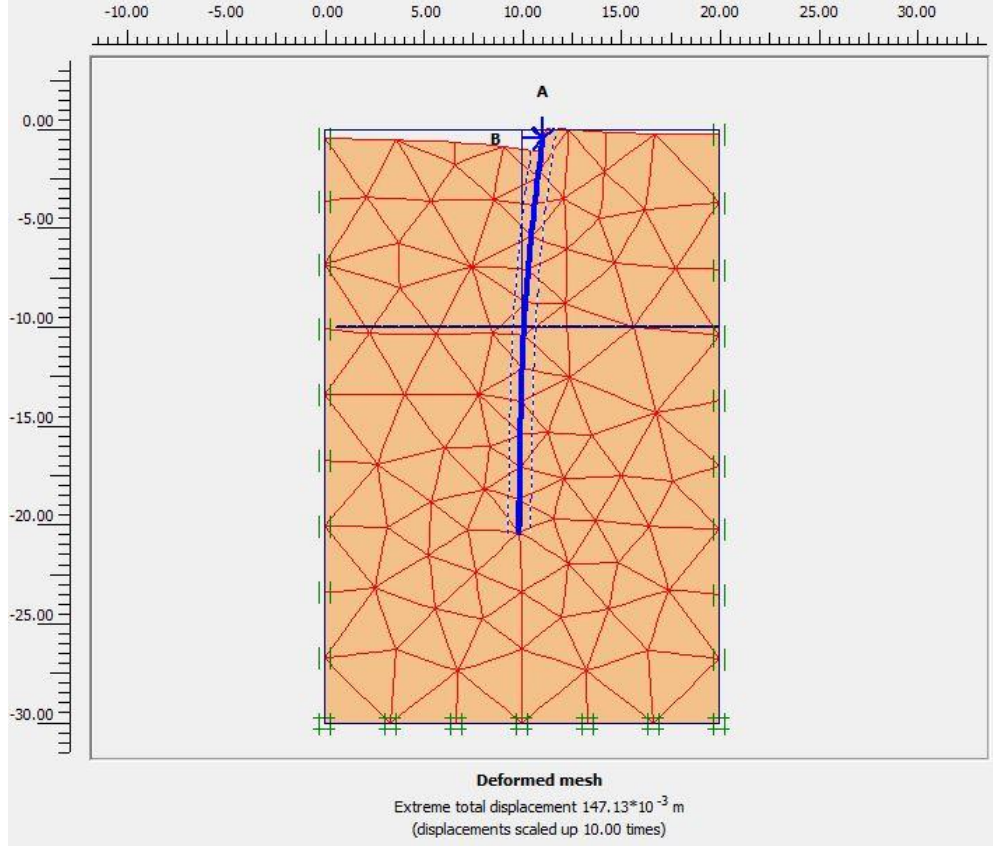
Şekil 8.58: Plaxis 2D sistem modeli

Bu aşamada ara yüz tanımlama, sınır koşulları belirleme işlemleri tamamlandıktan sonra sisteme etki edecek yükler tanımlanmıştır. Yükler yatayda $H=500\text{kN}$ ve düşeyde $V=500\text{kN}$ olmak üzere seçilmiştir. Zemin ve kazığa ait malzeme parametreleri tanımlandıktan sonra mesh ağı oluşturulmuştur. (Şekil 8.59)

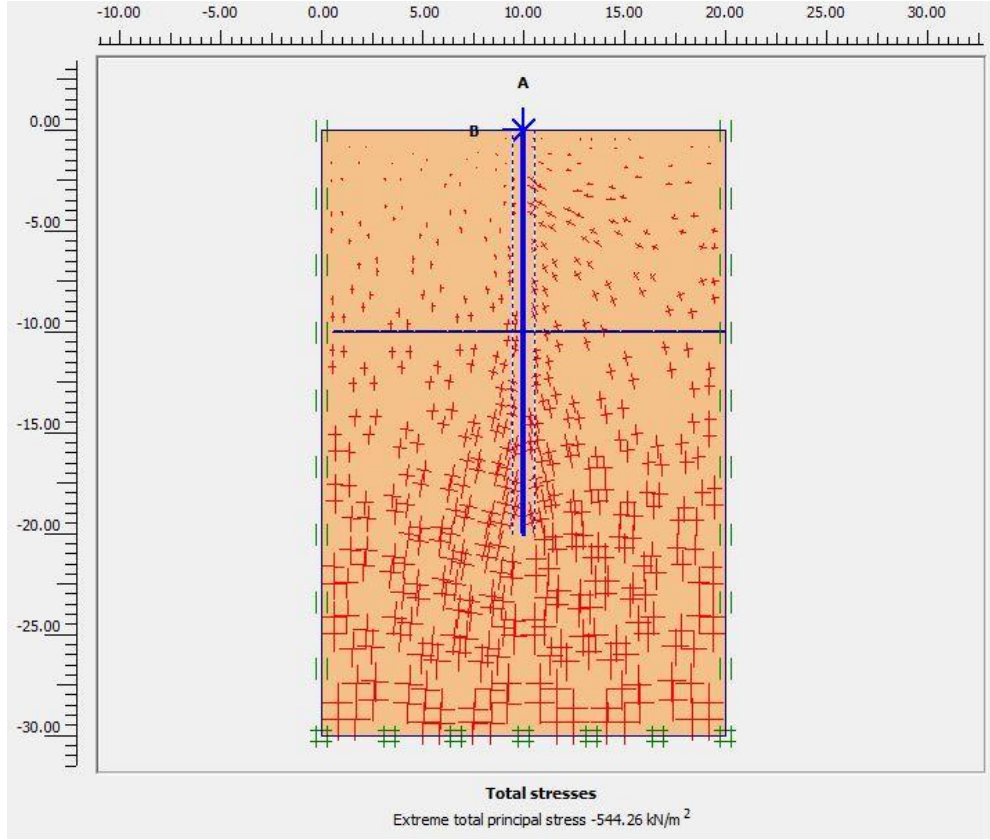


Şekil 8.59: Plaxis 2D sistem mesh ağı

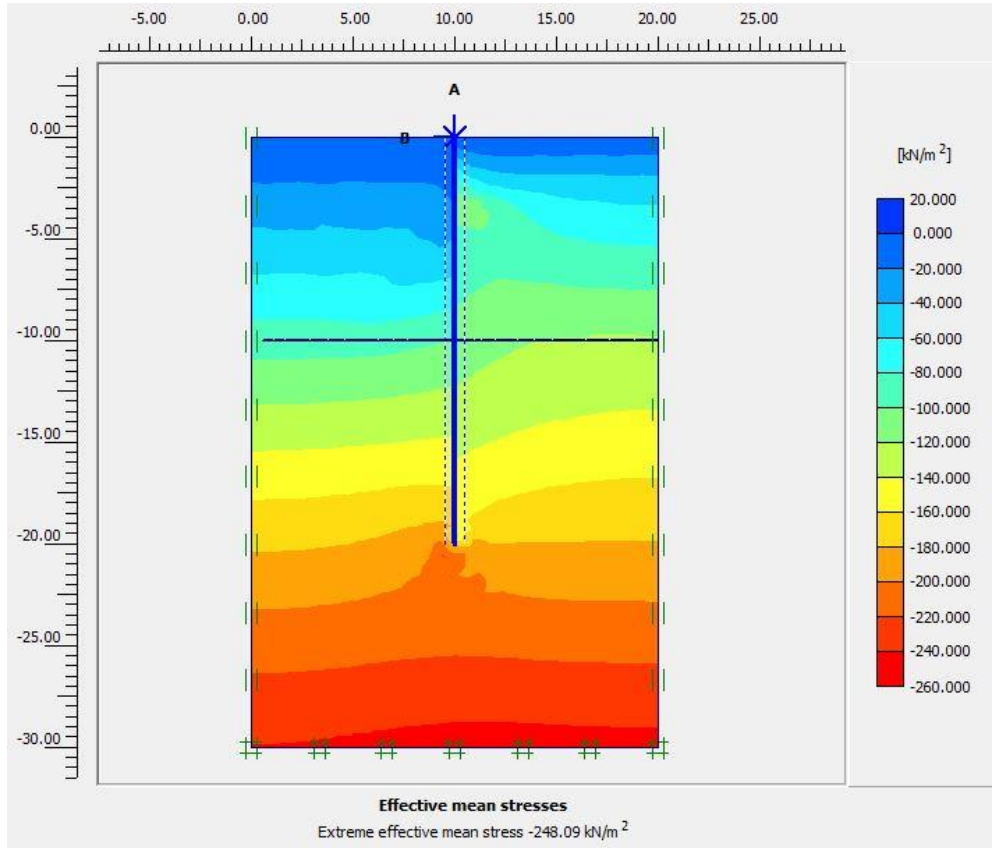
Yatay ve düşey yük altında sistemde oluşan deformasyonlar ve deforme mesh ağı aşağıda gösterilmektedir. Daha sonra analiz fazları tanımlanarak sisteme ait analiz sonuçları elde edilmiştir.



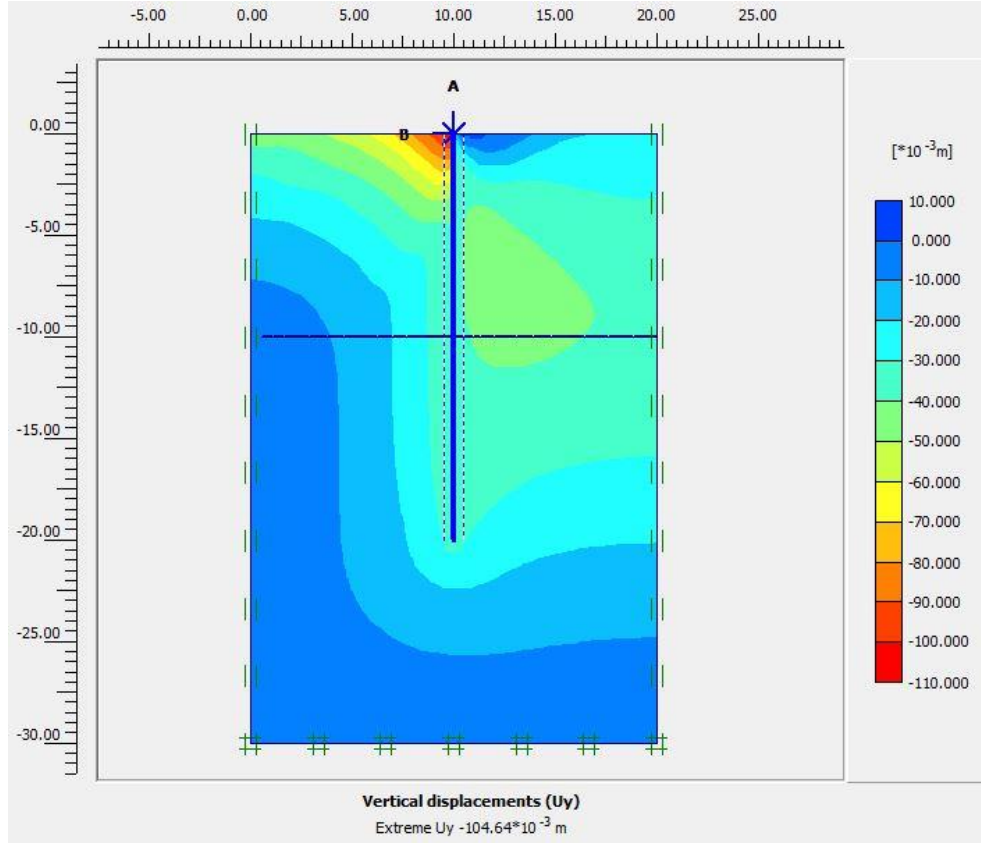
Şekil 8.60: Plaxis 2D sistemin deforme olmuş hali ve deforme mesh ağı



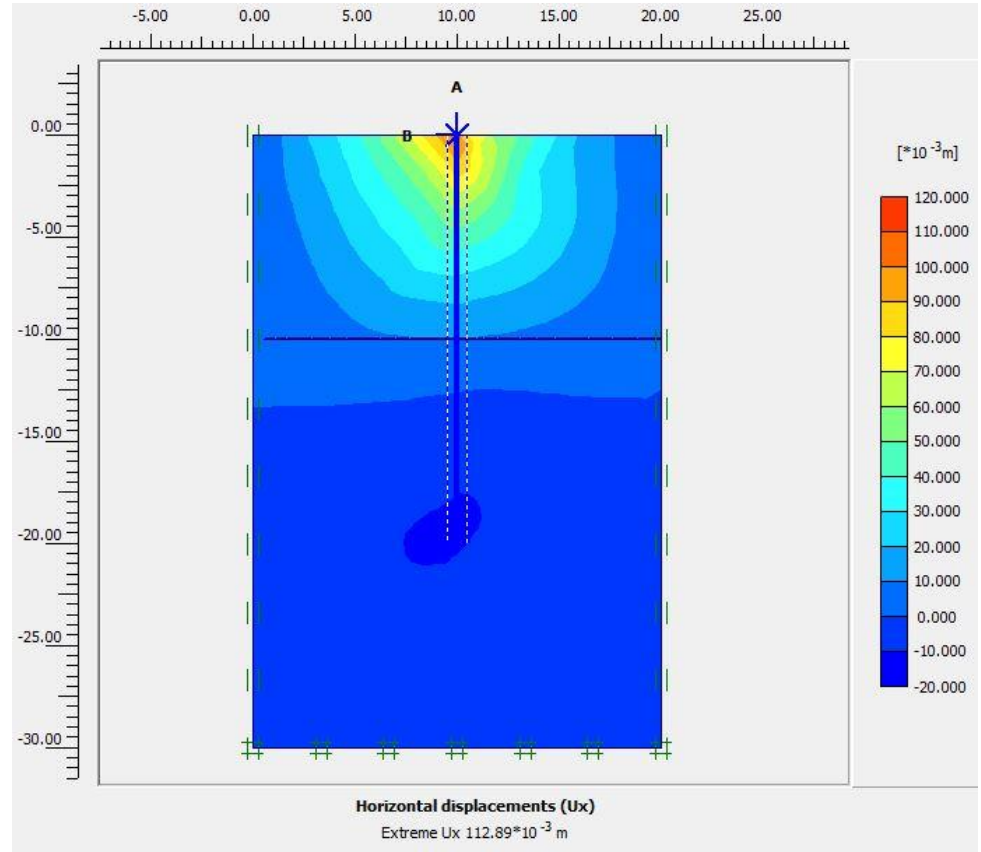
Şekil 8.61: Plaxis 2D toplam gerilme miktarı



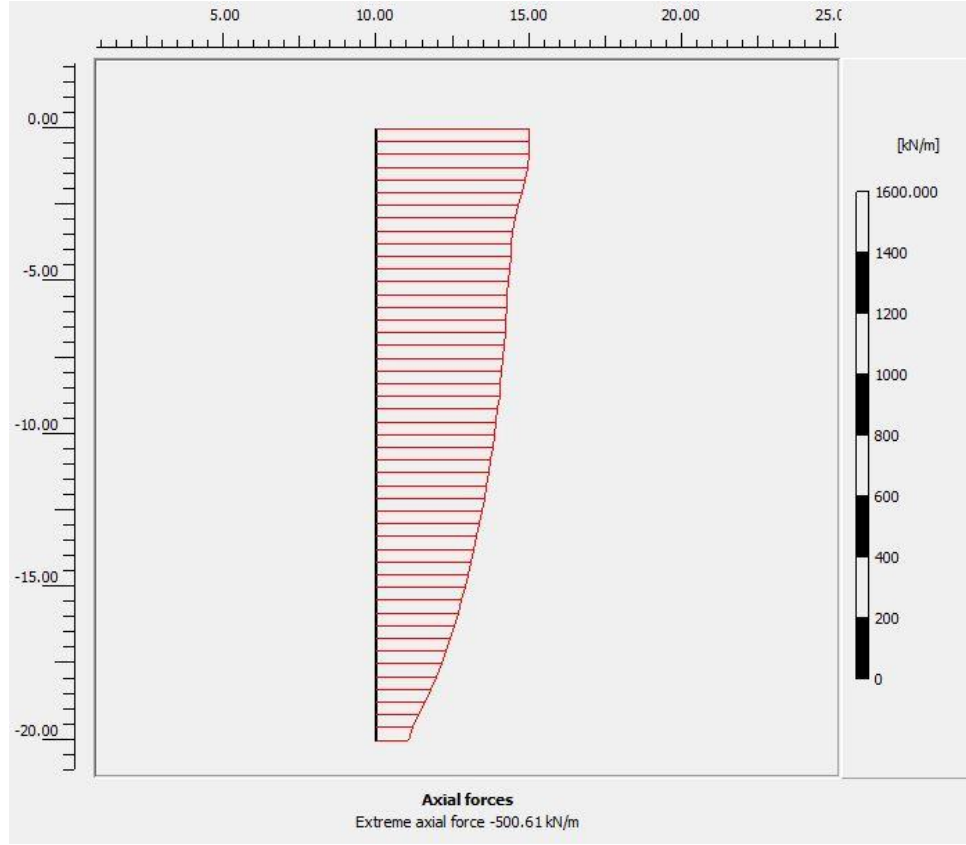
Şekil 8.62: Plaxis 2D ortalama gerilme



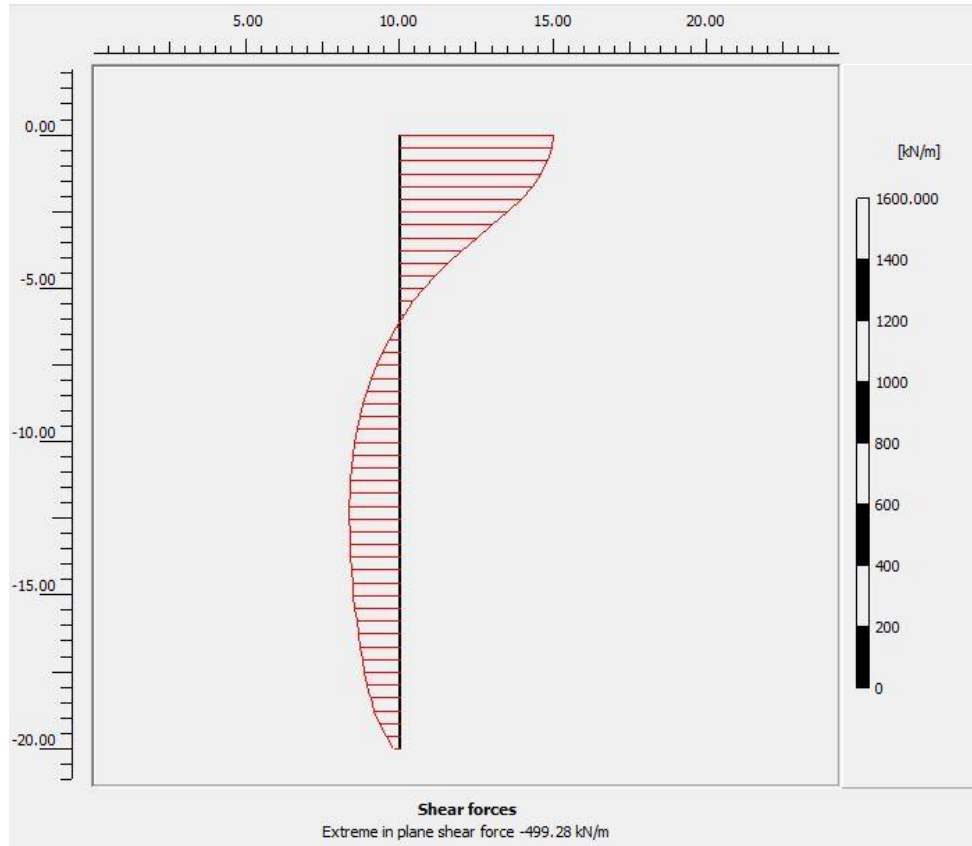
Şekil 8.63: Plaxis 2D düşey deplasman miktarı



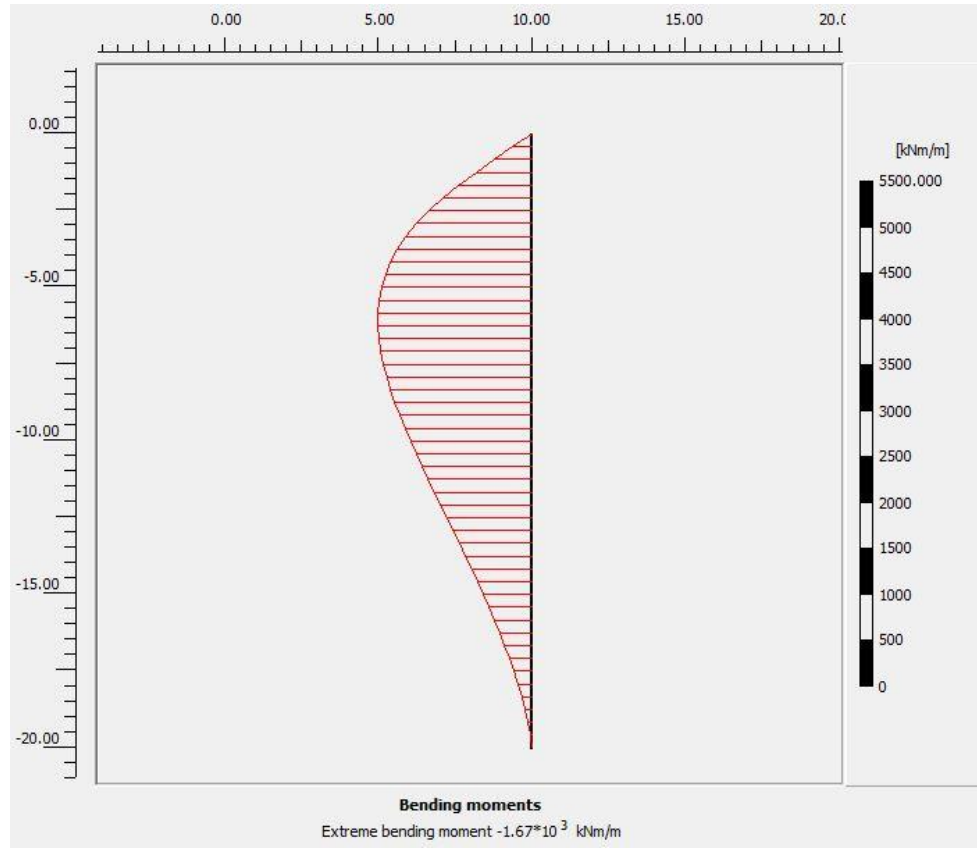
Şekil 8.64: Plaxis 2D yatay deplasman miktarı



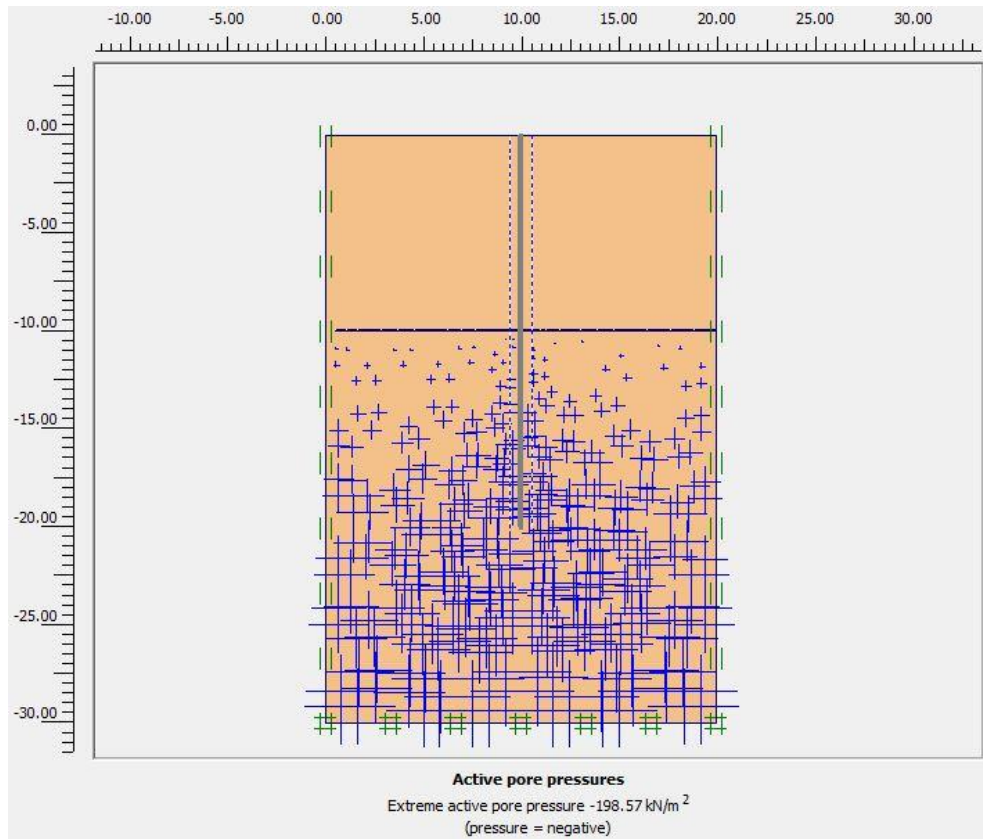
Şekil 8.65: Plaxis 2D kazığa ait eksenel kuvvet diyagramı



Şekil 8.66: Plaxis 2D kazığa ait kesme kuvveti diyagramı



Şekil 8.67: Plaxis 2D kazığa ait moment diyagramı



Şekil 8.68: Plaxis 2D aktif gözenek basıncı

Analizde elde edilen veriler özet olarak Tablo 8.21’de verilmektedir.

Tablo 8.21: Plaxis analiz sonuçları

<i>Toplam gerilme</i>	544,26 kN/m ²
<i>Efektif gerilme</i>	377,79 kN/m ²
<i>Ortalama gerilme</i>	248,09 kN/m ²
<i>Düşey deplasman</i>	104,64 x10 ⁻³ m
<i>Yatay deplasman</i>	112,89 x10 ⁻³ m
<i>Maksimum aksenal kuvvet</i>	500,61 kN
<i>Maksimum kesme kuvveti</i>	499,28 kN
<i>Maksimum moment</i>	1,67 x10 ³ kNm

8.4.2 Kazık Programı İle Analiz

Kazık programıyla yapılacak analizlerde kullanılan zemin, yük ve kazık parametreleri Tablo 8.22 ve Tablo 8.23’de belirtilmektedir. Analizde elde edilen veriler görsel olarak aşağıda sıralanmaktadır.

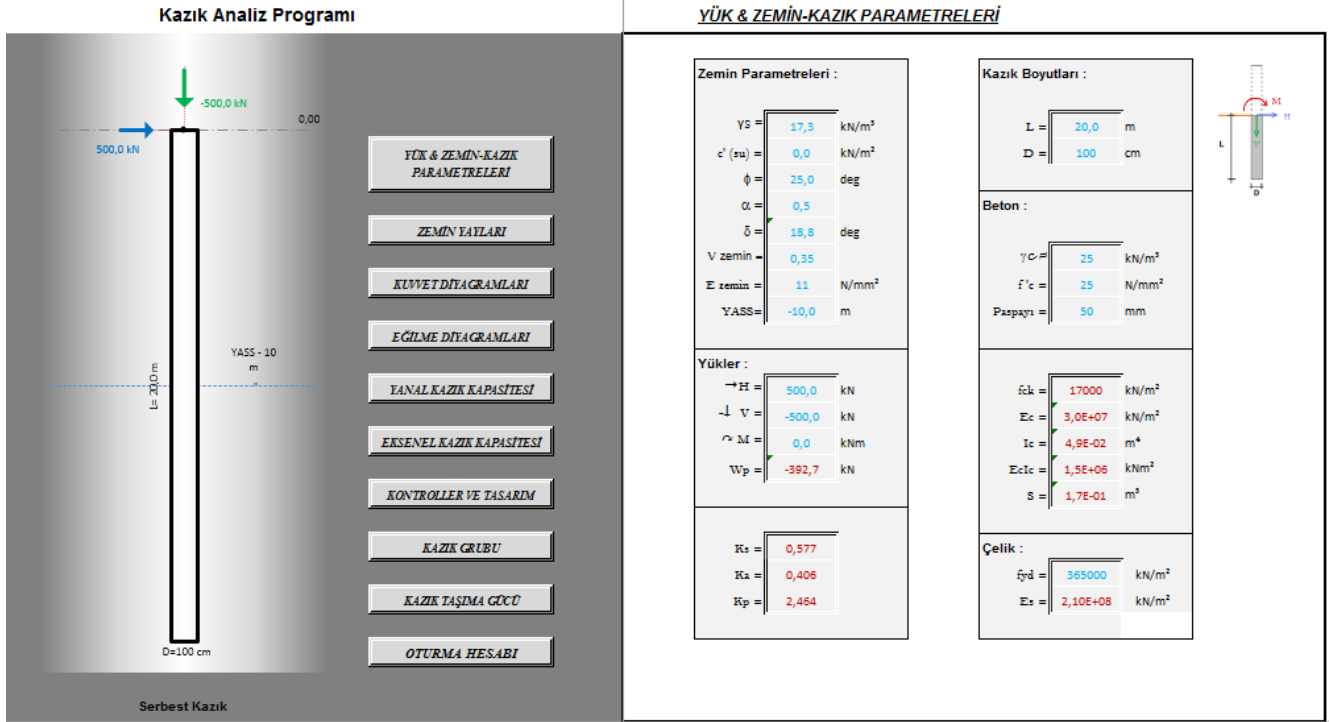
Tablo 8.22: Zemin parametreleri

<i>Zemin Cinsi</i>	Kohezyonlu
<i>Tabaka Kalınlığı (m)</i>	30
<i>γ (kN/m³)</i>	17,3
<i>\emptyset (°)</i>	25
<i>c (kN/m²)</i>	0
<i>E_{ref} (kN/m²)</i>	11000
<i>α (Adhezyon)</i>	0
<i>δ (Sürtünme açısı)</i>	18,8
<i>ν</i>	0,35
<i>YASS</i>	-10m

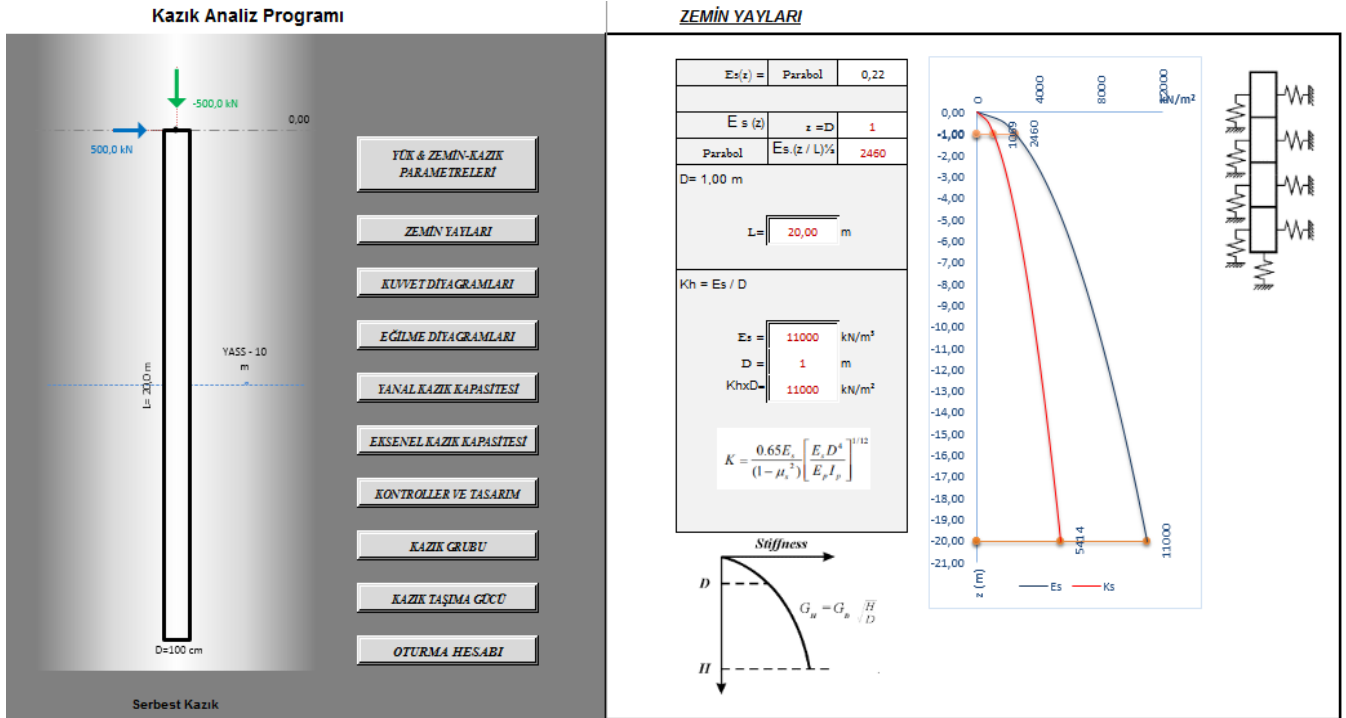
Tablo 8.23: Kazık parametreleri

<i>D (m)</i>	1
<i>L (m)</i>	20
<i>A (m²)</i>	0,79
<i>E (kN/m²)</i>	3.10 ⁷
<i>EA (kN)</i>	23561945
<i>EI (kNm²)</i>	1484893,4
<i>S (m³)</i>	0,167
<i>v</i>	0,2

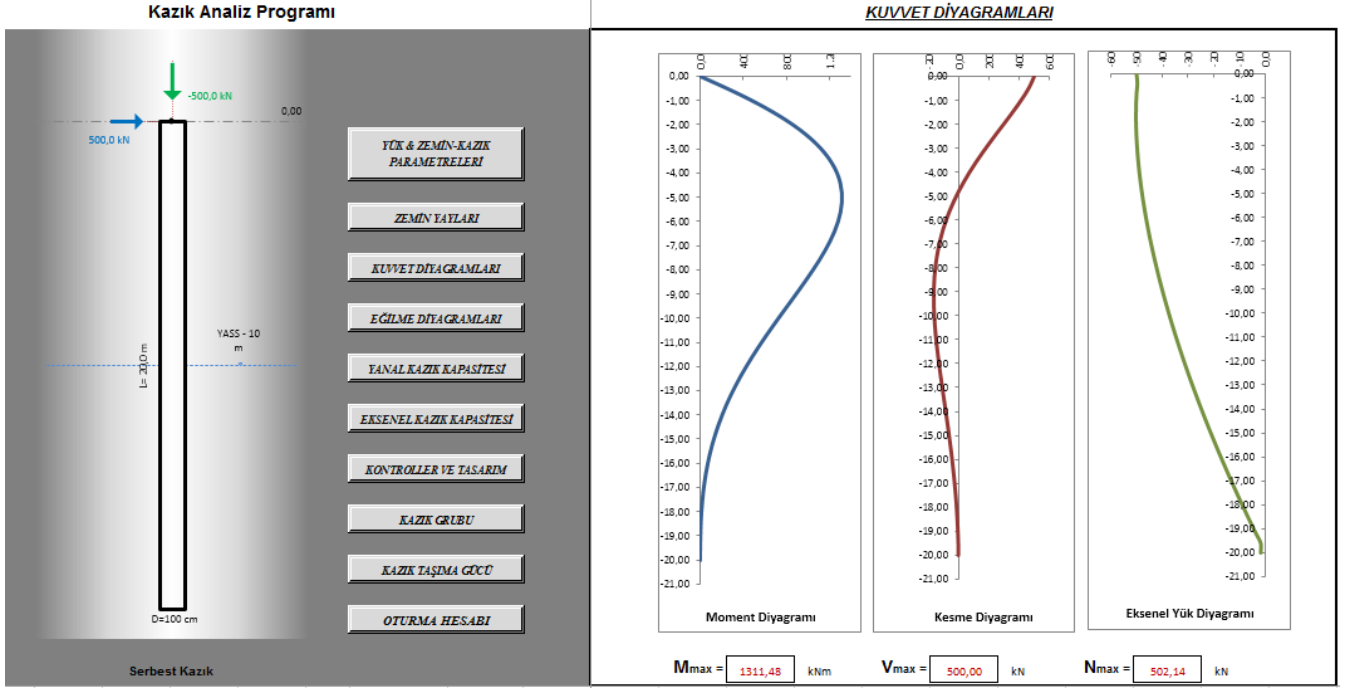
Yükler yatayda H=500kN ve düşeyde V=500kN olmak üzere seçilmiştir.



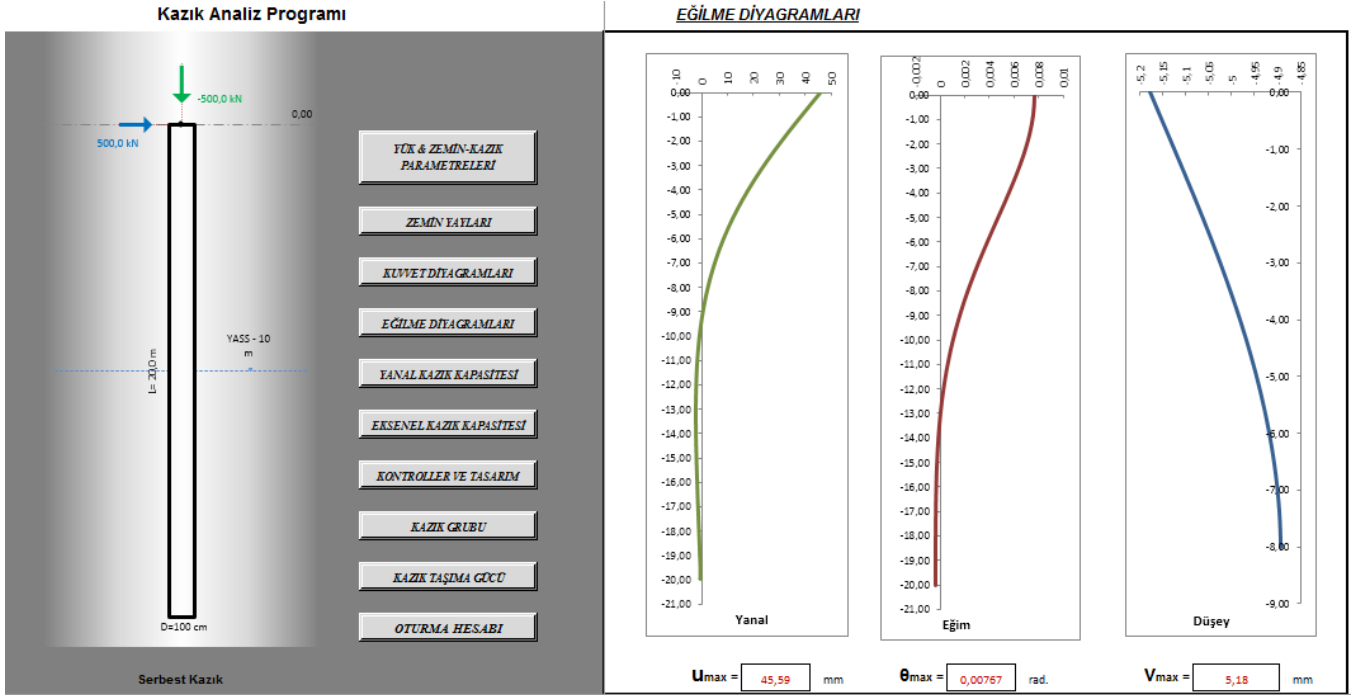
Şekil 8.69: Kazık analiz programı yük, zemin ve kazık parametrelerinin tayini



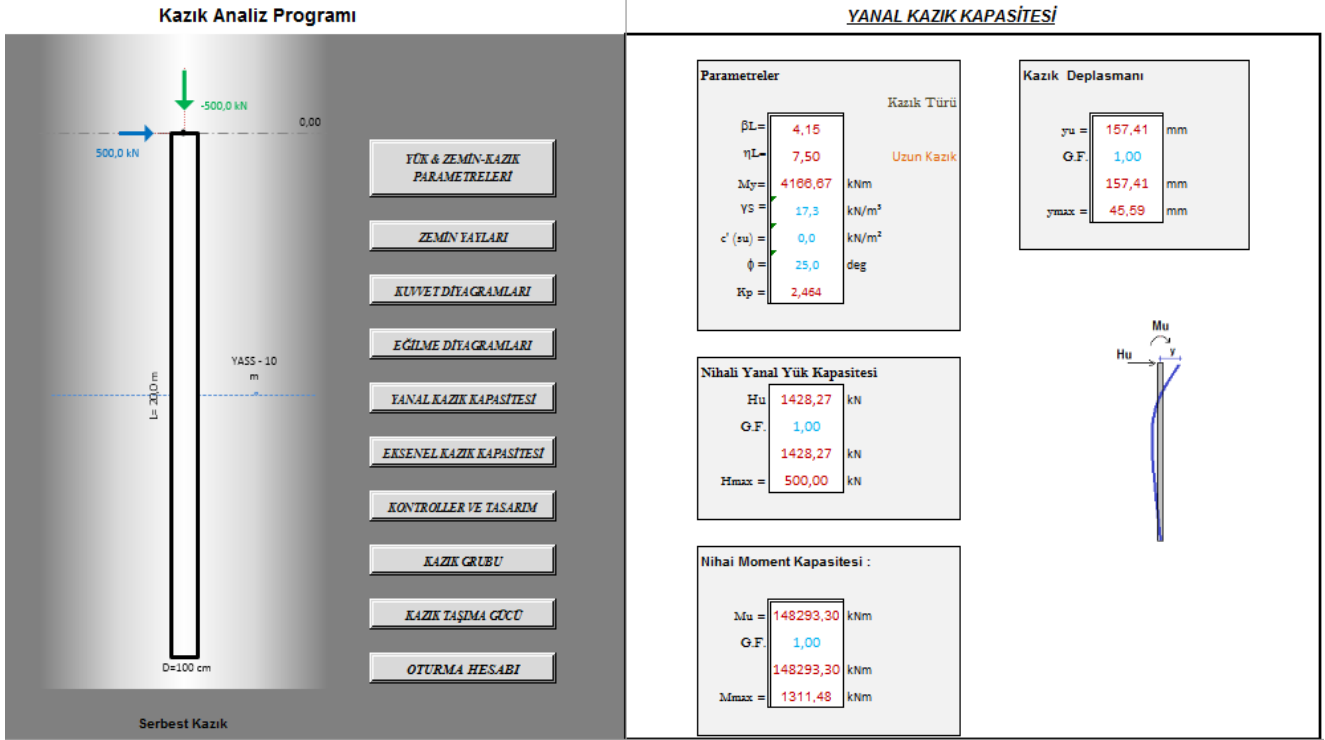
8.70: Kazık analiz programı zemin yaylarının tanımlanması



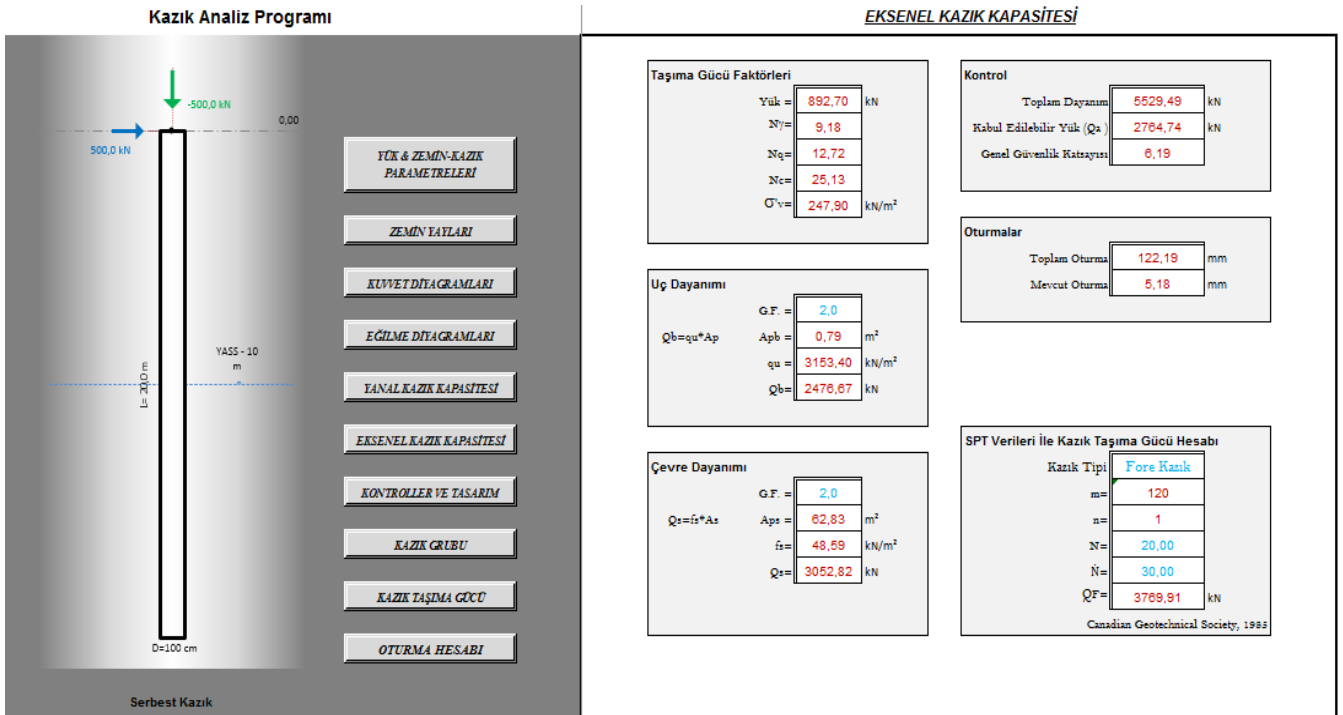
8.71: Kazık analiz programı kuvvet diyagramlarının elde edilmesi



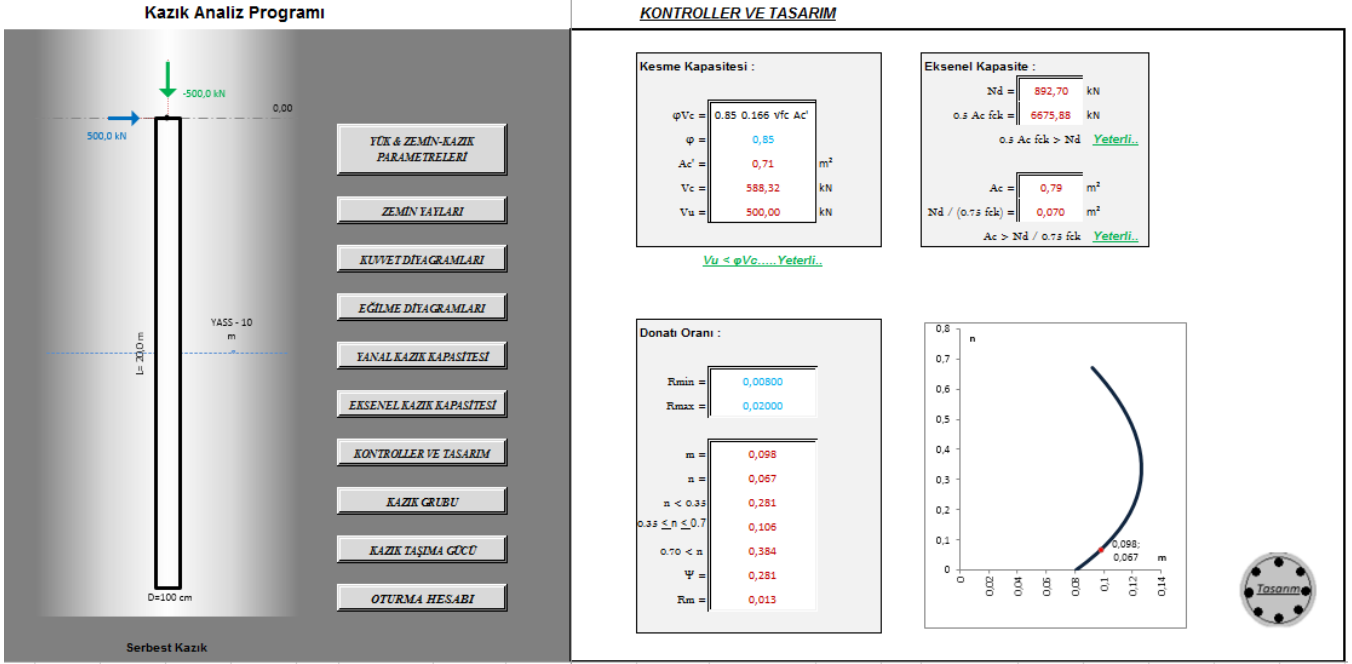
8.72: Kazık analiz programı deplasmanların elde edilmesi



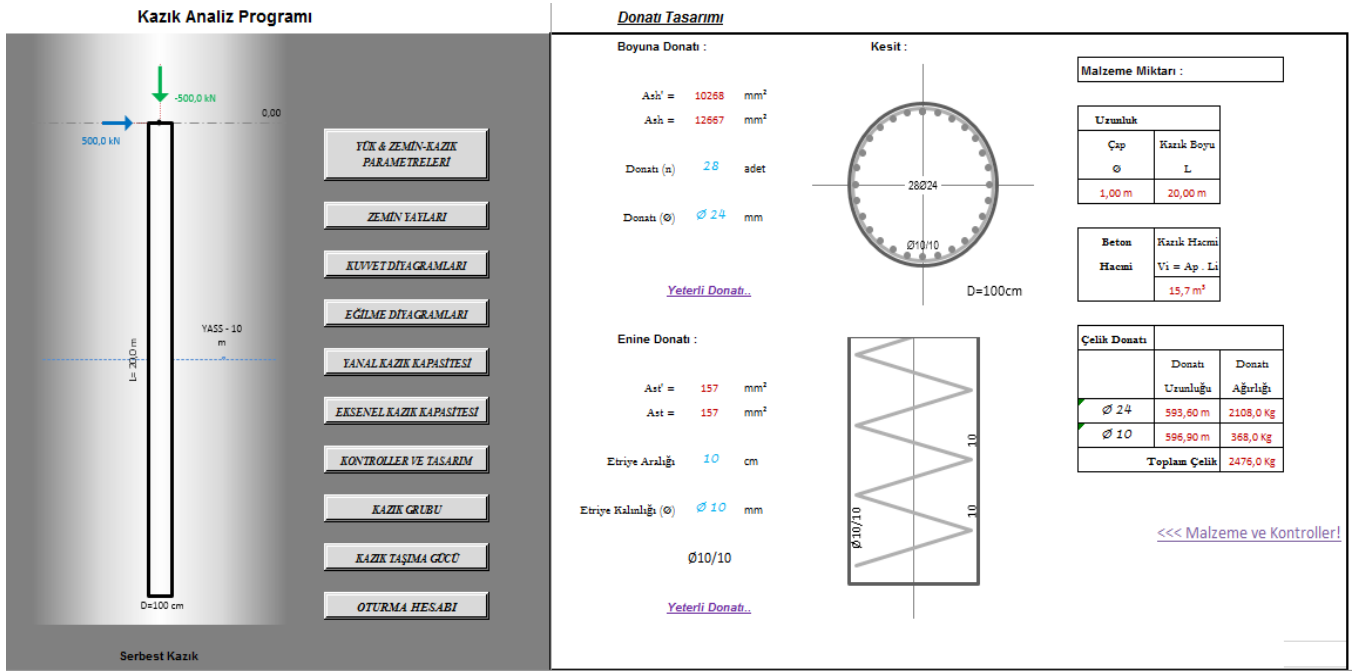
8.73: Kazık analiz programı yanıl kazık kapasitesinin elde edilmesi



8.74: Kazık analiz programı eksenel kazık kapasitesinin elde edilmesi



8.75: Kazık analiz programı betonarme kesit tasarımı hesaplamaları



8.76: Kazık analiz programı donatı ve metraj hesaplamaları

Kazık Analiz Programı

KAZIK OTURMA HESABI

Tekil Kazık

Yarı Ampirik Yöntem

Kazık tipi: Fore Kazık
Zemin tipi: Sıkı-Gevşek Kum

Se= 3,37 mm
Sp= 70,69 mm
Sp_s= 48,13 mm
St= 122,19 mm

Ampirik Yöntem

D= 1 m
Q_y= 892,70 kN
L= 20 m
E_p= 30250000 kN/m²
A_p= 0,79 m²
St= 25,75 mm

Cp Değerleri (Prakash ve Sharma, 1990)

Zemin Cinsi	Çakma Kazık	Fore Kazık
Sıkı-Gevşek Kum	0,02	0,09
Sert-Yumuşak Kil	0,03	0,06
Silt	0,04	0,1
Seçilen Cp Değeri:		0,09
Cs Değeri:		0,99

Kazık Grubu

Oturma

q= 17049,30 kN/m²
Bg= 11
v= 0,35
I= 0,95
E_p= 30250000 kN/m²
S= 5,17 mm

Konsolidasyon Oturma Miktarı:

m= 5,0
n= 3,0
L_g= 11,00 m
Bg= 11,00 m
Z= 30,0 m
H= 16,7 m
mv= 0,0008 m³/t
Δp= 3,15 kN/m²
ΔH= 4,19 cm

Serbest Kazık

YUK & ZEMİN-KAZIK PARAMETRELERİ
ZEMİN YATLARI
KUVVET DİYAGRAMLARI
EĞİLME DİYAGRAMLARI
YANAL KAZIK KAPASİTESİ
EKSENEL KAZIK KAPASİTESİ
KONTROLLER VE TASARIM
KAZIK GRUBU
KAZIK TAŞIMA GÜCÜ
OTURMA HESABI

8.77: Kazık analiz programı oturma hesaplamaları

Yapılan analizler neticesinde elde edilen analiz sonuçları özet tablo olarak Tablo 8.24'de sunulmaktadır.

Tablo 8.24: Kazık analiz programı ile elde edilen analiz sonuçları özeti

Maksimum moment (knM)	1311,48
Maksimum kesme kuvveti (kN)	500,00
Maksimum aksenal kuvvet (kN)	502,14
Yatay deplasman (mm)	157,41
Düşey deplasman (mm)	122,19
Başlık dönme açısı (rad)	0,00767
İzin verilebilir yanal yük (kN)	1428,27
İzin verilebilir moment (kNm)	148293
İzin verilebilir düşey yük (kN)	2764,74

8.5 Kohezyonlu Zeminde Teşkil Edilen Tekil Kazığın Yatay ve Düşey Yük Etkisi Altında Analizi (YASS= 0.00m)

8.5.1 Plaxis İle Analiz

Daha önce kohezyonlu zeminde yapılan analize ek olarak kohezyon için daha yüksek bir değer alınmış, yer altı su seviyesi yüzeye yani sıfır noktasına çekilmiş ve

poisson oranı 0,45 alınarak çözümler gerçekleştirilmiştir. Tablo 8.25 ve Tablo 8.26’da zemin ve kazık parametreleri kullanılmıştır. Yanal ve düşey yük değeri 500 kN olarak daha önceki analizlerdeki aynı değerler alınmıştır.

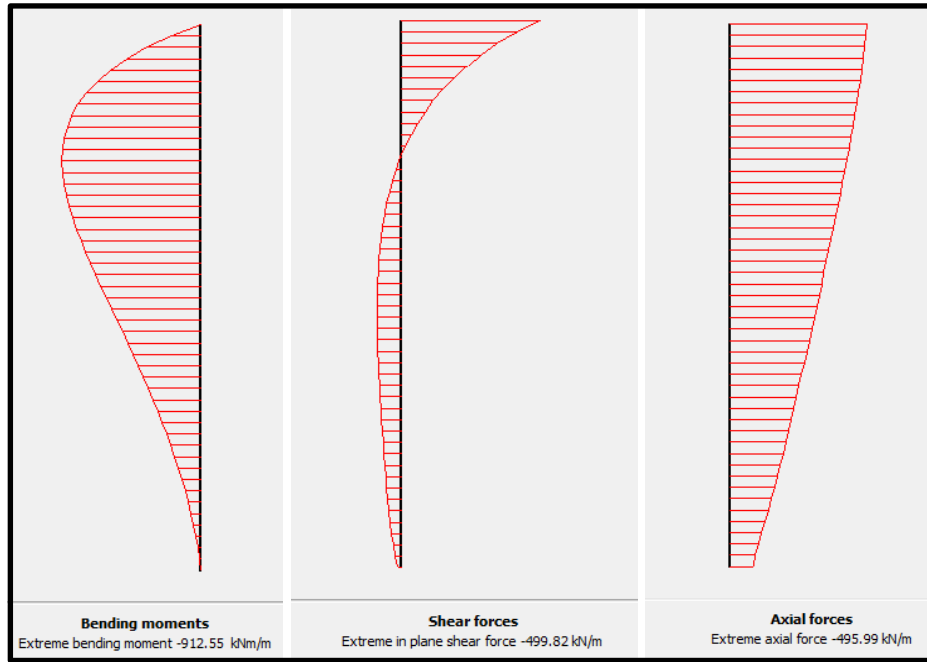
Tablo 8.25: Zemin parametreleri

Zemin Cinsi	Kohezyonlu
Tabaka Kalınlığı (m)	30
γ (kN/m³)	17,3
γ_{sat} (kN/m³)	18,58
γ_{unsat} (kN/m³)	13,9
k_x, k_y (m/s)	10 ⁻⁹
E_{ref} (kN/m²)	11000
G_{ref} (kN/m²)	4074,074
ν	0,45
c (kN/m²)	25
ϕ (°)	25
Model-Element	Plane Strain-15 Noded
Model Ölçüleri	X:0;20m, Y:-30;0m
YASS	0.00 m

Tablo 8.26: Kazık parametreleri

D (m)	1
L (m)	20
A (m²)	0,79
d (m)	0,886
E (kN/m²)	3.10 ⁷
EA (kN)	23561945
EI (kNm²)	1484893,4
W (kN/m)	7,7
ν	0,2

Plaxis ile yapılan analizler neticesinde elde edilen kuvvet diyagramları Şekil 8.78’de gösterilmektedir.



Şekil 8.78: Plaxis ile elde edilen kuvvet diyagramları

Analizler sonucunda elde edilen tüm sonuçlar Tablo 8.27’de verilmektedir.

Tablo 8.27: Plaxis analiz sonuçları tablosu

<i>Toplam gerilme</i>	591,82 kN/m ²
<i>Efektif gerilme</i>	260,54 kN/m ²
<i>Ortalama gerilme</i>	521,05 kN/m ²
<i>Düşey deplasman</i>	41,83x10 ⁻³ m
<i>Yatay deplasman</i>	86,96x10 ⁻³ m
<i>Maksimum eksenel kuvvet</i>	495,99 kN
<i>Maksimum kesme kuvveti</i>	499,82 kN
<i>Maksimum moment</i>	912,55 kNm

8.5.1 Kazık Programı İle Analiz

Kazık programıyla yapılacak analizlerde kullanılan zemin, yük ve kazık parametreleri Tablo 8.28 ve Tablo 8.29’da belirtilmektedir. Analizde elde edilen kuvvet diyagramları verileri Şekil 8.79’da gösterilmektedir.

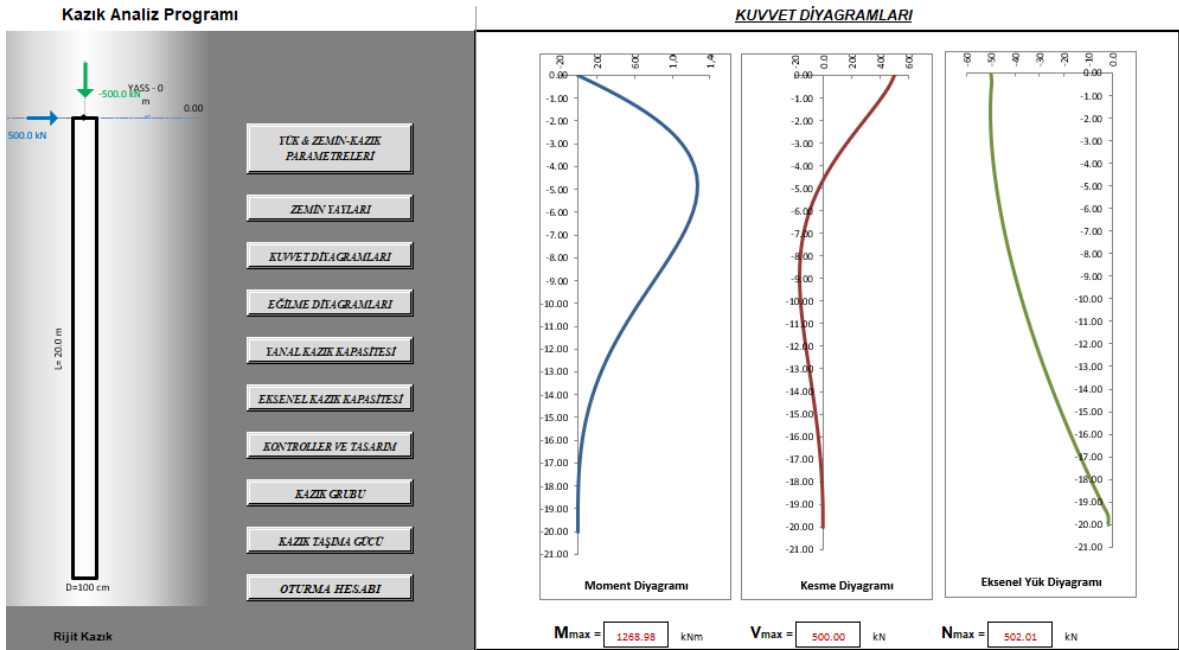
Tablo 8.28: Zemin parametreleri

<i>Zemin Cinsi</i>	Kohezyonlu
<i>Tabaka Kalınlığı (m)</i>	30
γ (kN/m^3)	17,3
ϕ ($^\circ$)	25
c (kN/m^2)	25
E_{ref} (kN/m^2)	11000
α (<i>Adhezyon</i>)	0,5
δ (<i>Sürtünme açısı</i>)	18,8
ν	0,45
YASS	0,00m

Tablo 8.29: Kazık parametreleri

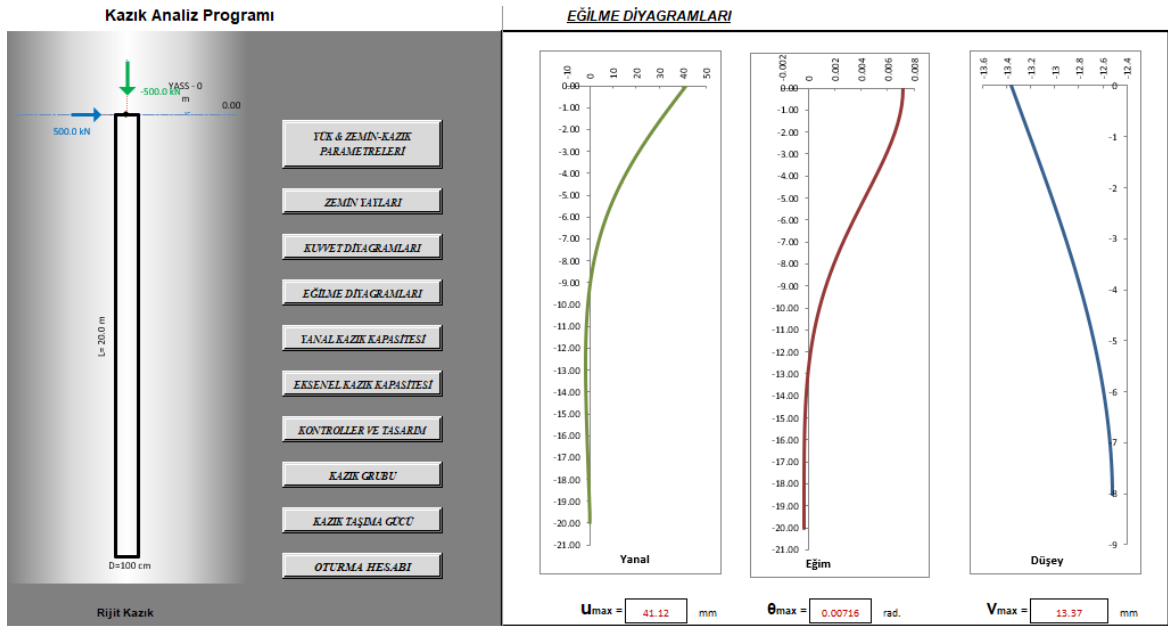
D (m)	1
L (m)	20
A (m^2)	0,79
E (kN/m^2)	$3 \cdot 10^7$
EA (kN)	23561945
EI (kNm^2)	1484893,4
S (m^3)	0,167
ν	0,2

Yükler yatayda $H=500kN$ ve düşeyde $V=500kN$ olmak üzere seçilmiştir.



Şekil 8.79: Kazık programı ile elde edilen kuvvet diyagramları

Sisteme ait eğilme diyagramları Şekil 8.80’de gösterilmektedir.



8.80: Kazık programı ile elde edilen eğilme diyagramları

Analizler sonucunda elde edilen tüm sonuçlar Tablo 8.30’da verilmektedir.

Tablo 8.30: Kazık programı analiz sonuçları tablosu

<i>Maksimum moment (kNm)</i>	1268.98
<i>Maksimum kesme kuvveti (kN)</i>	500,00
<i>Maksimum eksenel kuvvet (kN)</i>	502.01
<i>Yatay deplasman (mm)</i>	41.12
<i>Düşey deplasman (mm)</i>	13.37
<i>Başlık dönme açısı (rad)</i>	0.00716
<i>İzin verilebilir yanal yük (kN)</i>	1537.50
<i>İzin verilebilir moment (kNm)</i>	7771.09
<i>İzin verilebilir düşey yük (kN)</i>	1387.75

8.6 Kohezyonsuz Zeminde Teşkil Edilen Tekil Kazığın Yatay ve Düşey Yük Etkisi Altında Analizi (YASS= 0.00m)

8.6.1 Plaxis İle Analiz

Daha önce kohezyonsuz zeminde yapılan analize ek olarak elastisite modül değeri için daha yüksek bir değer alınmış, yer altı su seviyesi yüzeye yani sıfır noktasına çekilmiş ve poisson oranı 0,35 alınarak çözümler gerçekleştirilmiştir. Tablo 8.31 ve Tablo 8.32’da zemin ve kazık parametreleri kullanılmıştır. Yanal ve düşey yük değeri 500 kN olarak daha önceki analizlerdeki aynı değerler alınmıştır.

Tablo 8.31: Zemin parametreleri

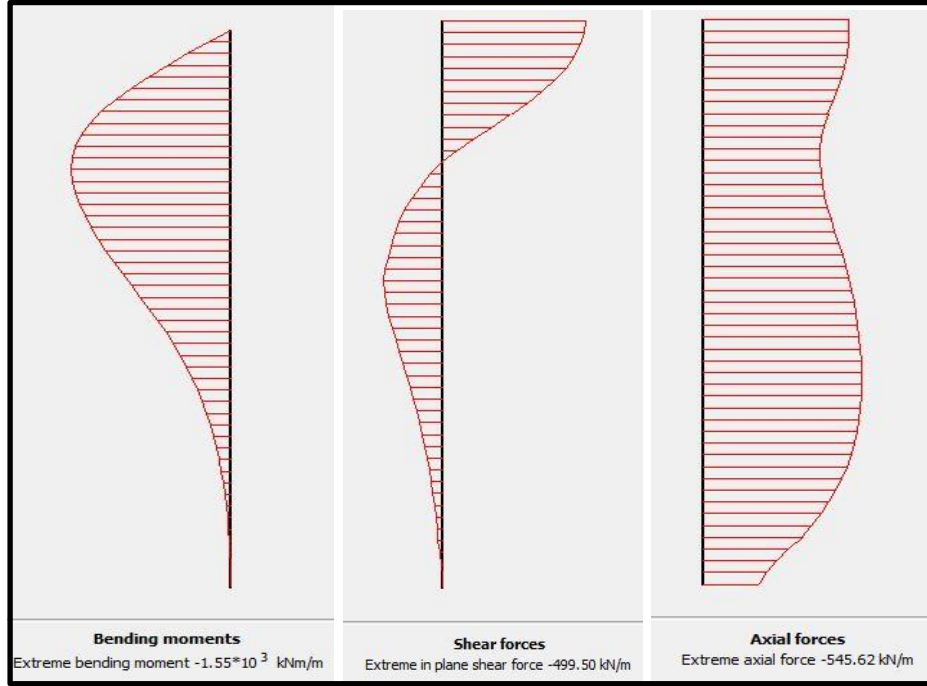
<i>Zemin Cinsi</i>	Kohezyonsuz
<i>Tabaka Kalınlığı (m)</i>	30
<i>γ (kN/m³)</i>	17,3
<i>γ_{sat} (kN/m³)</i>	18,58
<i>γ_{unsat} (kN/m³)</i>	13,9
<i>k_x, k_y (m/s)</i>	10 ⁻⁹
<i>E_{ref} (kN/m²)</i>	50000
<i>G_{ref} (kN/m²)</i>	1.852E+04
<i>ν</i>	0,35
<i>c (kN/m²)</i>	0
<i>ϕ (°)</i>	25

Model-Element	Plane Strain-15 Noded
Model Ölçüleri	X:0;20m, Y:-30;0m
YASS	-0,00 m

Tablo 8.32: Kazık parametreleri

<i>D (m)</i>	1
<i>L (m)</i>	20
<i>A (m²)</i>	0,79
<i>d (m)</i>	0,886
<i>E (kN/m²)</i>	3.10^7
<i>EA (kN)</i>	23561945
<i>EI (kNm²)</i>	1484893,4
<i>W (kN/m)</i>	7,7
<i>v</i>	0,2

Plaxis ile yapılan analizler neticesinde elde edilen kuvvet diyagramları Şekil 8.81’de gösterilmektedir.



Şekil 8.81: Plaxis ile elde edilen kuvvet diyagramları

Analizler sonucunda elde edilen tüm sonuçlar Tablo 8.33’de verilmektedir.

Tablo 8.33: Plaxis analiz sonuçları tablosu

<i>Toplam gerilme</i>	529,43 kN/m ²
<i>Efektif gerilme</i>	529,43 kN/m ²
<i>Ortalama gerilme</i>	321,41 kN/m ²
<i>Düşey deplasman</i>	30,78 x10 ⁻³ m
<i>Yatay deplasman</i>	52,51 x10 ⁻³ m
<i>Maksimum aksenal kuvvet</i>	545,62 kN
<i>Maksimum kesme kuvveti</i>	499,50 kN
<i>Maksimum moment</i>	1,55x10 ³ kNm

8.6.2 Kazık Programı İle Analiz

Kazık programıyla yapılacak analizlerde kullanılan zemin, yük ve kazık parametreleri Tablo 8.34 ve Tablo 8.35’de belirtilmektedir. Analizde elde edilen kuvvet diyagramları verileri Şekil 8.82’de gösterilmektedir.

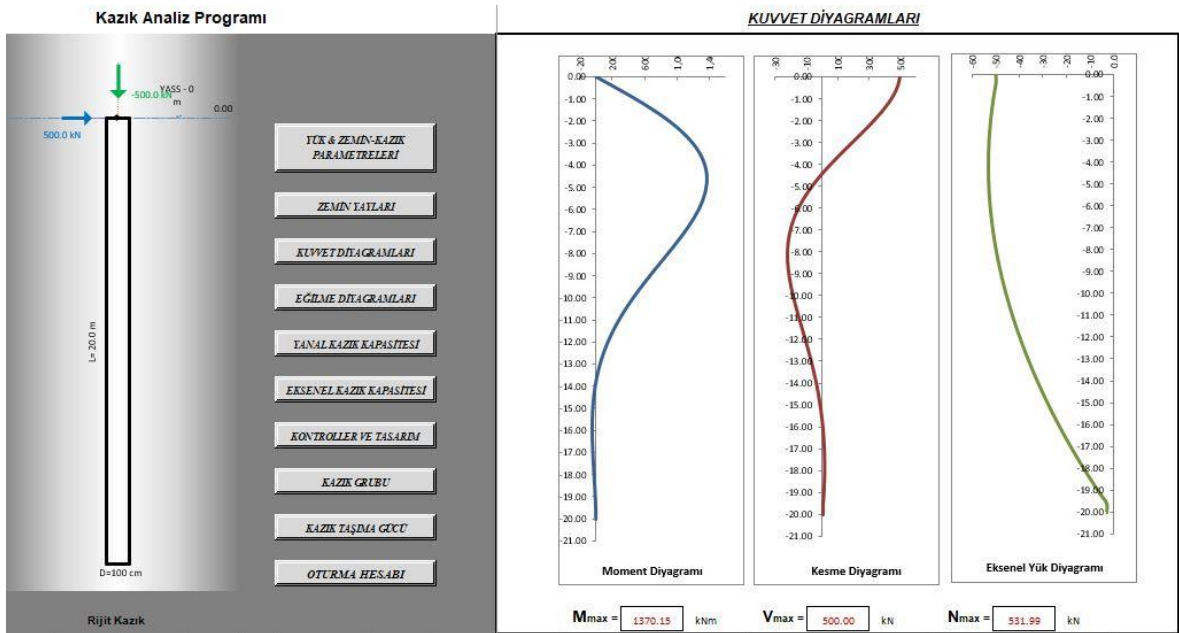
Tablo 8.34: Zemin parametreleri

<i>Zemin Cinsi</i>	Kohezyonsuz
<i>Tabaka Kalınlığı (m)</i>	30
<i>γ (kN/m³)</i>	17,3
<i>\emptyset(°)</i>	25
<i>c (kN/m²)</i>	0
<i>Eref (kN/m²)</i>	55000
<i>α (Adhezyon)</i>	0,5
<i>δ (Sürtünme açısı)</i>	18,8
<i>v</i>	0,35
<i>YASS</i>	0,00m

Tablo 8.35: Kazık parametreleri

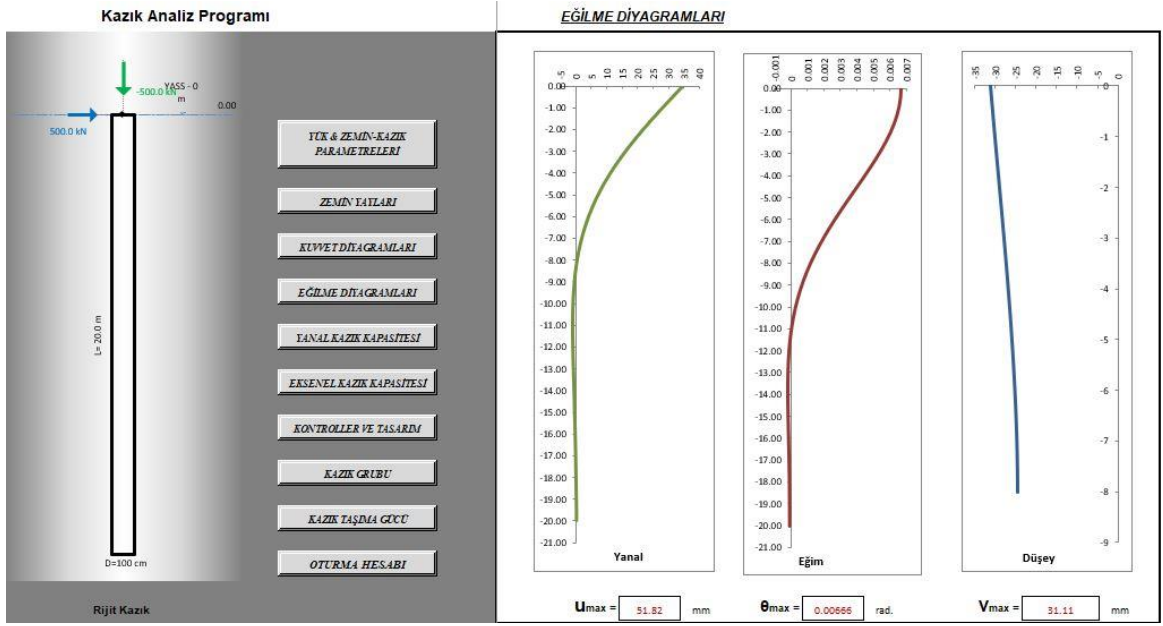
D (m)	1
L (m)	20
A (m ²)	0,79
E (kN/m ²)	$3 \cdot 10^7$
EA (kN)	23561945
EI (kNm ²)	1484893,4
S (m ³)	0,167
ν	0,2

Yükler yatayda $H=500\text{kN}$ ve düşeyde $V=500\text{kN}$ olmak üzere seçilmiştir.



Şekil 8.82: Kazık programı ile elde edilen kuvvet diyagramları

Sisteme ait eğilme diyagramları Şekil 8.83’de gösterilmektedir.



8.83: Kazık programı ile elde edilen eğilme diyagramları

Analizler sonucunda elde edilen tüm sonuçlar Tablo 8.36’da verilmektedir.

Tablo 8.36: Kazık programı analiz sonuçları tablosu

Maksimum moment (kNm)	1370.15
Maksimum kesme kuvveti (kN)	500.00
Maksimum aksenal kuvvet (kN)	531.99
Yatay deplasman (mm)	51.82
Düşey deplasman (mm)	31.11
Başlık dönme açısı (rad)	0.00666
İzin verilebilir yanal yük (kN)	1177.21
İzin verilebilir moment (kNm)	4166.67
İzin verilebilir düşey yük (kN)	1670.67

8.7 Kazık Grubu Analizi

Yapılan grup analizi için plandaki yerleşimi 4x4 olmak üzere toplam 16 adet boyu $L=25\text{m}$, çap $D=100\text{cm}$ kazık kullanılmıştır. Kazıklar arası merkezden merkeze olan mesafe $s=3\text{m}$ olarak seçilmiştir. Kohezyonlu ve kohezyonsuz zeminde yapılan her iki analizde de bir kazığa $V=500\text{kN}$ olacak şekilde yük etki etmektedir. Oluşturulan model sonlu elemanlar ve kazık analiz programı ile analiz edilmiş, analizlerde ortak yük, zemin ve kazık parametreleri kullanılmıştır. İdealize edilmiş sistem modeli Şekil 8.84’de gösterilmektedir. Kullanılan parametreler Tablo 8.37, Tablo 8.38 ve Tablo 8.39’da belirtilmektedir.

Tablo 8.37: Kazık grubu hesaplamalarında kullanılan kazık parametreleri

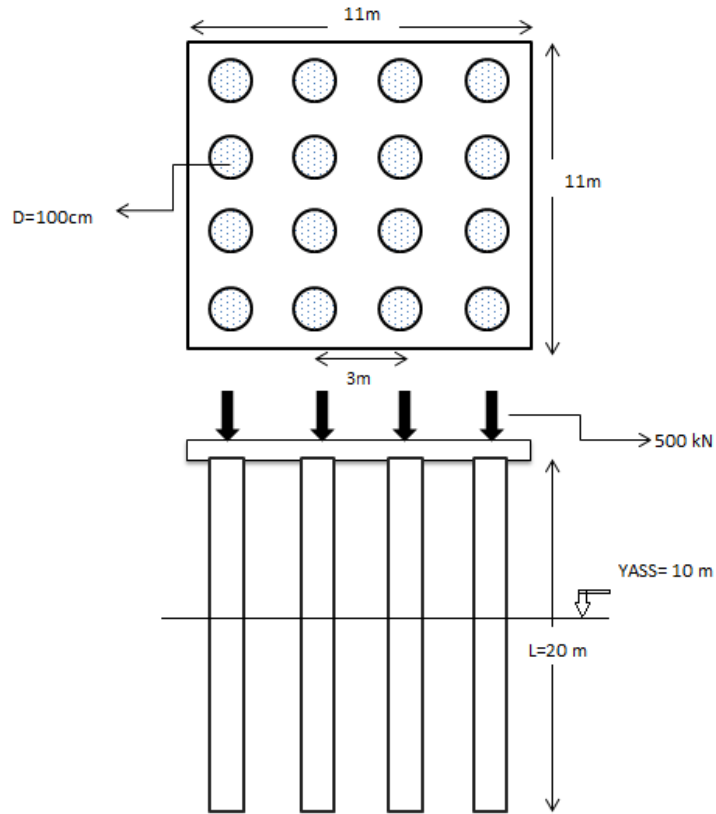
<i>Kazık boyu</i>	20m
<i>Kazık çapı</i>	100cm
<i>Kazık eksenleri arası mesafe</i>	3m
<i>A (m²)</i>	0,79
<i>E_{kazık} (kN/m²)</i>	$3 \cdot 10^7$
<i>EA_{kazık} (kN)</i>	23561945
<i>EI_{kazık} (kNm²)</i>	1484893,4
<i>W_{kazık} (kN/m)</i>	7,7
<i>v_{kazık}</i>	0,2

Tablo 8.38: Kazık grubu hesaplamalarında kullanılan radye plak parametreleri

<i>Radye Boyutları</i>	11m x 11m x 1m
<i>A (m²)</i>	11m ²
<i>E_{radye} (kN/m²)</i>	$3 \cdot 10^7$
<i>EA_{radye} (kN)</i>	$33 \cdot 10^7$
<i>EI_{radye} (kNm²)</i>	$2,75 \cdot 10^7$
<i>W_{radye} (kN/m)</i>	25
<i>v_{radye}</i>	0,2

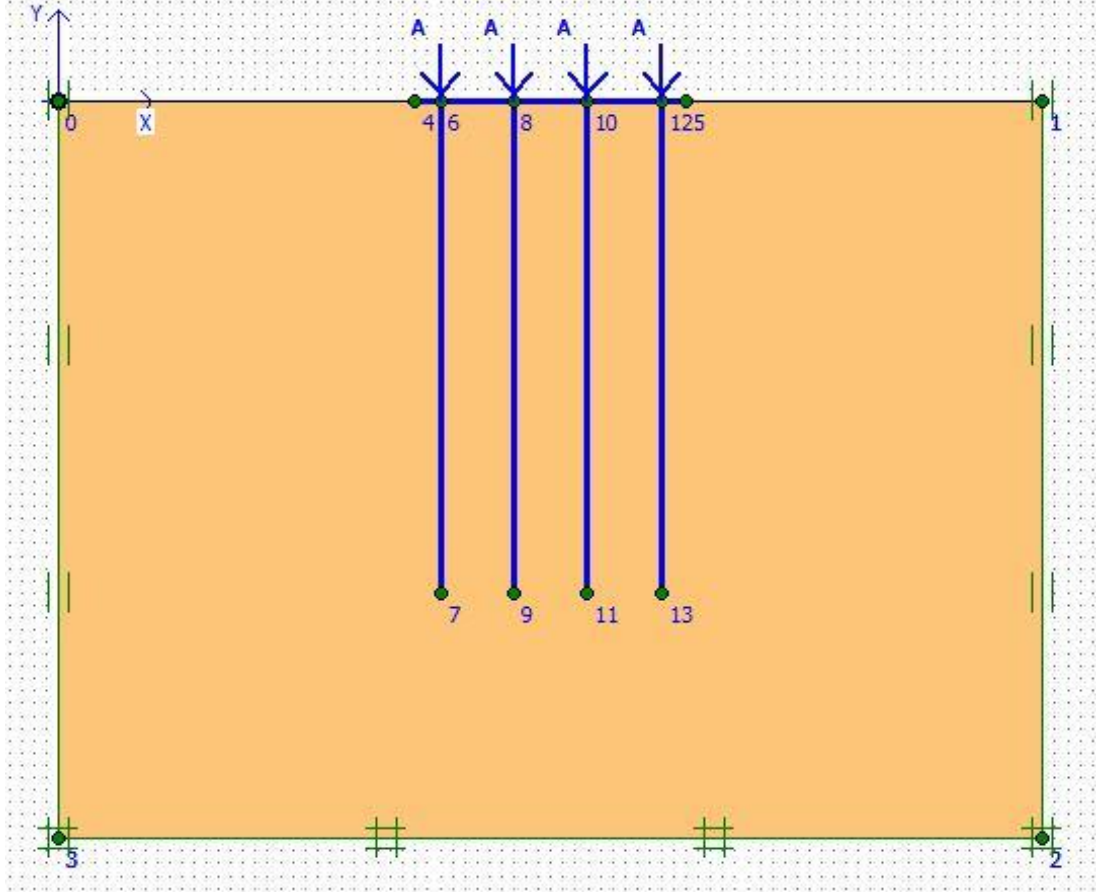
Tablo 8.39: Kazık grubu hesaplamalarında kullanılan zemin parametreleri

Tabaka Kalınlığı (m)	30
γ (kN/m ³)	17,3
γ_{sat} (kN/m ³)	18,58
γ_{unsat} (kN/m ³)	13,9
k_x, k_y (m/s)	10 ⁻⁹
Eref (kN/m²)	11000
Gref (kN/m²)	4074,074
ν	0,35
c (kN/m ²)	10
ϕ (°)	25
a (Adhezyon)	0,5
δ (Sürtünme açısı)	18,8
Model-Element	Plane Strain-15 Noded
Model Ölçüleri	X:0;30m, Y:-40;0m
YASS	-10m



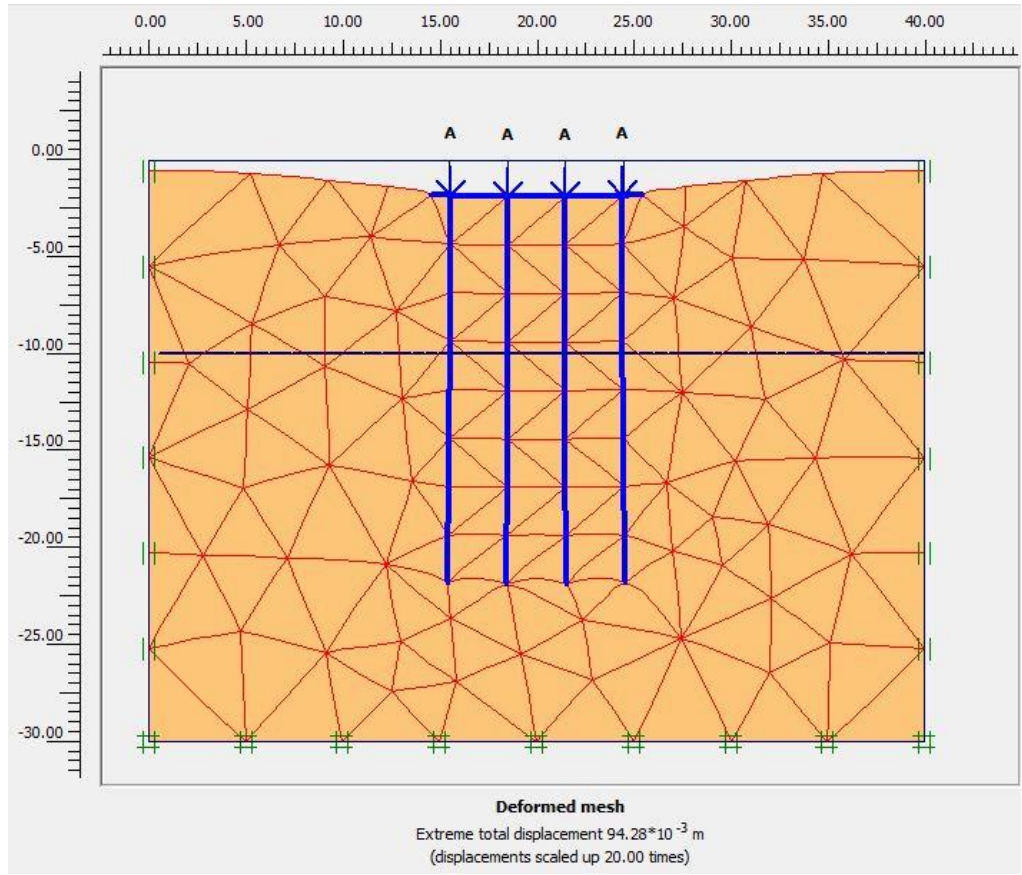
Şekil 8.84: Kazık programı yanal kazık taşıma kapasitesi ve deplasman miktarları

8.7.1.1 Plaxis İle Analiz

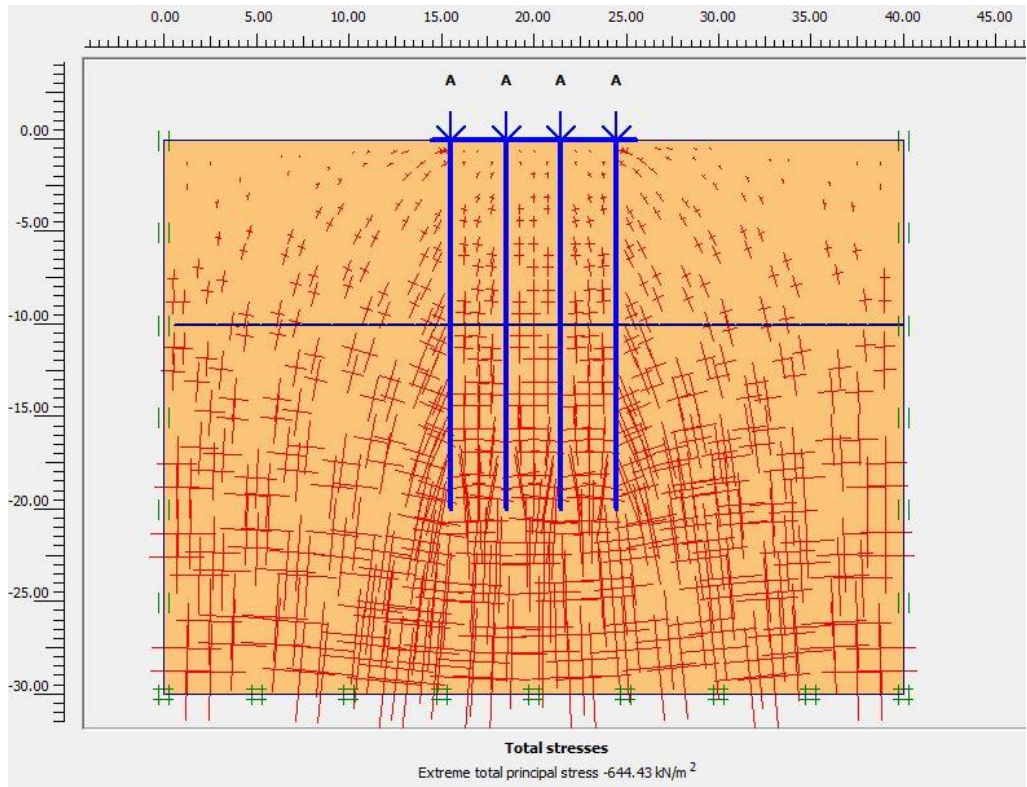


Şekil 8.85: Kazık grubuna ait sistem modeli

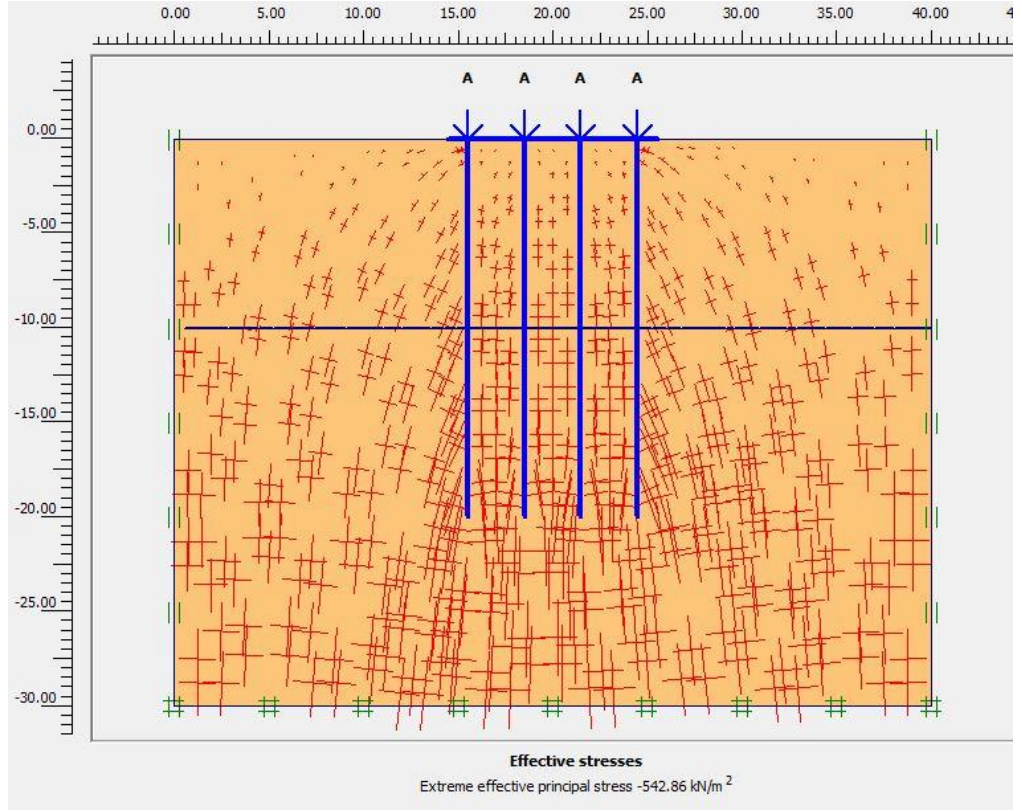
Analiz için seçilen parametreler ile sonlu elemanlar sistem modeli oluşturulmuş (Şekil 8.85) ve analizler gerçekleştirilmiştir. Sistemin uygulanan yükler altında deforme olmuş hali Şekil 8.86'de gösterilmektedir. Analiz sonucunda kazık grubunda meydana gelen deformasyon ve gerilme dağılımları elde edilmiştir. Elde edilen analiz sonuçları özet halinde Tablo 8.40'da sunulmaktadır.



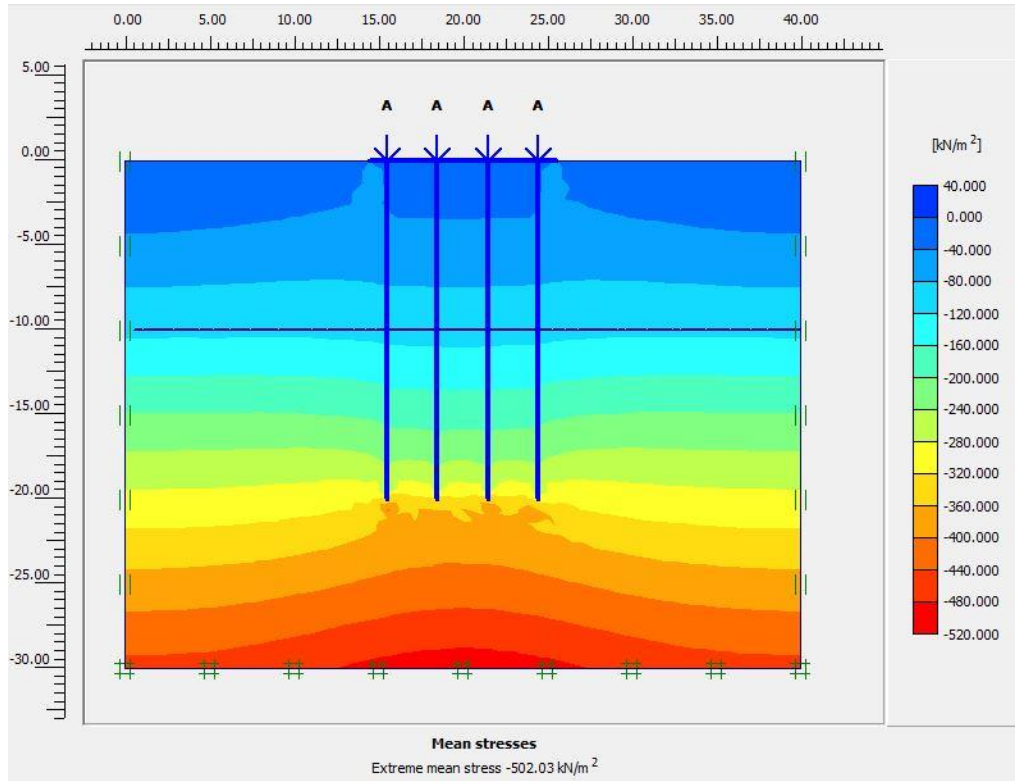
Şekil 8.86: Plaxis 2D kazık grubuna ait deforme mesh ağı



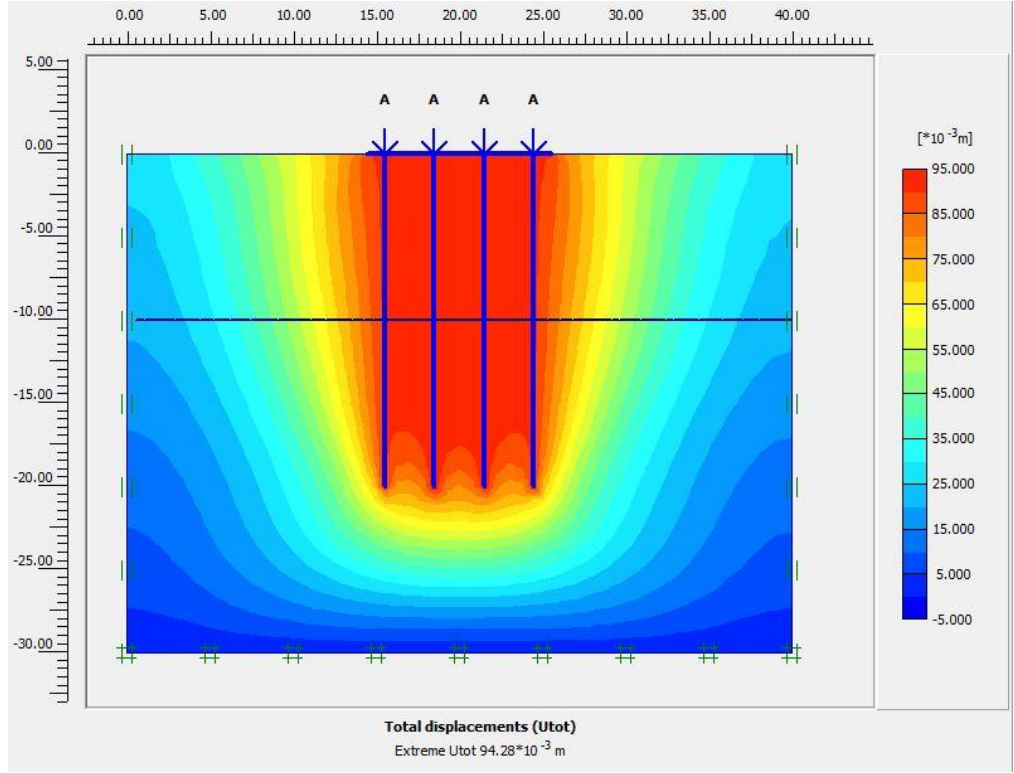
Şekil 8.87: Plaxis 2D toplam gerilme miktarı



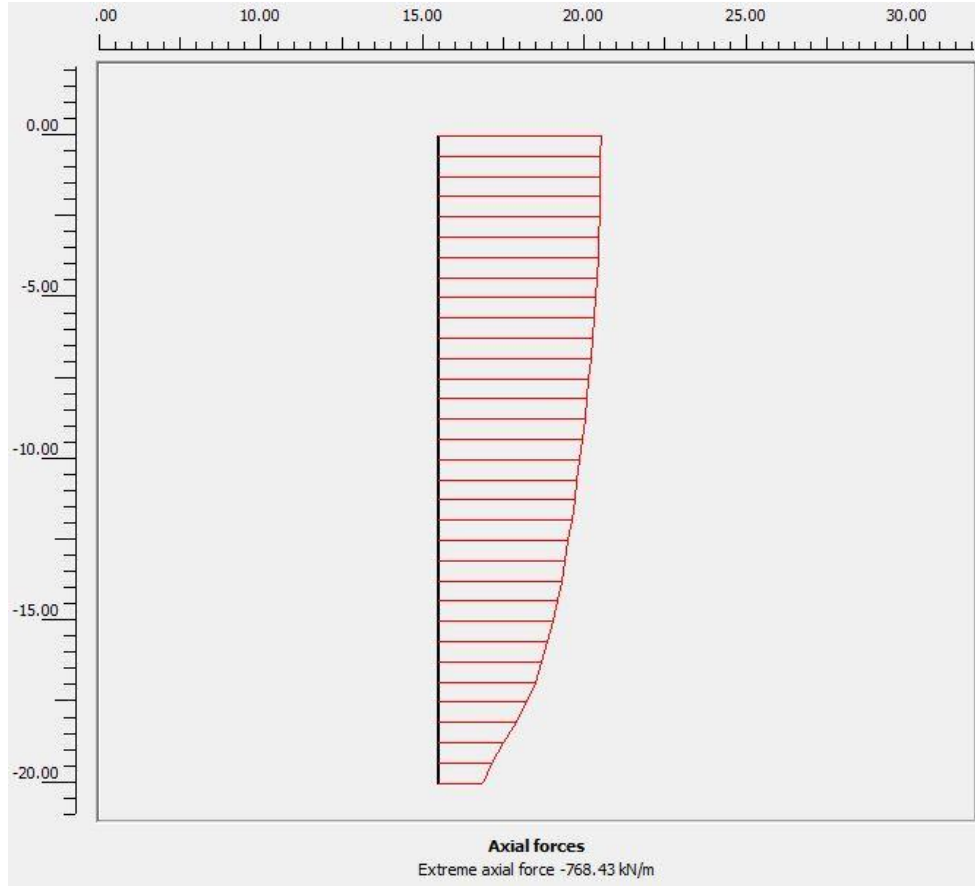
Şekil 8.88: Plaxis 2D efektif gerilme miktarı



Şekil 8.89: Plaxis 2D ortalama gerilme miktarı ve dağılımı



Şekil 8.90: Plaxis 2D kazık grubunda meydana gelen maksimum deformasyon



Şekil 8.91: Plaxis 2D kazık grubundaki bir kazıkta oluşan maksimum eksenel kuvvet ve diyagramı

Tablo 8.40: Plaxis analiz sonuçları

Toplam gerilme	644,43 kN/m ²
Efektif gerilme	542,86 kN/m ²
Ortalama gerilme	502,03 kN/m ²
Maksimum deplasman	94,28 x10 ⁻³ m
Maksimum eksenel kuvvet	768,43 kN

8.7.1.2 Kazık Programı İle Analiz

Sonlu elemanlar analizinde kullanılan parametrelerle aynı şekilde kazık programı ile hesaplamalar gerçekleştirilmiştir.

Kazık Analiz Programı

YÜK & ZEMİN-KAZIK PARAMETRELERİ

Zemin Parametreleri :

γs = 17,3 kN/m³

c' (su) = 10,0 kN/m²

φ = 25,0 deg

α = 0,5

δ = 18,8 deg

V zemin = 0,35

E zemin = 11 N/mm²

YASS = -10,0 m

Kazık Boyutları :

L = 20,0 m

D = 100 cm

Yükler :

→ H = 0,0 kN

↓ V = -500,0 kN

↻ M = 0,0 kNm

Wp = -392,7 kN

Beton :

γc = 25 kN/m³

f'c = 25 N/mm²

Paspayı = 50 mm

Kazık Parametreleri :

Ks = 0,577

Ka = 0,406

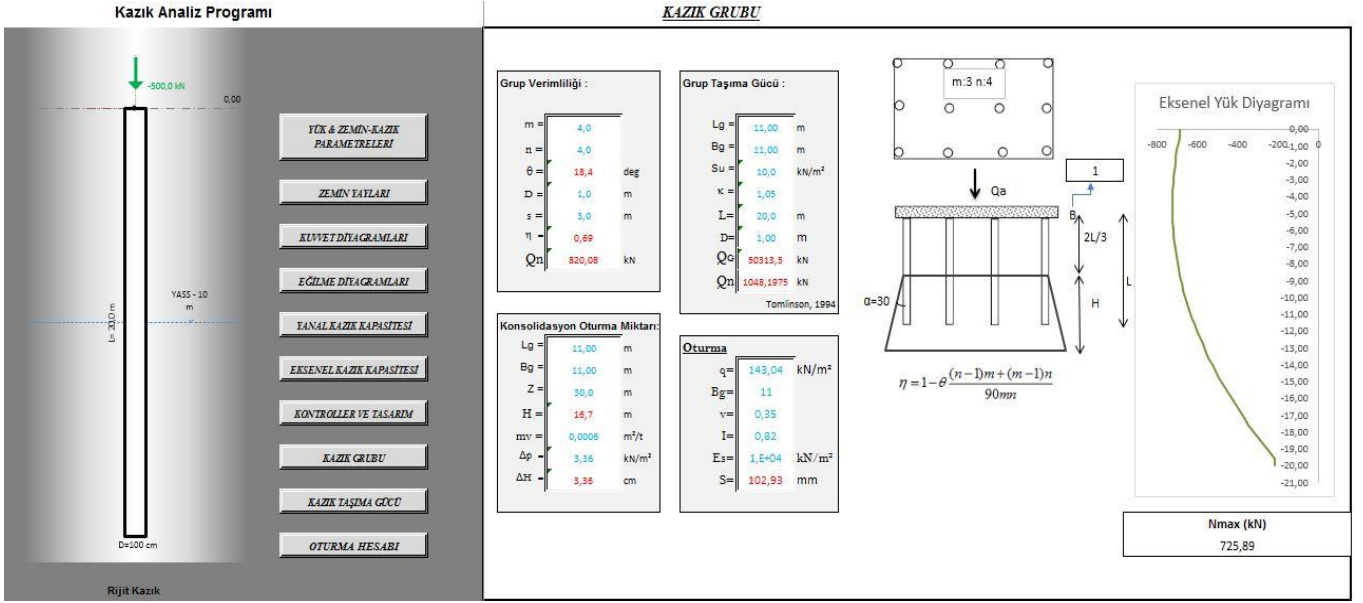
Rp = 2,464

Çelik :

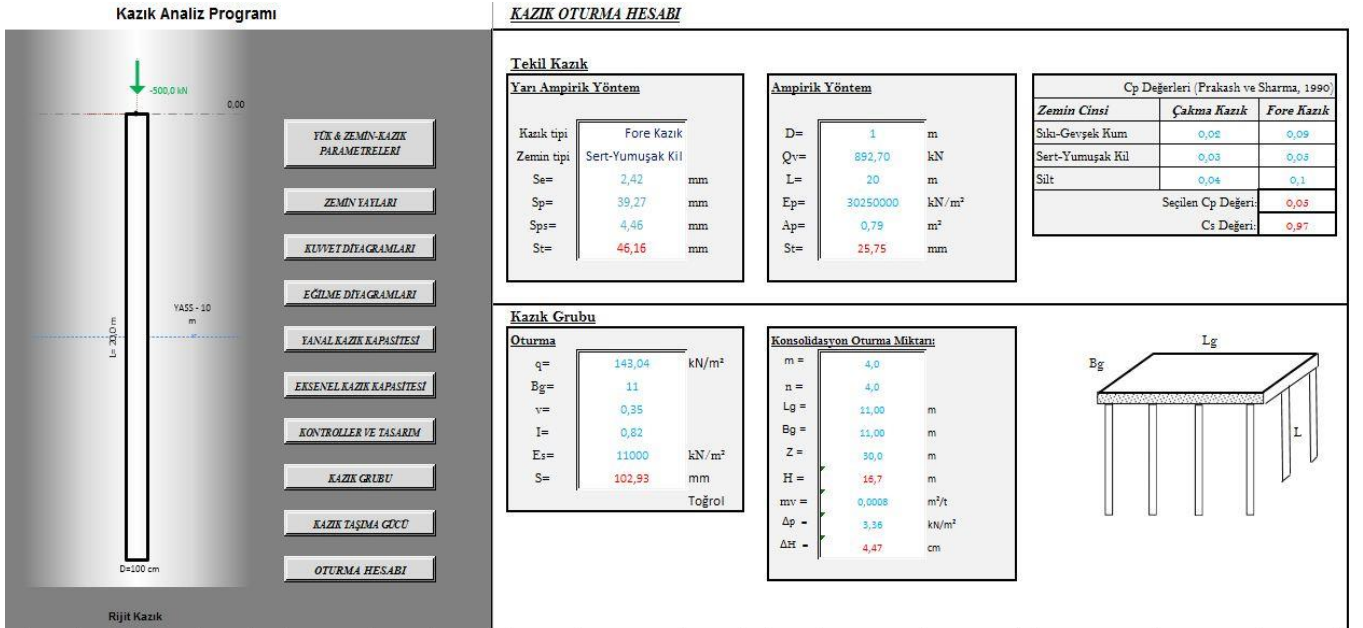
f_{yd} = 365000 kN/m²

E_s = 2,10E+08 kN/m²

Şekil 8.92: Kazık analiz programı yük, zemin ve kazık parametrelerinin tayini



Şekil 8.93: Kazık analiz programı grup taşıma gücü hesaplamaları



Şekil 8.94: Kazık analiz programı oturma hesaplamaları

Elde edilen analiz sonuçları Tablo 8.41'de özet olarak sunulmaktadır.

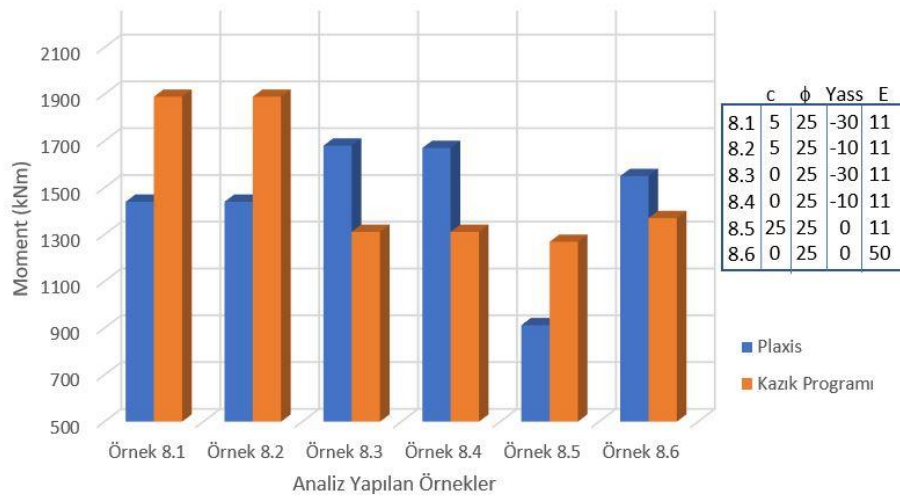
Tablo 8.41: Kazık programı analiz sonuçları

Gruptaki bir kazık için nihai taşıma gücü	820,08 kN
Grup taşıma gücü	50313,5 kN
Kazık grubunda oluşan oturma miktarı	102,93 mm
Maksimum eksenel yük	725,89 kN

8.8 Analiz Sonuçlarının Karşılaştırılması

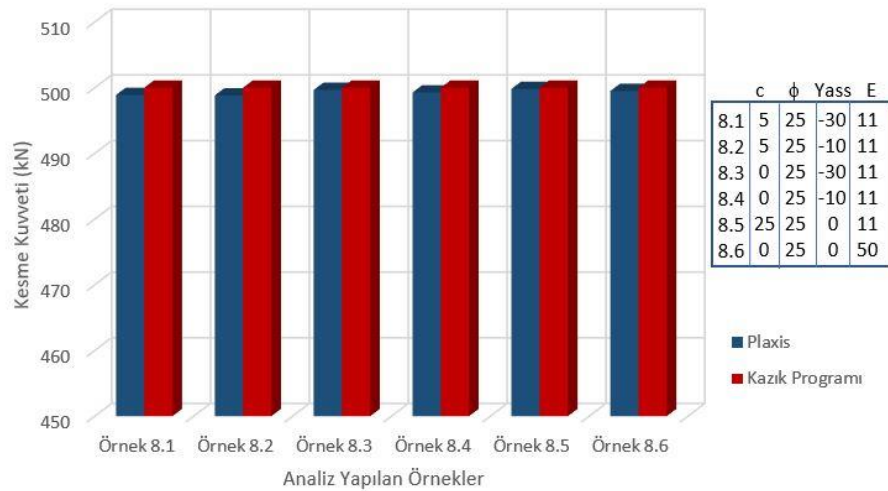
Yapılan analizlerin karşılaştırmasını daha sağlıklı yapabilmek adına elde edilen analiz sonuçlarına bu bölümde yer verilmiştir. Kıyaslamalar, her bir bölümde edilen orta veriler üzerinden yapılmış olup, elde edilmiş değerler bölüm numaralarına atıf yapılarak değerlendirilmiştir.

Şekil 8.95’de analizler sonucunda her bir bölümde elde edilmiş olan maksimum moment değerleri bir arada sunulmuştur.



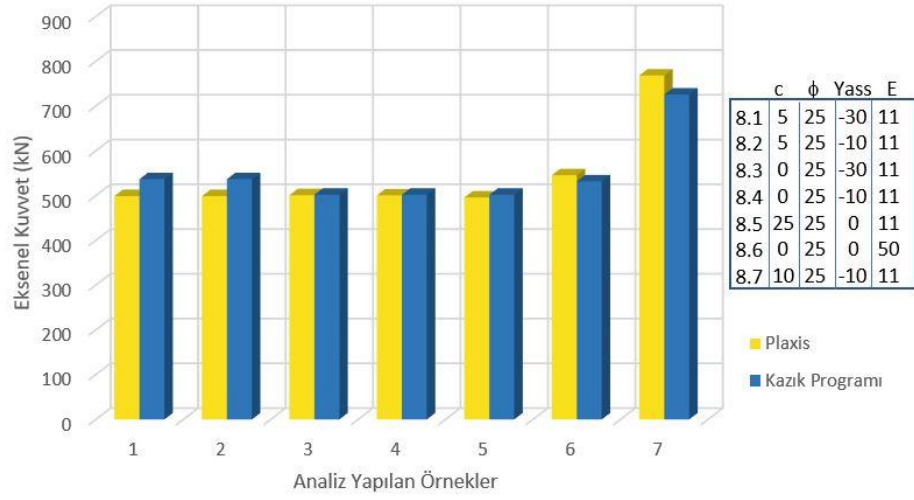
Şekil 8.95: Maksimum moment değerlerinin karşılaştırılması

Şekil 8.96’da analizler sonucunda her bir bölümde elde edilmiş olan maksimum kesme kuvveti değerleri bir arada sunulmuştur.



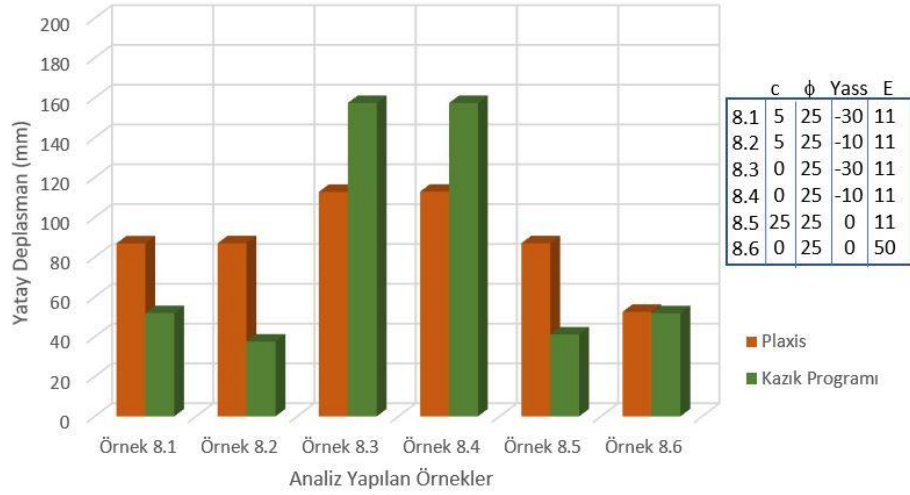
Şekil 8.96: Maksimum kesme kuvveti değerlerinin karşılaştırılması

Şekil 8.97’de analizler sonucunda elde edilen eksenel kuvvetlerinin karşılaştırma grafikleri verilmektedir.



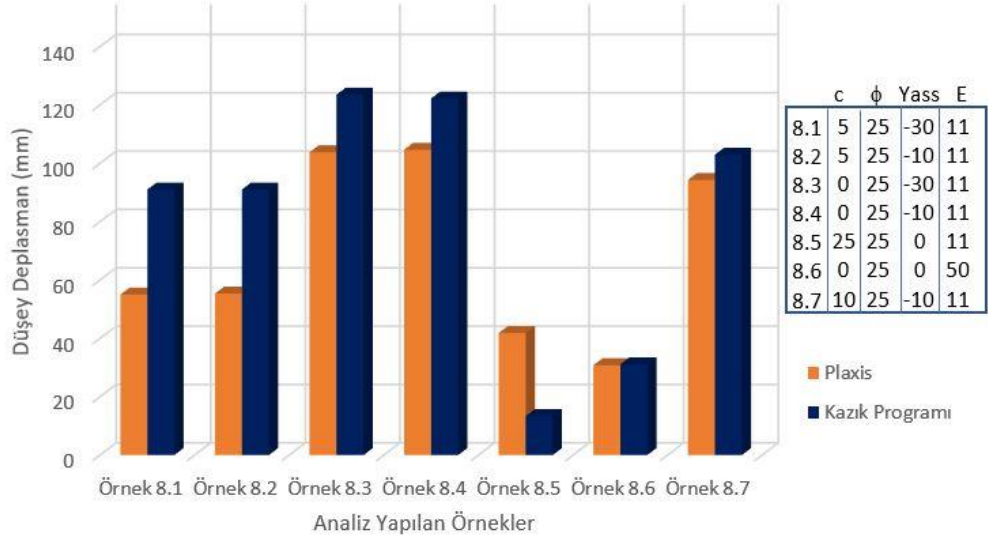
Şekil 8.97: Maksimum eksenel kuvvet değerlerinin karşılaştırılması

Şekil 8.98’de elde edilen yatay deplasman değerlerinin karşılaştırma grafiği verilmektedir.



Şekil 8.98: Yatay deplasman değerlerinin karşılaştırılması

Şekil 8.99’de elde edilen düşey deplasman değerlerinin karşılaştırma grafiği verilmektedir.



Şekil 8.99: Düşey deplasman değerlerinin karşılaştırılması

Yapılan analizler neticesinde elde edilen sonuçların grafik halinde karşılaştırılması yapılmıştır. Sonlu elemanlar analizi ve kazık programı ile yapılan sonuçlar ayrıca Tablo 8.42’de derlenmiştir.

Tablo 8.42: Analizlerde elde edilen veriler özet tablosu

	Kesme Kuvveti (kN)		Moment (kNm)		Yatay Deplasman (mm)		Eksenel Kuvvet (kN)		Düşey Deplasman (mm)	
	Plaxis	Kazık Programı	Plaxis	Kazık Programı	Plaxis	Kazık Programı	Plaxis	Kazık Programı	Plaxis	Kazık Programı
Bölüm 8.1	498.89	500	1440	1889.05	86.85	51.89	499.09	536.83	55	91
Bölüm 8.2	498.83	500	1440	1889.05	86.96	37.57	499.07	536.83	55.36	91
Bölüm 8.3	499.66	500	1680	1311.48	112.76	157.41	501.04	502.14	103.78	123.52
Bölüm 8.4	499.28	500	1670	1311.48	112.89	157.41	500.61	502.14	104.64	122.19
Bölüm 8.5	499.82	500	912.55	1268.98	86.96	41.12	495.99	502.01	41.83	13.37
Bölüm 8.6	499.5	500	1550	1370.15	52.51	51.82	545.62	531.99	30.78	31.11
Bölüm 8.7	-	-	-	-	-	-	768.43	725.89	94.28	102.93

9. SONUÇ VE ÖNERİLER

Günümüzde sürekli olarak gelişme gösteren teknoloji ile birlikte mühendislik teknolojisinde yaşanan gelişmelerde artmakta ve bizlere istenilen kriterlerde mühendislik çözümleri elde etmemizde yardımcı olmaktadır. Karşılaşılan zemin problemlerinin çözümünde kazıklı temel sistemleri giderek yaygın bir hal almaktadır. Artan kazık kullanımı ile birlikte kullanılan kazık sistemlerinin ekonomik ve güvenli olması da de büyük ölçüde önem arz etmektedir. Optimum tasarım kriterlerini sağlamak amacıyla birçok sayısal modelleme yöntemi bulunmaktadır. Yapılan tez çalışmasında, düşey ve yatay yük etkisi altındaki tekil bir kazık ve kazık grubunun analizinde, sayısal modelleme yöntemlerinden biri olan sonlu elemanlar yöntemi ile birlikte analitik hesap yöntemlerine dayanılarak geliştirilen kazık analiz programı kullanılmaktadır.

Farklı koşullar altındaki bir kazığın veya kazık grubunun, gerilme, deformasyon ve taşıma gücü hesaplamalarını yapmak amacıyla analitik hesap yöntemlerine dayanan bir kazık analiz programı geliştirilmiştir.

Aynı zemin ve kazık parametreleri ile sonlu elemanlar modeli oluşturularak yapılan hesaplamalarda elde edilen sonuçların kıyaslanması amacıyla, sonlu elemanlar programı Plaxis 2D ile sistem modellemesi yapılmış ve iki analiz sonucunda elde edilen verilerin kıyaslaması yapılmıştır.

Yapılan analizler neticesinde, aynı koşullar altında bir kazık veya kazık grubuna ait kuvvet diyagramlarının ve deformasyon değerlerinin her iki program ile elde edilen veriler doğrultusunda benzerlik gösterdiği görülmüştür. Verilerin karşılaştırması yapıldıktan sonra sonuçlar arasında % 5-10 mertebesinde benzerlik görülmüştür. Elde edilen deformasyon ve kuvvet diyagramları, analitik hesap yöntemlerinde yapılan belli varsayımları da göz önünde bulundurduğumuz takdirde yapılacak hesaplamalarda büyük kolaylık sağlayacaktır.

Sonlu eleman programları ile yapılan analizler sonucu kazık sistemlerinde meydana gelecek deformasyonlar kabul edilebilir bir doğrulukla tahmin edilebilmektedir.

Model parametreleri belirlenirken laboratuvar ve arazi deneylerinin yanı sıra lokal korelasyonlardan da faydalanılmalı, bu verilerin yetersiz olması durumunda literatürdeki çalışmalar baz alınmalıdır.

Deformasyonların doğru tahmini ancak seçilen zemin modeli, zemin modeline ait deformasyon parametreleri ve zemin dayanım parametrelerinin doğru seçimi ile mümkündür.

Kazık ve zemin etkileşimini gerçeğe daha yakın biçimde aktarma konusunda elastisite kavramının önemi tartışılmazdır. Bu bağlamda geliştirilen program ile gerçekleştirilen analizlerde elastisite modülü farklılıklarında sonuçların gerçeğe yakınlık derecesi araştırılmış ve elde edilen sonuçların tatmin edici düzeyde olduğu kanaatine varılmıştır.

Öte yandan farklı temel zemin mekaniği parametreleriyle gerçekleştirilen hesaplamalarda, taşıma gücü değerlerinin doğruluğu gözlemlenmiş, değişken parametrelerle yapılacak çözümlerde büyük kolaylık sağlayacağı sonucuna varılmıştır.

Yapılan tez çalışması ile beraber kazık uygulamalarında pratik çözümler üretmek, yapılan belli kabuller ile hesaplamalardaki karmaşıklığın önüne geçmek, yapılan hesaplamaların kontrol edilebilirliğini sağlamak ve sisteme ait gerilme deformasyon davranışını gerçeğe en yakın şekilde yansıtılabilmek amaçlanmaktadır.

Hazırlanan program tekil bir kazığın ve kazık grubunun modellenmesi, analizi ve tasarımı konularında pratiklik ve kolaylık sağlamakla beraber üzerinde yapılacak geliştirmeler ile daha kapsamlı hesaplamalar yapabilmemize imkan sağlamaktadır. Ayrıca bundan sonra yapılacak çalışmalara temel niteliği taşımaktadır.

10. KAYNAKLAR

Bildik, S., Uncuoğlu, E., Laman, M., Suleiman, M.T., “Yüzeysel Temellerin Sayısal Modellemesinde Zemin Parametrelerinin Etkisi”, ZMTM 14. Ulusal Kongresi, SDÜ, Isparta, (2012).

Birand, A. A., *Kazıklı Temeller*, Ankara, Teknik Yayınevi, (2007).

Bowles, J. E., *Foundation Analysis and Design*, 5th ed., The McGraw-Hill Companies, Inc., (1996).

Bolin, H. W., "The pile efficiency formula of the Uniform Building Code." *Bldg. Standards Monthly*, 10(1), (1941).

Burland, J. B., Shaft friction of piles in clay - A simple fundamental approach,, *Ground Engineering* 6(3), London, (1973).

Broms, B. B., “Lateral Resistance of Piles in Cohesive Soils”, *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, Vol. 90(Issue 2-3), 27-158, (1964).

Broms, B., B., Pile foundation-pile groups, Proc. 6th European Conference of SMFE, Vienna, Austria, (1976).

Çatal, H. H., *Yapı ve Deprem Mühendisliğinde Matris Yöntemler*, İzmir: Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Yayınları, No:294, (2014).

Çinicioğlu, S.F., “Zeminlerde Statik ve Dinamik Yükler Altında Taşıma Gücü Anlayışı ve Hesabı”, İmo İstanbul Seminer, İstanbul, (2005).

Coduto, D., P., “Temel Tasarımı:İlkeler ve Uygulamalar”, 2.Baskı Gazi Kitabevi, Ankara, (2005).

Dal, K., Örnek, M., Türedi, Y., “Donatılı Zemine Oturan Kare Kesitli Temelerde Eksantrisite Etkisinin Araştırılması”, *6.Geoteknik Sempozyumu*, Çukurova Üniversitesi, Adana, (2015).

Davisson, M. T., “Lateral Load Capacity of Piles”, *49th Annual Meeting of the Highway Research Board*, Washington District of Columbia, Issue 333, 104-112, (1970).

Duncan, J. M., Ooi, P. S. K., “Lateral Load Analysis of Groups of Piles and Drilled Shafts”, *Journal of Geotechnical Engineering*, Vol.120 (Issue 6), (1994).

Drnevich, V. P., Hardin, B.O., “Shear Modulus and Damping in Soils: Design Equations and Curves”, *Journal of Soil Mechanics & Foundations Division*, Vol.98 (Issue Sm7), (1972).

H. G. Poulos, E. H. Davis, “Pile Foundation Analysis and Design”, Wiley, (1980).

Gajan, S., Seneviratne N., Kanagalingam, T., Ananthanathan, P.J., “Behavior of Laterally Loaded Piles”, *Engineering Jubilee Congress*, Vol.1, Sri Lanka, (2000).

Kumbasar, V., Kip, F., *Zemin Mekaniği Problemleri*, İstanbul, Çağlayan Kitabevi, (1999).

Kulhawy, F.H. & Jackson, C.S., Some observations of undrained side resistance of drilled shaft, *Foundation Engineering: Current Principles and Practises*, ASCE, 1011–1025, (1989).

Kulhawy, F.H., “Limiting Tip and Side Resistance, Fact or Fallacy”, *Proc. Symposium on Analysis and Design of Pile Foundations*, ASCE, San Francisco, (1984).

Matlock, H., Reese, L.C., “Generalized Solutions for Laterally Loaded Piles”, *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, Vol. 86 (Issue 5), (1960).

Mazak, E., “Kazık Davranışının İki ve Üç Boyutlu Olarak Araştırılması”, Yüksek Lisans Tezi, Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Kocaeli, (2016).

Meyerhof, G., G., “Penetration tests and bearing capacity of piles in cohesionless soils”, *Proceedings of ASCE, Journal of SMFE*, Vol.82, No. SM.1, (1956).

Mayerhof, G.G., “Bearing Capacity and Settlement of Pile Foundations”, *Journal of Geotech. Eng. Div.*, ASCE, Vol.102, No.GT3, (1976).

Reese, L. C., Wang, S.T., "Laterally Loaded Pile Analysis Program For The Microcomputer, Version 2.0. Final Report", *Federal Highway Administration*, TX United States, (1993).

Stas, C.V. and Kulhawy, F.H., "Critical evaluation of design methods for foundations under axial uplift and compression loading", Report EL-3771, Electric Power Research Institute, Palo Alto, CA, (1984).

Terzaghi, K., “Theoretical Soil Mechanics”, *John Wiley and Sons*, New York: (1943).

Terzaghi, K., “Evaluation of Coefficients of Subgrade Reaction”, *Geotechnique*, Vol.5 (Issue 4), (1955).

Terzaghi, K., ve Peck, R., *Soil Mechanics in Engineering Practice*. 2nd Edition, John Wiley, New York, (1967).

Toğrol, E. ve Tan, O., *Kazıklı Temeller*, İstanbul: Birsen Yayınevi, (2009).

Toğrol, E. ve Gök, S., “Basitleştirilmiş Kazıklı Radye Hesabı”, İTÜ Mühendislik Dergisi, Cilt 8, Sayı 5, İstanbul, (2009).

Tomlinson, M. J. ve Woodward, J., *Pile Design and Construction Practice*, 5th Ed, New York: Taylor & Francis Group (2008).

Tomlinson, M., J. ve Boorman, R., “*Foundation design and construction M.J. Tomlinson ; with contributions by R. Boorman*”, 7th ed., Upper Saddle River, NJ Prentice Hall, (2001)

Tomlinson, M.J., *Pile Design and Construction Practice*, 4th Ed, E & FN SPON, (1994).

Vesic, A., S., “Beams on elastic subgrade and Winkler’s hypothesis”, Proc. 5 th. Int. Conf. on Soil Mech. Found.Engrg., Paris, (1961).

Vesic, A., S., “Bearing capacity of shallow foundations” *Foundation Engineering Handbook*, Winterkorn and Fang eds., Van Nostrand Reinhold, (1975).

Vesic, A., S., Behaviour of pile groups, *Proceedings, 10th ICSMFE*, Stockholm, Sweden, Volume 4, (1981).

Vijayvergiya, V., N., Focht, J., A., A new way to predict the capacity of piles in clay. In: *Proceedings of the 4th annual offshore technology conference*, Houston, (1972).

Yağcı, B., “Yüzeysel Temellerin Sayısal Analizinde Zemin Özelliklerindeki Değişimin Etkisi”, *Türkiye Mühendislik Haberleri*, 59/2014-3, (2014).

Zhang H., Small J.C., "Analysis of Axially and Laterally Loaded Pile Groups Embedded in Layered Soils", 8th Australia - New Zealand Conference on Geomechanics, Volume: 1, Hobart, Tasmania, (1999).

11. ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Celal Ünal
Doğum Yeri ve Tarihi : Sivas 23/06/1993
Lisans Üniversite : Pamukkale Üniversitesi İnşaat Mühendisliği
Elektronik posta : celalunal58@gmail.com
İletişim Adresi : Körfez mh. 5041. sk. No:5/3 Atakum/Samsun