



**T.C.
İSTANBUL ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**



YÜKSEK LİSANS TEZİ

GÜNEŞ PANELLERİNDE KULLANILAN HELİSEL KAZIKLARIN TASARIMINDA SAYISAL YAKLAŞIMLARIN ETKİSİ

Burcu ÖZBAŞARAN

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

İnşaat Mühendisliği Programı

**DANIŞMAN
Doç. Dr. M. Kubilay KELEŞOĞLU**

Haziran, 2018

İSTANBUL



**T.C.
İSTANBUL ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**



YÜKSEK LİSANS TEZİ

**GÜNEŞ PANELLERİNDE KULLANILAN HELİSEL KAZIKLARIN
TASARIMINDA SAYISAL YAKLAŞIMLARIN ETKİSİ**

Burcu ÖZBAŞARAN

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

İnşaat Mühendisliği Programı

DANIŞMAN

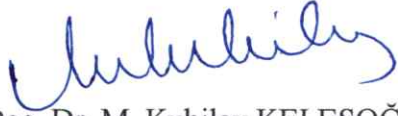
Doç. Dr. M. Kubilay KELEŞOĞLU

Haziran, 2018

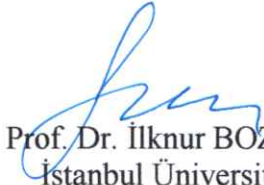
İSTANBUL

Bu çalışma, 8.06.2016 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, İnşaat Mühendisliği Programında Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

Tez Jürisi



Doç. Dr. M. Kubilay KELEŞOĞLU
(Danışman)
İstanbul Üniversitesi
Mühendislik Fakültesi



Prof. Dr. İlknur BOZBEY
İstanbul Üniversitesi
Mühendislik Fakültesi



Doç. Dr. Sadık ÖZTOPRAK
İstanbul Üniversitesi
Mühendislik Fakültesi



Prof. Dr. Aykut ŞENOL
İstanbul Teknik Üniversitesi
İnşaat Fakültesi



Doç. Dr. İsmail Hakkı AKSOY
İstanbul Teknik Üniversitesi
İnşaat Fakültesi



20.04.2016 tarihli Resmi Gazete’de yayımlanan Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliğinin 9/2 ve 22/2 maddeleri gereğince; Bu Lisansüstü teze, İstanbul Üniversitesi’nin abonesi olduğu intihal yazılım programı kullanılarak Fen Bilimleri Enstitüsü’nün belirlemiş olduğu ölçütlere uygun rapor alınmıştır.

ÖNSÖZ

İnsanın başarıya ancak istediği alanda, sevdiği ve saygı duyduğu insanlarla çalışarak erişebildiğine inanırım. İşte ben tam da böyle bir akademik ortamda, ülkem en prestijli üniversitelerinden birinin çatısı altında değerli hocalarım Doç. Dr. Mustafa Kubilay KELEŞOĞLU'nun ve Prof. Dr. İlknur BOZBEY'in yardım ve destekleri ile bilimin ışığında, mühendislik mesleğinin sorumluluklarının ve etik değerlerinin bilincinde bir tez hazırladım. Bu süreçte bana yol gösteren saygıdeğer hocalarıma en içten teşekkürlerimi sunarım.

Tez çalışmam süresince benden yardımlarını esirgemeyen sevgili arkadaşım İnş. Yük. Müh. Akın GÖKGÖZ'e teşekkürü bir borç bilirim.

Son olarak bu süreçte desteklerini ve yardımlarını benden esirgemeyen değerli eşim İnş. Müh. Mert DIŞKAYA'ya ve eğitim hayatım boyunca beni her zaman cesaretlendirip destekleyen sevgili ailem Sacide ve Okan ÖZBAŞARAN ile ağabeyim Onur ÖZBAŞARAN'a en içten teşekkürlerimi sunarım.

Mayıs 2018

Burcu ÖZBAŞARAN

İÇİNDEKİLER

Sayfa No

ÖNSÖZ.....	iv
İÇİNDEKİLER.....	v
ŞEKİL LİSTESİ	ix
TABLO LİSTESİ.....	xiii
SİMGE VE KISALTMA LİSTESİ.....	xiv
ÖZET	xvii
SUMMARY	xix
1. GİRİŞ.....	1
2. GENEL KISIMLAR	3
2.1. ENERJİ KULLANIMI.....	3
2.2. YENİLENEBİLİR ENERJİ KAYNAKLARI.....	5
2.3. GÜNEŞ ENERJİSİ.....	6
2.4. GÜNEŞTEN ENERJİ ÜRETİMİ.....	7
2.5. GÜNÜMÜZDE GÜNEŞ ENERJİSİ SİSTEMLERİNİN KULLANIMI.....	9
2.5.1. Dünya’da Güneş Enerjisi Santralleri	11
2.5.2. Türkiye’de Güneş Enerjisi Santralleri	12
2.6. GÜNEŞ ENERJİSİ SİTEMLERİ.....	13
2.6.1. Fotovoltaik (PV) Santraller	13
2.7. GÜNEŞ PANELLERİNİN KURULUMU	15
2.8. GÜNEŞ PANELLERİNDE KULLANILAN TEMEL TÜRLERİ	17
2.8.1. Yerinde Dökme Beton Kazıklar	19
2.8.2. Prefabrik ve Yerinde Dökme Dolgulu Kazıklar	21
2.8.3. Yerinde Dökme Pabuç Temel	21
2.8.4. Çakma Kazıklar	21
2.8.5. Zemin Vidaları.....	22
2.9. HELİSEL KAZIKLAR	23
2.9.1. Tek Plakalı ve Helisel Ankrajların Çekme Yükleri Altında Mekanik Davranışı.....	25
2.9.2. Çoklu Plakalı/Helisel Ankrajların Çekme Yükleri Altında Mekanik Davranışı.....	31

2.9.2.1. Çekme Yüğü Altında Bireysel (Ayrık) Plaka Taşıma Gücü Modeli	33
2.9.2.2. Silindirik Kayma Düzlemi Modeli.....	36
2.10. YATAY YÜKLER ALTINDA TEKİL KAZIĞIN DAVRANIŞI.....	38
2.11. YATAY YATAK KATSAYISI KAVRAMI.....	41
2.11.1. Yatak Modülü, Yatak Katsayısı Ve Yay Katsayısı Kavramları	42
2.12. YATAK KATSAYISININ HESABINDA KULLANILAN YÖNTEMLER.....	44
2.12.1 Yatay Yatak Katsayısının Bulunmasında Kullanılan Yöntemler	48
2.13. YATAY YATAK KATSAYISININ DEĞİŞİMİ.....	51
2.14. YÜKLER.....	54
2.14.1. Düşey Yüğüler.....	55
2.14.1.1. Zati Yüğü ve Panel Yüğüleri	55
2.14.1.2. Kar Yüğüleri	55
2.14.1.3. Buz Yüğüleri	57
2.14.2. Yatay Yüğüler	58
2.14.2.1. Rüzgâr Yüğüleri.....	58
3. MALZEME VE YÖNTEM	60
3.1. YÖNTEM.....	60
3.1.1. SAP2000.....	61
3.1.2. Güneş Paneli Sisteminde Bulunan Yapı Elemanlarının Malzeme ve Geometrik Özelliklerinin Tanımlanması	62
3.2. PANEL SİSTEMİNE ETKİYEN YÜKLERİN HESAPLANMASI VE MODELE UYGULANMASI.....	63
3.2.1. Panel Yüğü Hesabı	63
3.2.2. Kar Yüğü Hesabı	63
3.2.3. Rüzgâr Yüğü Hesabı.....	64
3.3. PANEL SİSTEMİNİN YAPISAL MODELİ.....	66
3.4. ZEMİN PARAMETRELERİ	67
3.5.1. Yatak Katsayılarının Belirlenmesi	67
3.5. PANEL SİSTEMİNE ETKİYEN YÜK KOMBİNASYONLARI.....	68
3.6. LUTENEGGER (2016) DENEYLERİNİN SAP2000'DE MODELLENMESİ.....	69
3.6.1. Sistem Modeli.....	69
3.6.2. Zemin Özellikleri.....	71
3.6.3. Yatak Katsayılarının Belirlenmesi	71
3.6.3.1. Vesic (1961)'e Göre Yay Modülünün Belirlenmesi.....	71

3.6.3.2. Katı Kile Uygun Yatak Katsayısı Değerinin Belirlenerek Sistem Modeline Uygulanması.....	72
4. BULGULAR.....	73
4.1. GÜNEŞ PANELİ SİSTEMİNDE C PROFİL DÜZ KAZIKLA YAPILAN ANALİZLER.....	73
4.1.1. Sadece Uç Direncinin Tanımlandığı Analizler.....	73
4.1.1.1. C Profil Kazıkta Meydana Gelen Deplasmanların Çıkılı (2017)'nin Analiz Sonuçlarıyla Kıyaslanması	74
4.1.2. Sürtünme Yayları ile Yapılan Analizler	78
4.2. PLAKALI ANKRAJLARIN SAP2000 İLE MODELLENMESİ.....	80
4.2.1. Lutnegger (2016), Düz Kazıklarda Gerçekleştirilen Çekme Deneylerinin SAP2000'de Modellenmesi	80
4.2.2. Lutnegger (2016), Düz Kazıklarında Çekme Altında Taşıma Gücü Tahkiki.....	82
4.2.3. Lutnegger (2016), Plakalı Kazıklarda Gerçekleştirilen Çekme Deneylerinin SAP2000'de Modellenmesi	83
4.2.3. Lutnegger (2016), Plakalı Kazıklarda Çekme Altında Taşıma Gücü Tahkiki	84
4.3. GÜNEŞ PANELİ SİSTEMİNİN PLAKALI KAZIKLARLA ANALİZİ	86
4.3.1. C Tipi Plakalı Kazıklar	86
4.2. GÜNEŞ PANELİ SİSTEMİNDE YÜKLERİN ETKİSİ	87
4.2.1. Kar Yüğü	87
4.2.2. Rüzgâr Yüğü.....	89
5. TARTIŞMA VE SONUÇ.....	91
KAYNAKLAR.....	94
EKLER.....	98
EK 1. Üç Boyutlu plakalı sistem modeli ve düğüm noktası numaraları (Kolon tipi: C profil).	98
EK 2. Kazık tabanındaki düğüm noktaları ve numaraları (Bu çalışmadaki deplasmanlar 53 numaralı düğüm noktası için verilmiştir).	99
EK 3. C Tipi plakasız kazıklara etkiyen eksenel yükler.....	100
EK 3. C tipi plakasız kazıklara etkiyen eksenel yükler (devam).....	101
EK 3. C Tipi plakasız kazıklara etkiyen eksenel yükler (devam).	102
Ek 4. E Aksında meydana gelen momentler (kN.m).	103
EK 5. $E_s=20$ MPa için C Profil plakasız kazık yay ritijliği atamaları ($f_s=0$).	104
EK 6. $E_s=20$ MPa için C Profil plakasız kazıkların tabanında meydana gelen düşey deplasmanlar ($f_s=0$).	105

EK 7. $E_s=20$ MPa için C Profil plakasız kazıkların tabanında meydana gelen düşey deplasmanlar ($f_s \neq 0$).....	106
EK 8. $E_s=20$ MPa için C Profil plakalı kazıkların tabanında meydana gelen düşey deplasmanlar ($f_s=0$).....	107
EK 9. $E_s=20$ MPa için C Profil plakalı kazıkların tabanında meydana gelen düşey deplasmanlar ($f_s \neq 0$).....	108
EK 10. $E_s=40$ MPa için C Profil plakasız kazık yay ritijliği atamaları ($f_s=0$).....	109
EK 11. $E_s=40$ MPa için C Profil plakasız kazıkların tabanında meydana gelen düşey deplasmanlar ($f_s=0$).....	110
EK 11. $E_s=20$ MPa için C Profil plakalı kazıkların tabanında meydana gelen düşey deplasmanlar ($f_s=0$).....	111
ÖZGEÇMİŞ	112

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa No

Şekil 2.1: Dünya’da elektrik üretiminde kullanılan enerji kaynakları (Yüceer, 2015).....	3
Şekil 2.2: Türkiye’de enerji üretimde kullanılan kaynaklar (Yüceer, 2015).	4
Şekil 2.3: Dünya’ya ulaşan Güneş ışığı dağılımı (NASA, 2017).	7
Şekil 2.4: a) Tarihteki ilk güneş kolektörü b) Mouchot’un parabolik güneş kolektörü.....	9
Şekil 2.5: Dünya radyasyon haritası (NASA, 2008).	9
Şekil 2.6: Avrupa güneş enerjisi potansiyeli atlası (Çıkılı, 2017).....	10
Şekil 2.7: Türkiye güneş enerjisi potansiyeli atlası (GEPA, 2018).	10
Şekil 2.8: Kızören güneş enerjisi santrali.....	13
Şekil 2.9: PV sistemi oluşturulan elamanlar (Altaş, 1998).	14
Şekil 2.10: P-N Birleşimli iyot (Altaş, 1998).....	15
Şekil 2.11: Londra’da elektrik üreten güneş panellerine sahip Blackfriars Köprüsü.	16
Şekil 2.12: Eğimli bir çatıya kurulmuş güneş panel sistemi.	17
Şekil 2.13: Güneş paneli sistemlerin kuruldukları yerlere örnekler.....	17
Şekil 2.14: Alçak ve yüksek montaj sistemlerine örnekler.	18
Şekil 2.15: Güneş paneli sistemlerinde kullanılan temel türleri (Lutenegger, 2016).....	19
Şekil 2.16: Güneş panellerinde kullanılan yerinde dökme kazıkar (Lutenegger, 2016).....	20
Şekil 2.17: Güneş panellerinde kullanılan farklı beton kazıklar (Lutenegger, 2016).	20
Şekil 2.18: Güneş enerjisi sistemlerinde kullanılan prefabrik kazıklar (Lutenegger, 2016).....	21
Şekil 2.19: Zemin vidası.	23
Şekil 2.20: Helisel kazık elemanları (Birand, 2001).	24
Şekil 2.21: Helisel kazık imalatı.	25
Şekil 2.22: Plakalı ankrajların çekme yükü altında davranışı. (Young, 2012).	26

Şekil 2.23: Çekme gerilmesine maruz kalan ankraj sistemi (Das, 1978).....	26
Şekil 2.24: $\gamma_s=0$ için kırılma faktörü (Merifield, 2011).....	27
Şekil 2.25: $\gamma_s=0$ için farklı zeminlerde kırılma faktörü (Merifield, 2011).	28
Şekil 2.26: Kumda yapılmış çekme deneyleri (sağ fotoğraf sıkı kum, sol fotoğraf gevşek kum).....	29
Şekil 2.27: Kumda yapılmış çekme deneyleri (sağ fotoğraf sıkı kum, sol fotoğraf gevşek kum).....	30
Şekil 2.28: Sığ ve derin ankraj davranışı (Merifield vd., 2003).....	30
Şekil 2.29: Şekil 2.28’de verilen sistemlerin yenilme mekanizması (Merifield vd., 2003).....	31
Şekil 2.30: Helisel ankrajların çekme yükleri altında yenilme davranışı (Lutenegger, 2009).....	32
Şekil 2.31: Çekme yüklerine maruz kalan helisel ankrajlar (Rao vd., 1991).....	33
Şekil 2.32: a) Silindirik kayma yenilmesi b) Silindirik kayma ve taşıma gücü yenilmesi.....	35
Şekil 2.33: Helisel ankrajlarda silindirik kayma düzlemi (Mooney vd., 1985).	38
Şekil 2.34: Yanal yüklenmiş tekil kazıkların sınıflandırılması.	40
Şekil 2.35: Elastik zemin üzerine oturan kiriş ve zeminin elastik yaylarla temsil edilmesi.....	41
Şekil 2.36: Zeminin gerilme-şekil değiştirme davranışı.	42
Şekil 2.37: Biot (1937)’un elastik zemine oturan şerit temeli.	46
Şekil 2.38: Yatay yüklenen bir kazıkta zemin davranışının temsili (Birand, 2001).	51
Şekil 2.39: Doğrusal elastik-plastik davranış (Birand, 2001).	52
Şekil 2.40: Yatak katsayısının derinlikle değişimi.....	53
Şekil 2.41: a) Yük-deformasyon (p-y) eğrisi b) Yatak katsayısının deformasyona bağlı değişimi.	54
Şekil 2.42: Üç eksenli basınç deneyi ile elastisite modülü gösterimi ve deformasyonla ilişkisi.	54
Şekil 2.43: Kar yağış yüksekliği haritası (TS498, 1997).	56
Şekil 2.44: Planda kare kesitli ve eğik çatılı kapalı yapılarda rüzgâr yükünün dağıtımı	58

Şekil 3.1: Panel sistemi: Taşıyıcı konstrüksiyonun üç boyutlu modeli.	60
Şekil 3.2: Çelik elemanlar ve yaylar.	60
Şekil 3.3: Plakalı panel sistemi.	61
Şekil 3.4: a) Çelik kolon profil detayı b) Çelik kiriş profil detayı c) Çelik aşık profil detayı.	62
Şekil 3.5: Çapraz eleman kesiti.	62
Şekil 3.6: Panel yüklerinin aşıklara etkimesi (kN/m).	63
Şekil 3.7: Kar yükünün aşıklara etkimesi (kN/m).	64
Şekil 3.8: Sisteme etkiyen $\pm Y$ yönünde rüzgâr yükü.	65
Şekil 3.9: +Y yönünde rüzgâr (kN/m).	65
Şekil 3.10: -Y yönünde rüzgâr (kN/m).	66
Şekil 3.11: Panel sisteminin X-Y aksı kesiti.	66
Şekil 3.12: Panel sisteminde kullanılan çapraz elemanlar.	67
Şekil 3.13: Lutenegger (2016) düz kazık deneylerinin SAP2000’de modellenmesi.	70
Şekil 3.14: Lutenegger (2016) plakalı kazık deneylerinin SAP2000’de modellenmesi.	70
Şekil 4.1: Maksimum gerilmelerin meydana geldiği kazıklar.	75
Şekil 4.2: D+S+0.5Wy yüklemesi altında kazıklarda meydana gelen eksenel kuvvetler (kN).	75
Şekil 4.3: D+S+0.5Wy yüklemesi altında kazıklarda meydana gelen gerilmeler (MPa).	75
Şekil 4.4: Panel sisteminde kazık ucunda oluşan maksimum gerilmeler.	76
Şekil 4.5: Güneş paneli sisteminde $E_s=20$ MPa için yapılan analizler.	76
Şekil 4.6: Güneş paneli sisteminde $E_s=40$ MPa için yapılan analizler.	77
Şekil 4.7: Sürtünme yayları tanımlanan sistemde meydana gelen deplasmanlar ($E_s=20$ MPa).	78
Şekil 4.8: Sürtünme yayları tanımlanan sistemde meydana gelen deplasmanlar ($E_s=20$ MPa).	79
Şekil 4.9: Sürtünme davranışının yaylarla modellendiği analizlerden kaydedilen deplasmanlar.	79

Şekil 4.10: Sürtünme davranışının yaylarla modellendiği analizlerden kaydedilen deplasmanlar.....	80
Şekil 4.11: SAP2000’de düz kazıkta meydana gelen deplasmanlar (Vesic 1961).	81
Şekil 4.12: SAP2000’de düz kazıkta meydana gelen deplasmanlar (Das 1990).	82
Şekil 4.13: SAP2000’de çekme yükü uygulanmış plakalı kazıkta meydana gelen deplasman.	83
Şekil 4.14: 35 kN çekme yüküne maruz kalan kazıkta düşey yönde meydana gelen deplasman.	84
Şekil 4.15: Plakalı kazıklarla modellenen güneş paneli sisteminde meydana gelen deformasyon.	86
Şekil 4.16: Plakalı/Plakasız kazıklarla modellenen güneş paneli sistemlerinde elde deplasman.	87
Şekil 4.17: $D+S+0.5W_y$ yüklemesi altında panel sisteminde meydana gelen oturma.	88
Şekil 4.18: Kar yükü altında kazıklarda meydana gelen deplasmanlar.	88
Şekil 4.19: $D+W_y$ yüklemesi altında panel sisteminde meydana gelen deformasyonlar.	89
Şekil 4.20: $D-W_y$ yüklemesi altında panel sisteminde meydana gelen deformasyonlar.	90
Şekil 4.21: Rüzgâr yükü altında kazıklarda meydana gelen deplasmanlar.	90

TABLO LİSTESİ

Sayfa No

Tablo 2.1: Yenilenebilir enerji kaynakları (Yüceer, 2015).	5
Tablo 2.2: Yıllık güneş enerjisi ve güneşlenme süresi değerleri (Varınca ve Gönüllü, 2006).	11
Tablo 2.3: Dünyadaki büyük kapasiteli güneş santralleri.	12
Tablo 2.4: Kızören güneş enerjisi santrali.	12
Tablo 2.5: Killerde sığ temeller için F_c değerleri ($\phi = 0$) (Das, 1978).	28
Tablo 2.6: Farklı zeminler için yatak modülü değerleri (Bowles, 1996).	45
Tablo 2.7: Das (1990)'a göre bazı zemin türleri için yatak katsayısı değerleri.	45
Tablo 2.8: Kumlar için n_h (kN/m^3) değerleri.	49
Tablo 2.9: Normal konsolide zeminlerde n_h değerleri (Yıldırım, 2009).	49
Tablo 2.10: Çatı eğimine (α) bağlı olarak azaltma değeri (m) (TS498, 1997).	56
Tablo 2.11: Zati kar yükü (P_{k0}) değerleri (kN/m^2).	57
Tablo 2.12: Yüksekliğe bağlı olarak rüzgâr hızı ve emme (TS498, 1997).	59
Tablo 3.1: Çelik profillerin malzeme özellikleri.	62
Tablo 3.2: Sisteme etkileyen panel yükleri.	63
Tablo 3.3: Kar yükü değerleri.	64
Tablo 3.4: Yapıya etkileyen rüzgâr yükleri.	65
Tablo 3.5: Panel sistemi yatak modülleri.	68
Tablo 3.6: Yük kombinasyonları.	68
Tablo 3.7: Çelik boru geometrik özellikleri.	69
Tablo 3.8: Lutenegeer (2016) çekme yükleri.	69
Tablo 3.9: Yatak modülü ve yay rijitliği (Vesic, 1961).	72
Tablo 3.10: Yatak modülü ve yay rijitliği (Das, 1990).	72

SİMGE VE KISALTMA LİSTESİ

Simgeler	Açıklama
a	: Adhezyon
α	: Çatı Örtüsü Eğimi
A	: Etkilenen Yüzey Alanı
A_s	: Düşey Ve Yatay Yatak Katsayısı İçin Bir Katsayı
B	: Temelin Bir Boyutu
B_s	: Derinliğe Bağlı Bir Katsayı
C	: Kohezyon
C_f	: Aerodinamik Yük Katsayısı
D	: Kazık/Şaft Çapı
D_{avg}	: Helisel Plakaların Ortalama Çapı
D_{avg}	: Kumun Bağlı Sıklığı
E_p	: Kazığın Elastisite Modülü
E_s	: Zeminin Elastisite Modülü
F_{yk}	: Çeliğin Akma Dayanımı
F_c	: Temelin Çekme Dayanımı Yenilme Faktörü
F_q	: Temelin Çekme Dayanımı Yenilme Faktörü
G	: Yer Çekimi İvmesi
H	: Kazığın Gömme Derinliği
H_{eff}	: Efektif Kazık Boyu
K_h'	: Yatay Yatak Modülü
K_v'	: Düşey Yatak Modülü
K_h	: Yatay Yatak Katsayısı
K_s	: Düşey Yatak Katsayısı
K_h	: Yatay Yay Rijitliği
K_s	: Düşey Yay Rijitliği
I_p	: Kazık Atalet Momenti
M	: Kar Yüğü Azaltma Değeri
Mg	: Moment
N	: Helis veya Plaka Sayısı
N	: Gerçeğe En Uygun K_s Değerini Sağlayan Kuvvet

n_h	: Yatak Katsayısı Değişim Çarpanı
N_c	: Terzaghi Kohezyon Taşıma Gücü Katsayısı
N_q	: Terzaghi Taşıma Gücü Katsayısı
Q	: Rüzgâr Basıncı
Q_u	: Temelin/Plakanın Taşıma Gücü
Q_0	: Kazığın Brüt Çekme Dayanımı
Q_f	: Silindirik Kayma Düzlemi Boyunca Meydana Gelen Sürtünme
Q_g	: Kesme Kuvveti
Q_p	: En Üstteki Plakanın Taşıma Gücü
Q_{sh}	: Kazık-Zemin Arayüzünde Meydana Gelen Sürtünme
Q_u	: Kazığın Nihai Çekme Dayanımı
Q_g	: Kesme Kuvveti
P_k	: Kar Yüğü Hesap Değeri
P_{k0}	: Zati Kar Yüğü
S	: Plakalar Arasındaki Mesafe
S_u	: Zeminin Drenajsız Kayma Mukavemeti
W_a	: Şaft Ağırlığı
W_f	: Temelin Zati Ağırlığı
W_s	: Plakalar Arasındaki Zeminin Ağırlığı
Z	: Derinlik
ν	: Poisson Oranı
Γ	: Zeminin Birim Hacim Ağırlığı
Σ_v	: Zemindeki Düşey Gerilme
Σ_{vn}	: N. Plaka Üzerindeki Düşey Zemin Gerilmesi
ϕ	: İçsel Sürtünme Açısı

Kısaltmalar

Açıklama

COP	: İklim Değişikliği Konferansı
DC	: Doğrusal Akım
GEPA	: Güneş enerjisi Potansiyeli Atlası
IEA	: Uluslar Arası Enerji Ajansı
LPG	: Sıvılaştırılmış Petrol Gazı
N	: Negatif
OPEC	: Petrol İhraç Eden Ülkeler Örgütü

PV	: Fotovoltaik
P	: Pozitif
SPT	: Standart Penetrasyon Deneyi
TS498	: Yapı Yüklemleri Hakkında Yönetmelik
TS500	: Betonarme Yapıların Tasarım ve Yapım Kuralları
TS648	: Çelik Yapılar Hakkında Yönetmelik



ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

GÜNEŞ PANELLERİNDE KULLANILAN HELİSEL KAZIKLARIN TASARIMINDA SAYISAL YAKLAŞIMLARIN ETKİSİ

Burcu ÖZBAŞARAN

İstanbul Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman : Doç. Dr. M. Kubilay KELEŞOĞLU

Bugün güneş, rüzgâr ve su gibi yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımı hem mevcut enerji kaynaklarına alternatif olması hem de doğanın korunması hususunda artan toplumsal bilinç sayesinde önem kazanmaktadır. Bu kaynakların içinde güneş enerjisi tamamen sınırsız olması sebebiyle diğer doğal enerji kaynaklarından bir adım önde yer alır. Günümüzde güneş enerjisi üretim tesislerinin birçok uygulaması bulunmakta olup, sayıları her geçen gün artmaya devam etmektedir.

Güneş paneli sistemlerine etki eden yapısal yükler diğer yapılara kıyasla çok küçük olsa da bu yüklerin zemine aktarılması ve uygun temel tasarımı hususunun geoteknik mühendisliği açısından incelenmesi önemlidir. Ülkemizde bu sistemlerin statik davranışının incelenmesi hususunda yapılmış birçok detaylı çalışma mevcuttur. Bu çalışmada güneş paneli sistemlerinin bağlandığı temel elemanı olarak çalışan çelik ayakların zemine soketlendiği kısmının çekme ve basınç etkileri altındaki davranışı incelenmiştir. Bu doğrultuda öncelikle ilgili yönetmelikler incelenmiş ve gerekli literatür araştırması yapılmıştır. Güneş panellerinin aldığı yükler ve maruz kalacağı yük kombinasyonları belirlenip örnek bir proje üzerinde hesaplamalar yapıldıktan sonra yapısal analiz programı SAP2000 (Structural Software for Analysis and Design) kullanılarak soket bölgesindeki düz ve plakalı çelik profiller ile zemin arasındaki sürtünme davranışı ile kazık sisteminde meydana gelen deplasmanlar incelenmiştir. Çalışmada dört tip kazık türü modellenmiştir (C tipi profil, C tipi plakalı profil, boru tipi, plakalı boru tipi). Kazık-zemin ara yüzü ilişkisi düşey ve yatay doğrultuda çalışan elastik yaylarla tanımlanmıştır.

Yay sabitleri Vesic (1961)'in teorisine göre hesaplanmıştır. Vesic (1961)'e göre yay sabiti hesaplanırken zemine ait gereken parametreler sadece Elastisite Modülüsü (Es) ve Poisson Oranıdır (ν). Güneş paneli sisteminin modellendiği analizlerde sistemin doğruluğunu kontrol edebilmek için yatak katsayıları Çıkılı, (2017)'nin referans analizlerinde kullandığı 20 MPa Elastisite modülü ve 0,3 Poisson oranı kullanılarak hesaplanmıştır. Analiz sonuçları kıyaslandığında sonuçların çok yakın olduğu gözlemlenmiştir. Ayrıca tek plakalı kazıkların çekme yükleri altındaki davranışını anlayabilmek için Lutnegger, (2016) tarafından gerçekleştirilen deneyler modellenmiş ve küçük yüklemelerde yakın deplasmanlar elde edilmiştir.

Haziran 2018, 132 sayfa.

Anahtar kelimeler: Yenilenebilir enerji, güneş panelleri, yatak katsayısı, plakalı kazıklar, SAP2000.



SUMMARY

M.Sc. THESIS

THE EFFECT OF NUMERICAL APPROACHES DESIGN OF HELICAL PILES USED FOR SOLAR PANELS

Burcu ÖZBAŞARAN

İstanbul University

Institute of Graduate Studies in Science and Engineering

Department of Civil Engineering

Supervisor : Assoc. Prof. Dr. M. Kubilay KELEŞOĞLU

Today, use of renewable energy sources such as sun, wind or water is increasing depending on the social awareness about environment and they have started to be assumed as the first alternatives for the traditional energy sources. Among these sources, sun is the most important one with its limitless energy and also solar energy systems have been preferred more than others thanks to its low installation and maintenance costs. A great number of solar systems are available today to generate energy and the amounts of these facilities are increasing depending on the demand of energy.

Although solar panel systems are exposed to structural loads less than the other engineering structures, it is necessary to analyse the panel systems not only for basic design but also in terms of geotechnical aspect. In Turkey, there are so many detailed researches about the static behaviour of these types of structures. In this study, the behaviour of steel piles which are connected to the panel systems which are exposed to compression and tension were investigated. For this purpose, relevant specifications have been investigated and necessary literature research has been completed. After the possible load combinations had been determined, a sample solar panel project was modelled and analysed in SAP2000 (Structural Software for Analysis and Design) to observe the friction behaviour between the plain and single plate pile surface in the socket depth. Four types of piles (plain C-profile, C-profile with plate, pipe and single plate pipe) were used for the models. The soil-pile interaction behaviour

was modelled with elastic vertical and horizontal springs. The coefficient of springs were determined based on the Vesic (1961)'s theory. The only soil parameters to evaluate subgrade reaction modulus according to Vesic (1961) are Young Modulus (E_s) and Poisson's ratio (ν) were assumed as 20 MPa and 0.3 respectively. The results for C-profile pipes were compared to Çıkılı, (2017)'s reference analysis which had done with the same parameters and nearly the same deformation values were obtained for frictionless condition. In addition, to understand the behaviour of piles with single helical plate the tests had done by Lutenegeger (2016) were modelled in SAP2000. For the small load values nearly the same displacement values obtained.

June 2018, 132 pages.

Keywords: Renewable energy, solar panel, subgrade reaction modulus, single plate piles SAP2000.



1. GİRİŞ

Bugün enerji üretiminde güneş, rüzgâr ve su gibi kolay depolanabilir, düşük maliyetli, yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımı hem mevcut enerji kaynaklarına alternatif olması hem de doğanın korunması hususunda artan toplumsal bilinç sayesinde önem kazanmıştır.

Yenilenebilir enerji kaynakları doğaya herhangi bir tahribat vermeden diğer enerji türlerinin üretilmesi için kullanılır. Bu kaynakların içinde güneş enerjisi tamamen sınırsız olması sebebiyle diğer doğal enerji kaynaklarından bir adım önde yer alır. Güneşten enerji üretimi, kurulum ve işletme maliyetlerinin düşük olması, çevre dostu olması sebebiyle dünyada son yıllarda tercih edilmeye başlanmıştır. Özellikle ülkemiz, güneş ışıını ve güneşlenme süreleri bakımından bu enerjinin etkin olarak kullanılabileceği bir coğrafyaya sahiptir. Günümüzde güneş enerjisi üretim tesislerinin birçok uygulaması bulunmakta olup, sayıları her geçen gün artmaya devam etmektedir.

Güneş panelleri, üzerindeki birçok güneş hücresi sayesinde güneş ışığını soğurarak depolar. Bu paneller fotovoltaiik ilkeye dayalı olarak çalışan elemanlardır; güneş enerjisini elektrik enerjisine çevirirler. Güneş panelleri, kurulacağı bölgenin, topografik ve coğrafi koşulları, eğimi, sürekli rüzgârların yönü, güneş ışınlarının bu bölgeye geliş açısı ve yoğunluğuna bağlı olarak bina çatıları, bina cepheleri ya da açık arazilerde kullanılabilir. Bir güneş paneli sistemi fotovoltaiik panel ve panel taşıyıcı sisteminden (temeller ve montaj elemanları) oluşmaktadır. Taşıyıcı sistemin tasarımında ve malzeme seçiminde maliyet, zeminin özellikleri, yöresel olarak kar ve rüzgâr yükü gibi faktörlerin değişkenlik göstermesi, arazi eğiminin değişkenliği, sahaya uygun donanım seçilmesi göz önüne alınır. Dolayısıyla taşıyıcı sistem elemanları galvanizli çelik, alüminyum, paslanmaz çelik, ahşap ya da kompozit malzemelerden üretilmektedir.

Güneş paneli sistemlerine etki eden yapısal yükler diğer yapılara kıyasla çok küçük olsa da bu yüklerin zemine aktarılması ve uygun temel tasarımı hususunun geoteknik mühendisliği açısından incelenmesi önemlidir. Bu amaçla, farklı saha koşulları için geliştirilmiş birçok türde temel uygulaması bulunmaktadır: prefabrik beton, yerinde dökme beton, çakma kazık ya da helisel kazık gibi. Ayrıca, bu sistemler küçük çap ve uzunlukta fazla sayıda kazığa sahiptir. Ekonomik malzeme kullanımı ve gömme derinliği açısından kazık optimizasyonu önemlidir.

İyi tasarlanmış güneş paneli temeli güvenilirlikten ödün vermemelidir. Doğru geoteknik veriler, güvenilir ve uygun maliyetli bir temel tasarımının anahtarıdır. Yeterli ve doğru geoteknik bilgi yoksa güvenli tarafta kalınarak temel tasarımı yapılmalıdır. Güvenli tarafta kalınarak yapılan temel tasarımı da fazla maliyete neden olabilmektedir. Projenin başlangıcındaki doğru yapılan geoteknik analiz, tasarım maliyetinin güvenli tarafta ve optimum yapılmasını sağlayacaktır.

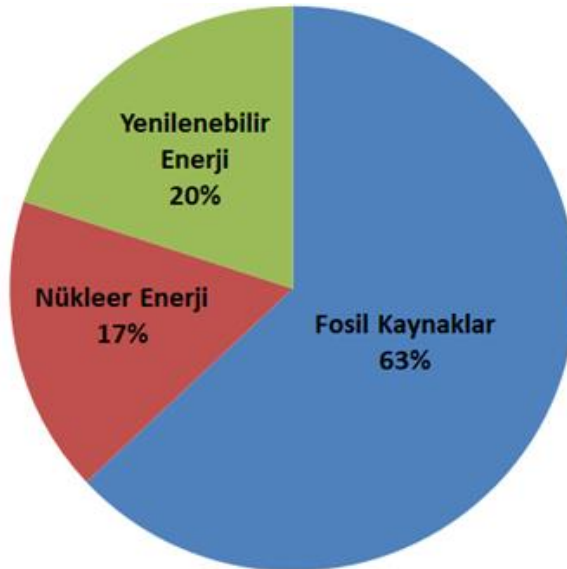
Bu çalışmada güneş paneli sistemlerinin bağlandığı temel elemanı olarak çalışan çelik ayakların zemine soketlendiği kısmının basınç ve çekme etkileri altındaki davranışının incelenmesi amaçlanmaktadır. Bu doğrultuda öncelikle ilgili yönetmelikler incelenmiş ve gerekli literatür araştırması yapılmıştır. Güneş panellerinin aldığı yükler ve maruz kalacağı yük birleşimleri yönetmeliklere göre belirlenip örnek bir proje üzerinde hesaplamalar yapıldıktan sonra yapısal analiz programı SAP2000 (Structural Software for Analysis and Design) kullanılarak soket bölgesindeki düz ve plakalı çelik profiller ile zemin arasındaki sürtünme davranışı düşey ve yatay yatak katsayıları kullanılarak incelenmiştir.

2. GENEL KISIMLAR

2.1. ENERJİ KULLANIMI

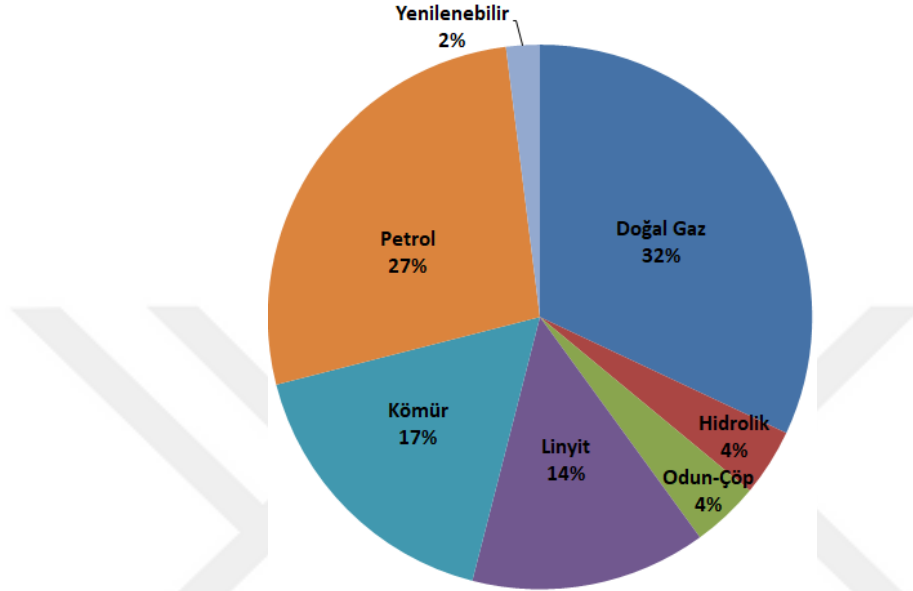
Enerji, iş yapabilme yeteneğidir. Evrende enerji, enerjinin korunumu kanunu gereği hiçbir zaman yok olmaz, başka enerji çeşitlerine dönüşür. Dünya’da enerji; ısı, elektrik, atom, kimyasal, nükleer, ışık, kinetik, potansiyel, nükleer ya da biyokütle formunda bulunabilir. Tüm canlılar hayatlarını sürdürebilmek için enerjiye ihtiyaç duyar, enerji üretebilmek için beslenir ya da solunum yapar. Sanayide ise enerji üretebilmek için çeşitli yakıt türleri kullanılır. Örneğin bir hidroelektrik santralde suyun potansiyel enerjisi kinetik enerjiye ve elektrik enerjisine çevrilirken, bir termik santralde yakıtların yakılmasıyla açığa çıkan ısı enerjisi elektrik enerjisine dönüştürülür (Yüceer, 2015).

Dünya’da mevcut enerji kaynakları fosil yakıtlar, nükleer enerji kaynakları ve yenilenebilir enerji kaynaklarıdır. Enerji üretiminde çoğunlukla hidrokarbon içeren kömür, petrol ve doğal gaz gibi fosil yakıtlar (mineral yakıtlar) kullanılmaktadır. Günümüzün ulaşım faaliyetleri doğrudan benzin, mazot, LPG gibi petrol kaynaklı fosil yakıtlara bağlıdır. Ayrıca elektrik üretiminin %63’ü fosil yakıtlardan sağlanmaktadır. Şekil 2.1’de günümüzde elektrik enerjisi üretiminde kullanılan kaynaklar verilmiştir.



Şekil 2.1: Dünya’da elektrik üretiminde kullanılan enerji kaynakları (Yüceer, 2015).

Şekil 2.2’de Türkiye’de enerji üretiminde kullanılan yakıt türlerinin yüzdeleri verilmektedir. Grafiklerden de görüldüğü gibi enerji üretiminin büyük bir kısmı ülkemizde de fosil yakıtlardan sağlanmaktadır.



Şekil 2.2: Türkiye’de enerji üretimde kullanılan kaynaklar (Yüceer, 2015).

Fosil yakıtların kullanılmasına dayanan enerji üretim yöntemleri, atmosfere saldıkları sülfür, azot oksit, karbondioksit, karbon monoksit ve diğer gazlarla çevreye hayati zararlar vermektedir. Atmosfer ve dünya yüzeyi arasında birikerek tabaka haline gelen bu gazlar insanlığın ve tüm canlıların geleceğini tehdit eden bir oluşum olan sera etkisine yol açmaktadır. Başta karbondioksit olmak üzere sera gazları, güneşten gelen ışınları Dünya yüzeyine iletirken yeryüzünden yansıyan uzun dalga boylu ışınları ise soğurmaktadır. Bunun sonucunda Dünya yüzeyi ve troposferin ortalama sıcaklığı artmakta ve bu olay geleceğimizi tehdit eden diğer bir oluşum olan küresel ısınmaya neden olmaktadır. Bir diğer ifadeyle, atmosfere salınan CO₂ miktarına bağlı olarak gezegenimizin ortalama sıcaklığında meydana gelen artış meteorolojik basınç sistemlerini etkilemekte ve iklimsel değişikliklere sebep olmaktadır.

Günümüzün enerji talebine bağlı olarak fosil yakıtlarda meydana gelen hızlı tükeniş çevresel etkilerin yanında politik ve ekonomik problemlere de neden olmaktadır. Örneğin, 1973’te Petrol İhraç Eden Arap Ülkeler Birliği (OPEC), Yom Kippur Savaşı’nda Amerika Birleşik Devletleri’nin İsrail Ordusuna destek vermesinin ardından petrol ambargosu ilan etmiş bu

durum dünyada petrol krizi doğurarak ülkelerin enerji üretiminde bağımsızlaşmaları hususunda farkındalık yaratmıştır (Girgin, 2011). Bugün Dünya’da 700 milyar varil petrol rezervi olduğu bilinmektedir. Dünya genelinde yıllık tüketim ortalama 2 milyar varil olan bu yakıt türünün 2020 yılına kadar tükeneyeceği, mevcut kömür rezervinin 300 yıl, doğal gaz rezervinin ise 50 yıl yetecek kadar olduğu ön görülmektedir (Yüceer, 2015). Bu durum, ülkelerin yenilenebilir enerji kaynaklarını birincil enerji kaynağı haline getiremezlerse gelecekte insanlığı enerji savaşlarının beklediğinin göstergesidir.

2.2. YENİLENEBİLİR ENERJİ KAYNAKLARI

Bugün, sürekli gelişen teknoloji, sanayi ve hızla artan dünya nüfusu enerji ihtiyacını ve kullanımını arttırmakta, bu durum mevcut enerji kaynaklarının azalmasının yanında geleceğimizi ciddi olarak etkileyecek doğa tahribatına neden olmaktadır. Diğer yandan artan enerji ihtiyacına bağlı olarak fosil yakıt tüketiminin 2035’e kadar %56 oranında artması beklenmektedir (IEA, 2013).

Yenilenebilir enerji, doğada herhangi bir üretim işlemine gerek duyulmadan ve sürekli bir döngüyle kendini yenileyebilen güneş, rüzgâr, dalga, jeotermal veya gel-git gibi kaynaklardan elde edilen enerjidir. Tablo 2.1’de yenilenebilir enerji kaynakları verilmiştir.

Tablo 2.1: Yenilenebilir enerji kaynakları (Yüceer, 2015).

Yenilenebilir Enerji Kaynağı	Kaynak veya Yakıntı
Hidroelektrik enerjisi	Nehirler
Rüzgâr enerjisi	Rüzgârlar
Jeotermal enerji	Yeraltı suları
Güneş enerjisi	Güneş
Biokütle enerjisi	Biyolojik atıklar
Dalga enerjisi	Okyanus ve denizler
Hidrojen enerjisi	Su ve hidroksitler

Aralık 2015'te düzenlenen Paris COP21 iklim değişikliği zirvesinde, yenilenebilir kaynaklardan elde edilen enerjinin çevre kalitesini iyileştirmede ve iklim değişikliğinin doğaya olan etkilerini azaltmada önemli bir rol oynayabileceğini iddia etmiştir (Kahia vd., 2017). Ayrıca, 11 Aralık 1997 tarihinde Japonya'nın Kyoto kentinde düzenlenen Kyoto Protokolü'nde sera etkisi yaratan gazların salınımını azaltmayı hedefleyen uluslararası bir anlaşma hazırlanmıştır (Girgin, 2011). Bu gelişmeler doğrultusunda ısı, elektrik ve yakıt

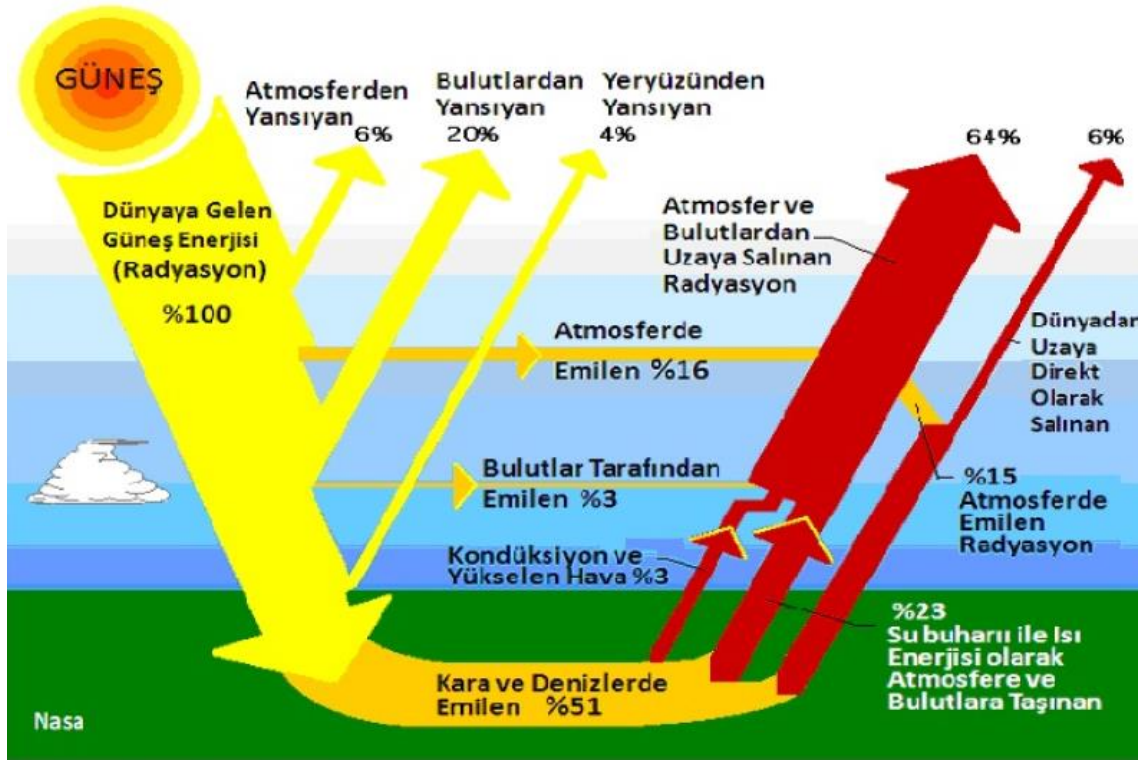
üretmek için modern, yenilenebilir kaynakların kullanılmasına yönelik talebin hızla artması ve yenilenebilir kaynakların kullanımının 2035 yılına kadar %13'ten %17'ye yükselmesi beklenmektedir. Ayrıca hidroelektrik ve biyoenerji ile birlikte rüzgâr ve güneş enerjisi üretim sistemlerinin hızla gelişmesiyle elektrik enerjisi üretiminde bu kaynakların 2035 yılına kadar kömüre en yakın rakip olacağı ön görülmektedir (IEA, 2013).

Sonuç olarak, bugün yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımı, gelişme sürecinde bir alan olduğu için teknolojik yetersizlikler, yatırım maliyetleri ve fosil yakıtlarla rekabet güçlüğü nedeniyle henüz tamamıyla günlük hayatımızda yer almamıştır. Fakat gelecekte enerji üretiminde fosil ve nükleer yakıtları kullanmak yerine güneş ışığı, rüzgâr, dalga, jeotermal ısı gibi birer yenilenebilir enerji kaynaklarını tercih etmek çevresel ve sosyal açıdan birçok güvenli çözüm sunacaktır. Bu enerji kaynaklarının kullanımının yaygınlaştırılması ve bu enerji üretim sistemlerinin geliştirilmesi iş yaratma, artan enerji güvenliği, gelişmiş insan sağlığı, çevre koruma ve iklim değişikliğinin hafifletilmesini sağlayarak hem çevrenin korunmasına katkıda bulunacak hem de ekonomiyi geliştirecektir.

2.3. GÜNEŞ ENERJİSİ

Güneş, Dünya'nın içinde bulunduğu güneş sisteminin tek yıldızıdır. Bu küresel yıldızın çapı $1,39 \times 10^9$ m ve kütlesi 2×10^{30} kg'dır. Gezegenimize ulaşan güneş ışınları sayesinde iklimsel değişiklikler, yağmur döngüleri ve dünyada yaşamın devamlılığı için hayati olan fotosentez reaksiyonları ve gerçekleşir.

Güneş'in yüzey sıcaklığı yaklaşık olarak 5760 K'dir. Güneş kütlesinin yaklaşık %74'ünü hidrojen atomları, %25'ini Helyum gazı ve geri kalan kısmını da ağır gazlar oluşturur (Kalogirou, 2013). Güneş'te sürekli olarak yüksek enerji çıkışına neden olan füzyon tepkimeleri meydana gelir. Hidrojen atomlarının bir araya gelerek Helyum atomu oluşturmaya dayanan bu nükleer kaynaşma faaliyeti esnasında $3,86 \times 10^{26}$ J gibi muazzam bir enerji açığa çıkar (Varınca ve Gönüllü, 2006). Güneş'ten çıkan bu enerji, ışın formunda tüm doğrultularda yayılır. Isıl radyasyon boşluk ortamında ışık hızıyla hareket ettiği için (3×10^8 m/s), güneş enerjisi Dünya'ya 8 dakika 20 saniyede ulaşacaktır (McVeigh, 2013); fakat güneş ışınlarının tamamı Dünya yüzeyine ulaşmaz. Bu ışınların bir bölümü atmosfer tarafından soğurulurken bir bölümü bulutlardan geri yansır.



Şekil 2.3: Dünya'ya ulaşan Güneş ışığı dağılımı (NASA, 2017).

Yenilenebilir enerji kaynakların içinde güneş enerjisi tamamen sınırsız bir kaynak olması sebebiyle diğer doğal enerji kaynaklarından bir adım öndedir. Güneşten enerji üretimi, kurulum, işletme maliyetlerinin düşük olması ve çevre dostu olması sebebiyle dünyada tercih edilmeye başlanmıştır. Özellikle ülkemiz, coğrafi konumu sayesinde güneş ısınımı ve güneşlenme süreleri bakımından bu enerjinin etkin olarak kullanılabileceği ülkelerden birisidir.

Dünya'ya Güneş'ten saniyede yaklaşık olarak 170×10^6 MW enerji ulaşmaktadır. Türkiye'nin yıllık enerji üretiminin 100×10^6 MW olduğu varsayılırsa bir saniyede dünyaya gelen güneş enerjisi, Türkiye'nin toplam enerji üretiminin $1,7 \times 10^3$ katıdır (Varınca ve Gönüllü, 2006). Günümüzde güneş enerjisi üretim tesislerinin birçok uygulaması bulunmakta olup, sayıları her geçen gün artmaya devam etmektedir.

2.4. GÜNEŞTEN ENERJİ ÜRETİMİ

Bölüm 2.1'de söz edildiği gibi Güneş'ten çıkan enerjinin çok az bir kısmı Dünya'ya yüzeyine ulaşmaktadır; fakat bu duruma rağmen 84 dakikalık ısı radyasyonunun dünyanın 1 yıllık enerji ihtiyacını karşılayacağı tahmin edilmektedir (Kalogirou, 2013). Bir diğer ifadeyle 13 milyar

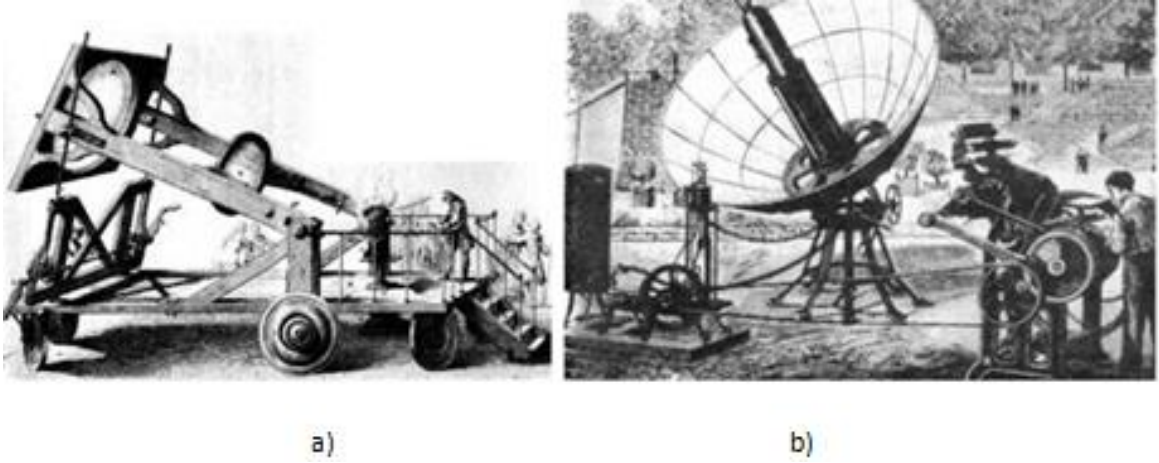
taş kömürünün sağladığı enerjiyi, Güneş yeryüzüne bir saatte göndermektedir. Ancak, zaman zaman ısı radyasyonunun düşük yoğunluğa sahip olması, mevsimsel koşullara bağlı olarak kesintiye uğrayabilmesi ve teknik sorunlar nedeniyle güneş enerjisinin henüz yeterli oranda kullanıma sunulamadığı söylenebilir (Girgin, 2011).

Güneş'ten enerji üretimi tarihteki kullanılan ilk enerji üretim yöntemidir. Tarihte güneş enerjisinin bilinen en geniş ölçekli kullanımı Yunan matematikçi ve filozof Archimed'in (M.Ö. 287-212) aynadan yansıttığı güneş ışınlarıyla Sirakuza'yı kuşatan Roma gemilerini yakmasıdır (Kalogirou, 2013). O tarihten bugüne bilim insanları güneşten enerji üretebilmek için çeşitli yöntemler geliştirmişlerdir. İlk güneş enerjisi uygulamaları enerjiyi toplamada kullanılan, güneş ışınlarının geldiği yöne doğru hareket ettirilebilen kolektörlerdi. Bu cihazlar kullanılarak 18. yüzyılda demir ve bakır gibi metallerin eritildiği bilinmektedir. Fransız kimyacı Lavoisier 1774 yılında, devasa lensler içeren ve güneş ışığını toplayan bir cihaz geliştirmiştir. Bu cihazın güneşten soğurduğu ısının 1750°C olduğu kaydedilmiştir.

19. Yüzyıl boyunca güneş enerjisini farklı enerji türlerine dönüştürmek için birçok çalışma yapılmıştır. Bunlardan ilki August Mouchot tarafından gerçekleştirilmiştir. Mouchot tasarladığı parabolik aynalarla çalışan buhar makinası icat etmiştir. Şekil 2.4b'de 1878 yılında Paris Sergisinde yer alan Mouchout'un parabolik kolektörü verilmiştir.

1868 yılında Amerikalı mühendis Jhon Ericsson güneş enerjisiyle çalışan buhar makinesini geliştirmiştir. 1912 yılında, Frank Shuman, C.V. Boys iş birliği ile Nil nehrinden 5 saatlik periyotlarla su çeken 37-45 kW'lık pompayı parabolik aynalardan oluşturdukları güneş enerjisi sistemiyle çalıştırmışlardır (Kalogirou, 2013).

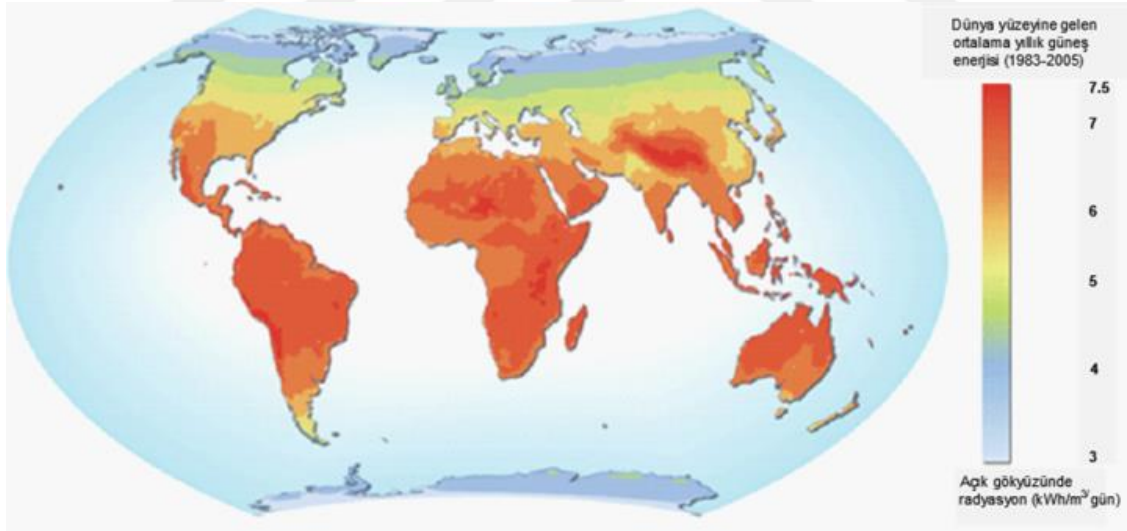
Bugün, dünya genelinde birçok büyük ölçekli güneş enerjisi santrali elektrik ve ısı enerjisi üretmektedir. Tarihte bilinen ilk ticari amaçlı güneş enerji santrali 1979 yılında ABD'nin New Mexico eyaletinin Albuquerque şehrinde kurulmuştur. Dünya'nın ikinci en eski güneş paneli tarlası Barstow, California'da 1985 yılında inşa edilmiştir. Bu tesisin güneş ışığı olmadığı zamanlarda dahi 7 MW enerji ürettiği bilinmektedir (Kalogirou, 2013).



Şekil 2.4: a) Tarihteki ilk güneş kolektörü b) Mouchot'un parabolik güneş kolektörü.

2.5. GÜNÜMÜZDE GÜNEŞ ENERJİSİ SİSTEMLERİNİN KULLANIMI

Dünya yüzeyine ulaşan güneş enerjisinin çok küçük bir kısmı dahi günümüz insanın günlük enerji ihtiyacından kat kat fazladır. Şekil 2.5'te Dünya'ya ulaşan ısı radyasyon haritası verilmiştir.

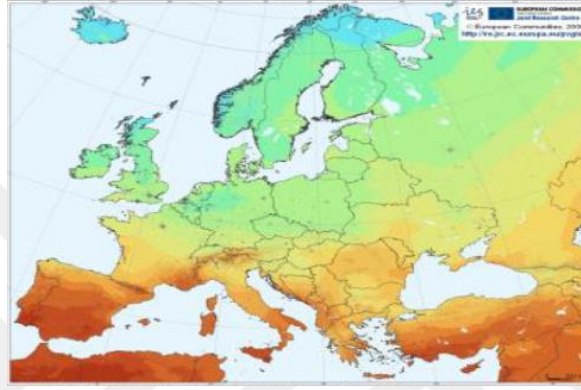


Şekil 2.5: Dünya radyasyon haritası (NASA, 2008).

Güneş enerjisinden güneş kolektörleri, güneş santralleri ve güneş pilleri (fotovoltaik piller) vasıtasıyla faydalanılır. IEA (2013), raporuna göre dünyada çapında geçtiğimiz on yıl içerisinde fotovoltaik güneş santrallerinden elektrik üretimi %50 oranında artmıştır. 2012 yılında fotovoltaik güneş enerjisi santrallerinin kapasitesi dünya genelinde %43 artarak 29,4 GW'a ulaşmıştır. Almanya bu tesislerin kurulması ve işletilmesi hususunda sağladığı geniş çaplı teşvik sayesinde 7,6 GW'lık artışla toplam kapasitesinin yaklaşık dörtte üçlük kısmını

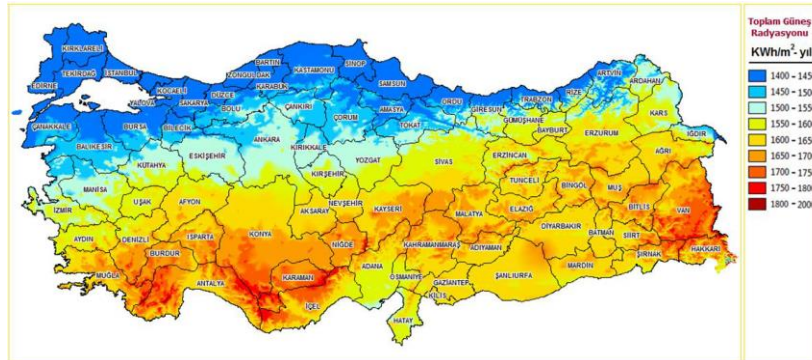
sağlamaktadır. 2012 yılında fotovoltaik enerji kapasitesindeki artış bakımından ülkeler İtalya (3,6 GW), Çin Halk Cumhuriyeti (3,5 GW), Amerika Birleşik Devletleri (3,3 GW), Japonya (2,0 GW) ve Hindistan (1,1 GW) yer almaktadır (IEA, 2013).

Türkiye sahip olduğu coğrafi konumu sayesinde “güneş kuşağı” içinde yer alır; dolayısıyla çok yüksek güneş enerjisi potansiyeline sahiptir. Şekil 2.6’da görüldüğü gibi ülkemiz Güney İspanya ve Güney İtalya ile beraber Avrupa kıtasının en çok güneş alan ülkesidir.



Şekil 2.6: Avrupa güneş enerjisi potansiyeli atlası (Çıkılı, 2017).

T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı tarafından hazırlanmış Türkiye Güneş Enerjisi Potansiyeli Atlası (GEPA) Şekil 2.7’de verilmiştir. Ülkenin yıllık ortalama güneşlenme süresi 2737 saat ve ülke yüzeyine gelen yıllık toplam güneş enerjisi $1527 \text{ kWh/m}^2\text{.yıl}$ ’dır. Ayrıca Türkiye yılda 110 gün yüksek güneş enerjisi potansiyeline sahiptir ve güneş ışığından enerji üretilmesi hususunda gerekli yatırım yapıldığı takdirde yılda ortalama 1100 kWh/m^2 enerji üretilcektir (Varınca ve Gönüllü, 2006).



Şekil 2.7: Türkiye güneş enerjisi potansiyeli atlası (GEPA, 2018).

Ülkemizde güneş enerjisi ölçümleri Devlet Meteoroloji işleri tarafından yapılmaktadır. Türkiye'nin en fazla güneş alan bölgeleri Şekil 2.7'de verilen Türkiye ışıyım haritasına ve Tablo 2.2'ye göre Güney Doğu Anadolu ve Akdeniz bölgesidir.

Tablo 2.2: Yıllık güneş enerjisi ve güneşlenme süresi değerleri (Varınca ve Gönüllü, 2006).

Bölge	Toplam Güneş Enerjisi (kWh/m ² -yıl)	Güneşlenme Süresi (Saat/yıl)
Güneydoğu Anadolu	1460	2993
Akdeniz	1390	2956
Doğu Anadolu	1365	2664
İç Anadolu	1314	2628
Ege	1304	2738
Marmara	1168	2409
Karadeniz	1120	1971

Türkiye'de güneş kolektörleri vasıtasıyla sıcak su üretimi yaygın olarak kullanılmakta olup (2010 yılında ülke genelinde yaklaşık 12×10^6 m² düzlemsel güneş kolektörü mevcuttur) bu kolektörlerin çoğu Akdeniz ve Ege bölgesinde bulunmaktadır. Güneş enerjisinden elektrik üretimi ise elektrik şebekesinin bulunmadığı, yerleşim yerlerinden uzak yerlerde, Telekom istasyonlarında, Orman Genel Müdürlüğü yangın gözeteme istasyonlarında, deniz fenerlerinde ve otoyol aydınlatmalarında yaklaşık 300kW kurulu güçle yaygın olarak kullanılmaktadır. Güneş enerjisinden elektrik üretimi ise yeni yeni uygulanmaya başlasa da devlet tarafından yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımını yaygınlaştırılması hususunda verilen teşvikler sayesinde gelişme sürecindedir.

2.5.1. Dünya'da Güneş Enerjisi Santralleri

Geçtiğimiz son on yıl içinde fotovoltaik sistemler vasıtasıyla elektrik üretimi dünya genelinde yaklaşık olarak %50 oranında artmıştır. International Energy Agency raporlarına göre 2012 yılında bu sistemlerden elde edilen elektrik enerjisinin 100TWh olduğu kaydedilmiştir. Ayrıca aynı yıl içerisinde kurulan güneş enerjisi santrallerinin kapasitesi %43 (29,4 GW) oranında artmıştır ki bu oran küresel enerji üretiminin yaklaşık olarak %15'ine denk gelmektedir (IEA, 2013).

Güneş tarlaları büyük alanlar kapladıkları ve modüler sistemler oldukları için dünyadaki birçok güneş enerjisi santralinin kurulu gücü 1-10 MW arasında değişmektedir (Çıkkılı, 2017). Fakat günümüzde inşası süren ve tamamlanmış daha büyük kapasiteli santraller de mevcuttur. Tablo 2.3 dünyadaki büyük ölçekli güneş enerjisi santralleri ve kapasiteleri verilmiştir.

Tablo 2.3: Dünyadaki büyük kapasiteli güneş santralleri.

Adı	Ülke	Kurulu Güç (MW)	Faaliyete Geçtiği Tarih
Tengger Desert Solar Park	Çin	1547	2016
Datong Solar Power Top Runner Base	Çin	1000	2016
Kurnool Ultra Mega Solar Park	Hindistan	1000	2017
Longyangxia Dam Solar Park	Çin	850	2015
Bhadla Solar Park	Hindistan	746	2017
Kamuthi Solar Power Project	Hindistan	648	2016
Pavagada Solar Park	Hindistan	600	2017
Solar Star (I and II)	ABD	579	2015
Topaz Solar Farm	ABD	550	2014
Copper Mountain Solar Facility	ABD	552	2015
Desert Sunlight Solar Farm	ABD	550	2015
Huanghe Hydropower Golmud Solar Park	Çin	500	2014
Mesquite Solar project	ABD	400	2013
Quaid-e-Azam Solar Park	Pakistan	400	2015
Yanchi Solar Park	Çin	380	2016
Charanka Solar Park	Hindistan	345	2012
Springbok Solar Farm	ABD	328	2016
Cestas Solar Farm	Fransa	300	2015
Stateline Solar	ABD	300	2016
Nova Olinda Solar Farm	Brazilya	292	2017

2.5.2. Türkiye’de Güneş Enerjisi Santralleri

T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı’nın internet sayfasında belirtildiği üzere ülkemizde 2012 yılında toplam kurulu güneş enerjisi tarlası alanı yaklaşık 18.640.000 m² olarak hesaplanmıştır. Türkiye’deki mevcut en büyük güneş enerjisi santrali, yıllık olarak toplamda 30.730.000 kWh elektrik enerjisi üreten Kızören Güneş Enerjisi Santrali’dir. Bu santral Konya ilimizde toplamda 430.000 m²’lik alana kurulmuştur ve santralin mevcut kurulu gücü 18.500 kWp’dır. Tablo 2.4’te santrale ait bilgiler verilmektedir.

Tablo 2.4: Kızören güneş enerjisi santrali.

Yer	Konya
Montaj Tipi	Zemin
Alan (m ²)	430.000
Kurulu Güç (kWp)	18.500
Yıllık Öngörülen Üretim Miktarı (kWh)	30.730.000
Engellenen CO ₂ Miktarı (ton)	18.702.00
Kurtarılan Ağaç Sayısı (adet)	45.505
PV Modül Sayısı	74.106
İnşaat Süresi	8 ay

Cihanbeyli Güneş Enerjisi Santrali, Konya ilimizde kurulumu tamamlanmış 12.000 kWp kapasiteli ve yıllık olarak toplam 19.944.000 kWh elektrik üretimi gerçekleştiren 200.000 m²'lik alana kurulmuş büyük ölçekli santrallerimizden birisidir.

Ülkemizde inşa edilmiş diğer tipik bir arazi montajlı güneş paneli uygulamasına Gaziantep'te 10.000 m² alana TAD Piliç için kurulan güneş enerjisi tarlası örnek verilebilir. Bu santral 250 kWp güce sahip toplamda 2000 adet güneş paneli içermektedir. Santralin yılda 800.000 kWh elektrik enerjisi üreteceği tahmin edilmektedir.



Şekil 2.8: Kızören güneş enerjisi santrali.

2.6. GÜNEŞ ENERJİSİ SİTEMLERİ

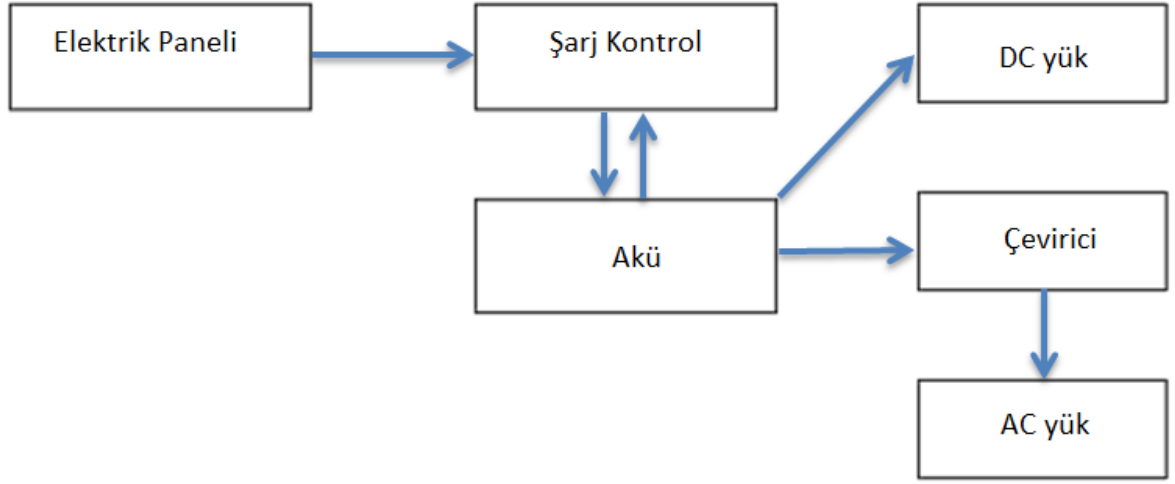
Güneş enerjisi sistemleri vasıtasıyla ısıtma, soğutma ve elektrik üretimi işlemleri gerçekleştirilir. Soğutma işlemleri için güneş enerjisi kullanımı günümüzde maliyetli bir teknoloji olduğu için sıklıkla tercih edilmese de güneş enerjisi ile sıcak su ve elektrik üretimi gün geçtikçe gelişmektedir.

Güneş enerjisinden elektrik üretimi doğrudan ve dolaylı olmak üzere iki ayrı teknikle gerçekleştirilir. Doğrudan elektrik üretimi kapsamında fotovoltanik, termoelektrik ve iyonik çeviriciler yer almaktadır. Dolaylı yöntemde ise güneş enerjisi kullanarak elde edilen buhar gücü ile gene güneş enerjisi kullanılarak elde hidrojenin kullanıldığı termik elektrik üreticilerle yakıt pilleri yer alır (Girgin, 2011).

2.6.1. Fotovoltaik (PV) Santraller

Fotovoltaik sözcüğü, Latince'de “ışık enerjisi taşıyan kuantum birimi” anlamına gelen foton (*photon*) kelimesiyle voltaj üreten anlamına gelen voltaik kelimelerinin bir araya getirilmesiyle oluşturulmuştur. Fotovoltaik sistemler (PV) soğurulan güneş ışığının doğrudan

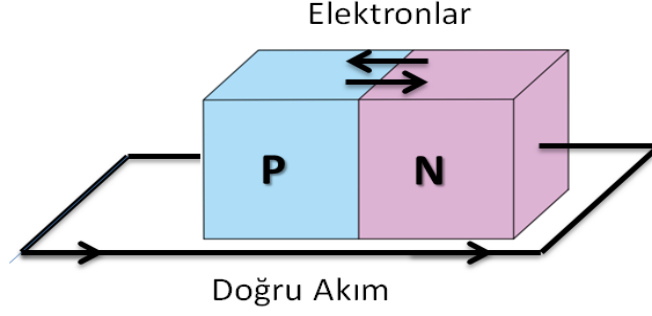
elektrik enerjisine çevrilmesi prensibine dayanır. Bu sistemler basitçe elektrik üretiminin gerçekleştiği güneş panelleri, elektrik enerjisini depolayan solar aküler, sistemdeki voltaj değişimini dengeleyen şarj kontrol cihazları ve çeviricilerden meydana gelir. Ayrıca bu santrallerin güvenli çalışabilmesi için bazı ek donanımlar; cihazların bağlandığı kablolar, sigorta ve diyotlar, akü dolabı, panel montaj malzemeleri, güç izleyicileri ve çeşitli sayaçlar gibi yardımcı elemanlar da kullanılmaktadır.



Şekil 2.9: PV sistemi oluşturulan elamanlar (Altaş, 1998).

PV sistemlerde güneş ışığını elektrik enerjisine çevirme işlemi fotoelektrik olay prensibiyle çalışan güneş pilleri vasıtasıyla gerçekleştirilir. Fotovoltaik güneş hücrelerinin yüzeyleri kare, dikdörtgen ya da daire şeklinde olabilir. Boyutları genellikle 125×125 mm veya 156×156 mm olabilirken kalınlıkları 0,15-0,20 mm arasında değişmektedir. Fotovoltaik ilke gereği bu sistemlerin üzerine ışık düştüğünde elektrik gerilimi oluşmaktadır (Girgin, 2011).

Güneş hücreleri birbirlerine paralel ya da seri olarak bağlanarak ürettikleri güç miktarı artırılabilir. Bu sistemler algıladıkları foton enerjisinden eşit sayıda pozitif ve negatif yükler üretir. Bu yükler fotovoltaj ve fotoakım üretilmek üzere ayrıştırılır. Güneş pili imalatında, bahsi geçen ayrıştırma işlemini gerçekleştirmek için yarı iletken özelliğe sahip Silikon, Bakır-Kadmium Sülfat, Galyum-Arsenit, Kadmium Tellür gibi anorganik malzemeler kullanılır. Bu pillerinin çalışma prensibi pozitif-negatif bileşimli bir diyodun çalışmasına prensibiyle aynıdır (Altaş, 1998). Elektron geçişi, yarı-iletken malzemelerin üzerine güneş ışığı geldiği takdirde başlar; fakat bu geçişin gerçekleşmesi için güneş pillerinin N ya da P tipi (negatif ve pozitif) olarak katılanması gerekir. N katmanından çıkan elektronlar bir dış devre üzerinden P katmanına geri döner.



Şekil 2.10: P-N Birleşimli diyot (Altaş, 1998).

Şekil 2.10'da görülebileceği gibi yarı-iletkenin diyot P ve N tipi iki yarı-iletkenin birleştirilmesiyle oluşturulur. Yarı iletkenin hangi tip (P ya da N) olacağı saf yarı-iletken eriyik içine kontrollü olarak eklenen katkı maddesine bağlıdır. Örneğin, güneş panellerinde en sık kullanılan yarı-iletken olan silisyumdan bir P tipi taşıyıcı elde etmek için silisyum eriyiğine belirli miktarda Boron eklenir. Aynı şekilde N tipi bir yarı iletken elde etmek için saf silikon eriyiğine bir miktar Fosfor eklenir. Bu işlemler tamamlandıktan sonra Fosfor eklenen silikon parçasında serbest elektronlar oluşurken, Boron eklenen parça da ise boşluklar (delikler) oluşur. Bu iki tabaka bir araya getirilmeden önce doğal yüklü durumdadır (her parça kendi doğal atom ve elektron sayılarına sahiptir); fakat birleştirildikten sonra N tipindeki elektronlar P tipine doğru akmaya başlarken, P tipindeki boşluklar N tipi parçaya akmaya başlar. Bu akışın meydana getirdiği dengesizlik N tipi malzemede valans elektron kaybına ve dolayısıyla net bir pozitif yük oluşmasına neden olur. P tipi malzemede de elektron sayısı arttığı için negatif yüklenme söz konusudur. Bu durum birleşme noktalarında sınır potansiyeli denilen fazla elektronun N'den P'ye geçişini engelleyen küçük bir gerilim oluşmasını sağlar. Bu tabaka sayesinde bu bölgedeki tüm serbest elektron ve delikler bu bölgenin dışına itilir (Altaş, 1998).

Bir P-N diyotundan enerji üretilmesi için bir miktar ışık ya da foton Silikon güneş pili üzerine düşmelidir. Bu durum pilin valans bandında bir elektron oluşturacak ve bu elektron termik enerji harcayarak yukarı doğru hareket edecektir. Dış devre metal bağlantılarla kapatıldığı takdirde, eğer bir elektrik tüketici sisteme bağlandıysa doğru akım (DC) meydana gelecektir.

2.7. GÜNEŞ PANELLERİNİN KURULUMU

Güneş panelleri, açık araziler, binalar, otoparklarda ve aydınlatma sistemleri ve hatta köprülere dahi kurulmaktadır (Şekil 2.11). Örneğin, Londra'da Thames Nehri üzerinde

bulunan Victoria dönemine ait Blackfriars Köprüsü, üzerinde bulunan 4400 tane güneş paneli 2014 yılından beri elektrik üretimine hizmet vermektedir.



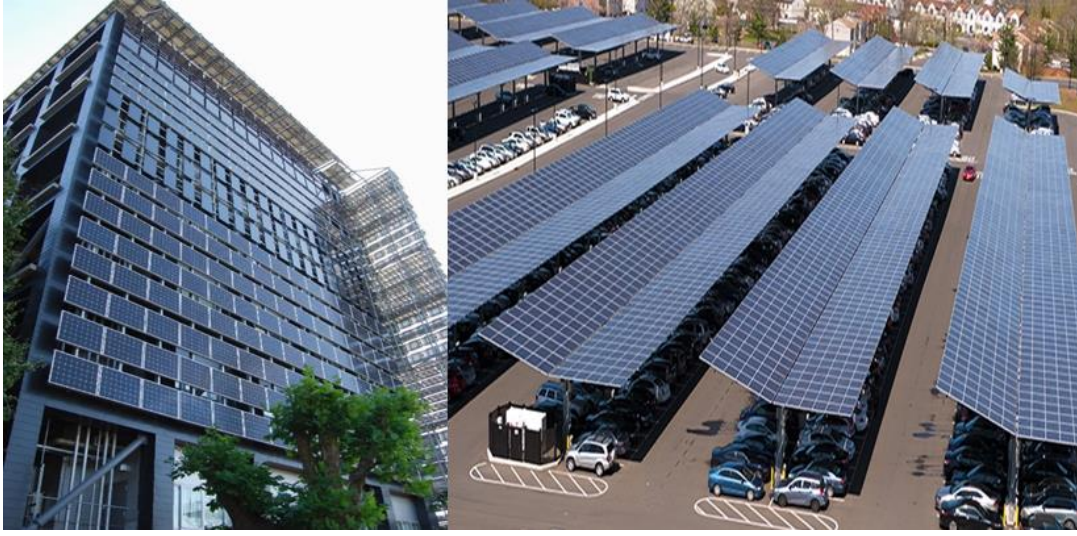
Şekil 2.11: Londra’da elektrik üreten güneş panellerine sahip Blackfriars Köprüsü.

Panellerin tasarımında, taşıyıcı sistemler için monte edilecekleri yere bağlı olarak özel tasarlanmış yapı elemanları kullanılır. Bölgenin coğrafi, iklimsel koşulları ile yapının servis ömrü boyunca maruz kalacağı yükler taşıyıcı sisteminin tasarımında ve seçiminde önemli kısıtlaslardır. Taşıyıcı elemanlar galvanizli çelik, alüminyum, paslanmaz çelik, ahşap ve kompozit malzemelerden üretilebilir. Güneş panellerin yerleşeceği bölgenin eğimi, topografik özellikleri ve güneş ışığından en uzun sürede faydalanabileceği doğrultunun belirlenmesi önemlidir. Çünkü panellerin güneş enerjisini en etkili şekilde absorbe etmesini sağlamak en önemli amaçtır (Çıkılı, 2017).

Güneş panelleri güneş ışığının doğrultusuna bağlı olarak binaların çatı ve cephelerine monte edilebilir. Örneğin eğimli çatılarda, çatı örtü malzemesi ya da çatı örtüsüne ek olarak, teras çatılarda ise yine teras çatı örtüsü ya da testere dişi olarak kurulabilirler (Şekil 2.12). Bina cephelerine ise kaplama malzemesi olarak ya da ek strüktürler ile monte edilebilir.



Şekil 2.12: Eğimli bir çatıya kurulmuş güneş panel sistemi.



Şekil 2.13: Güneş paneli sistemlerin kuruldukları yerlere örnekler.

2.8. GÜNEŞ PANELLERİNDE KULLANILAN TEMEL TÜRLERİ

Günümüzde açık arazilere inşa edilen güneş paneli sistemleri, çatılara kurulan güneş paneli sistemlerine alternatif olarak tercih edilmektedir. Güneş enerjisi tarlaları iki farklı şekilde inşa edilmektedir:

1. Alçak montaj sistemleri,
2. Yüksek montaj sistemleri.

Alçak sistemlerde paneller zemine mümkün oldukça yakın yerleştirilir. Yüksek montaj sistemlerde ise panellerin alt bölgesinin tarım ve hayvancılık faaliyetleri açısından aktif olarak kullanılabilmesi için panellerin oturacağı kolonların söz konusu aktivitelere uygun olarak tasarlanması sağlanır (Lutenegger, 2016).

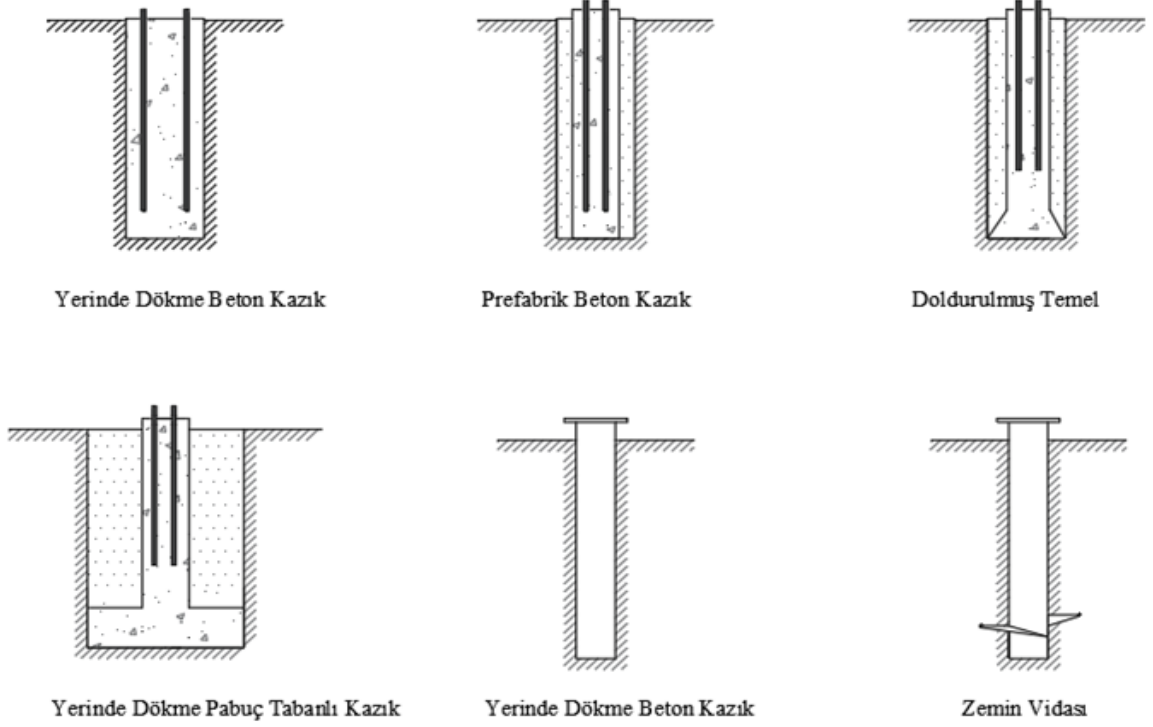


Şekil 2.14: Alçak ve yüksek montaj sistemlerine örnekler.

Güneş panellerinin temel sistemlerinin dizaynında birçok tasarımcının göz önünde bulundurduğu ilk kıstas basınç ve eğilme davranışıdır; fakat açık arazilere kurulmuş ve diğer yapılara kıyasla nispeten çok daha hafif malzemeler kullanılarak inşa edilen güneş panelleri için rüzgâr yükünün (*uplift force*) kaldırma etkisi tasarımda ele alınması gereken en önemli kriter olmalıdır (Lutenegger, 2012, 2016). Dolayısıyla güneş panellerinin geoteknik tasarımı yapılırken rüzgâr kaldırma kuvvetine direnebilecek gerilme kapasitesi olan temel sistemlerini oluşturmak önemlidir. Küçük ölçekli güneş paneli sistemlerinin gelişimi bu sistemleri destekleyecek ekonomik ve dayanıklı temel sistemlerinin geliştirilmesini zorunlu kılmıştır. Yapısal yüklerin zemine aktarılması amacıyla kullanılan temeller, yapısal yükleri desteklemeli ve montajın yapılacağı saha koşullarına (zemin özellikleri, yer altı suyu, donma ve çözülme, vb.) uygun olmalıdır. Söz konusu koşullara bağlı olarak aşağıda verilen temel tipleri güneş panellerinin tasarımında seçilebilir:

1. Yerinde dökme betonarme kazıklar,
2. Kazılıp geri doldurulan prefabrik beton kazıklar,
3. Kazılıp geri doldurulan yerinde dökme beton kazıklar,
4. Yerinde dökme sığ pabuç temeller,
5. Prefabrik sığ pabuç temeller,
6. Çakma kazıklar,
7. Helisel kazıklar.

Şekil 2.15'te güneş panellerinde sıklıkla kullanılan temel türleri verilmiştir. Bu temel çeşitleri güneş enerji üretim tesisleri için kullanılan özel temel sistemleri olmayıp yapı endüstrisinde diğer uygulamalar için de tercih edilebilir.



Şekil 2.15: Güneş paneli sistemlerinde kullanılan temel türleri (Lutenegger, 2016).

Bu çalışmada analizi yapılan kazık sistemleri kare plakalar içerdiği için, helisel plakalar kısmı Bölüm 2.9'da detaylı bir şekilde açıklanacaktır. Bu bölümde ilk 6 kazık grubu için genel tanımlamalar verilmiştir.

2.8.1. Yerinde Dökme Beton Kazıklar

Yanal ve eksenel yüklere sıklıkla maruz kalan kazıklar için bu yöntem sıklıkla tercih edilir. Betonarme yerinde dökme kazıkların birçok farklı çeşidi ve uygulanma yöntemi vardır. Örneğin bu tip kazıklar imal edilirken kaplama borusu zemin içinde bırakılabileceği gibi eğer kazık boyu kısa ve maruz kalacağı yükler az ise kaplama borusu zeminden çıkarıldıktan sonra açılan boşluğa donatı yerleştirilip betonlama işlemi yapılarak da gerçekleştirilir (Kant, 2003).

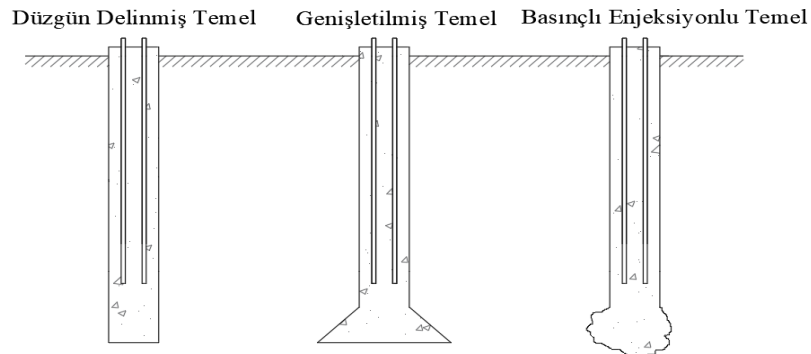


Şekil 2.16: Güneş panellerinde kullanılan yerinde dökme kazıkar (Lutenegger, 2016).

Güneş panellerinin inşasında kullanılacak yerinde dökme betonarme kazıkların seçiminde zeminin geoteknik özellikleri, yük koşulları ve kazığın imal olanakları önemli rol oynar. Bu kazıklar imal edilirken donatı kazık çukurunun içine konulan donatı kafesinin içine kazık donatıları yerleştirilir. Beton dökümü işi tremi borusu ile kazık dibinden başlanarak ya da beton pompası kullanılarak yapılabilir (Toğrol ve Tan, 2009).

Küçük ölçekli güneş paneli sistemlerinde, gömme derinliği genellikle sığ olduğundan (3 m'den az) delme işlemi kolay gerçekleşir dolayısıyla kurulumu kolay olan yerinde dökme betonarme kazıklar, diğer kazık türlerine göre daha yaygın bir tekniktir. Zemin türüne bağlı olarak istenen boyutlarda imal edilir. Rüzgârın kaldırma etkisine kazık ve zemin ara yüzünde meydana gelen çevre sürtünmesi ile kazığın kendi ağırlığı direnir (Lutenegger, 2016).

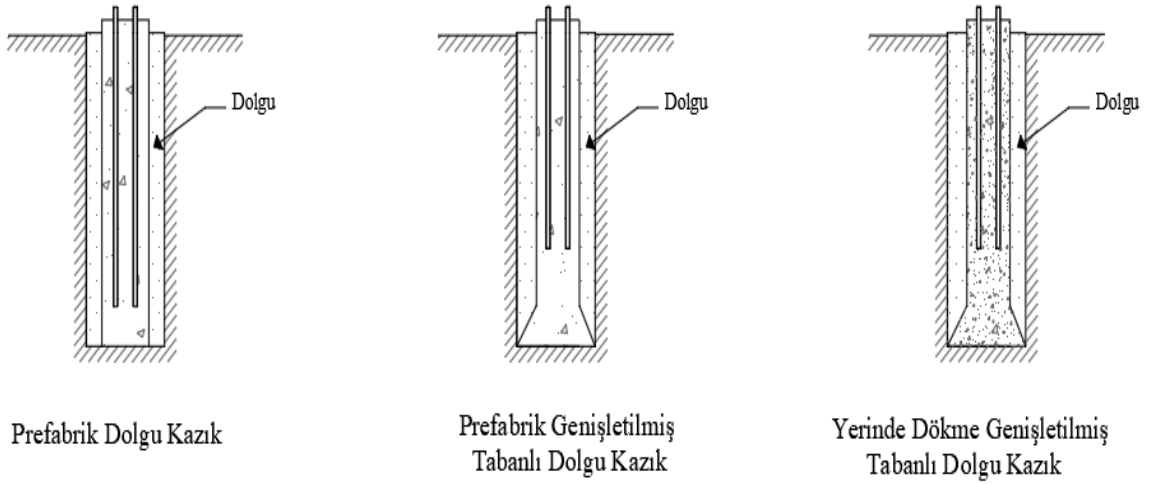
Yerinde dökme betonarme kazıkların tabanları düz, genişletilmiş ya da basınç enjeksiyon (*Pressure Injected Footings*) tekniği ile üretilmiş olabilir (Şekil 2.17). Genişletilmiş tabanlı kazıklar rüzgârın kaldırma kuvvetinin etkili olduğu bölgelerde kurulacağı zemin şartları uygunsa (katı ve orta katı killi zeminler) tercih edilebilir (Lutenegger, 2016).



Şekil 2.17: Güneş panellerinde kullanılan farklı beton kazıklar (Lutenegger, 2016).

2.8.2. Prefabrik ve Yerinde Dökme Dolgulu Kazıklar

Bu temel sistemlerinin imalatında geleneksel yerinde dökme betonarme kazıklardan farklı olarak kazığın yeri oyulur. Bu yöntemle temel imalatı iki şekilde gerçekleşir: Kazık için açılmış oyuğa fabrika ortamında istenilen şekillerde imal edilmiş prefabrik kazık yerleştirilir ya da oyuk içine yerleştirilen tek kullanımlık kaplama borusu içerisine beton dökülür ve priz alması beklenir. Her iki yöntemde de kazık çevresindeki boşluk, uygun bir dolgu zeminiyle doldurulur. Bu yöntem güneş tarlasının kurulacağı zeminin koşulları zayıfsa kontrollü mühendislik dolgusu ile zemin güçlendirilmesi açısından önemlidir (Lutenegger, 2016). Bu yöntem yerinde dökme kazık imalatına göre süre açısından daha uygundur ayrıca rüzgârın kaldırma kuvvetinin etkili olduğu bölgeler için prefabrik üretim yapan firmalar genişletilmiş tabanlı kazıklar da imal edebilmektedir.



Şekil 2.18: Güneş enerjisi sistemlerinde kullanılan prefabrik kazıklar (Lutenegger, 2016).

2.8.3. Yerinde Dökme Pabuç Temel

Güneş panel sistemlerinde bu tür temeller sağlam zemin tabakasına ulaşmak için kazık kullanımının gerekmediği durumlarda tercih edilir. İnşaatı tekil temellere benzemektedir. Yerinde dökme betonarme olarak üretilen bu temeller için zemin yüzeyine yakın çukurlar açılır ve ayaklar bu çukurlarda imal edilir. Gerekliyse pabuçlar kuşak kirişleri ile birbirine bağlanabilir. Rüzgârın kaldırma etkisi zemin dolgusuyla önlenir (Lutenegger, 2016).

2.8.4. Çakma Kazıklar

Güneş tarlalarının geoteknik tasarımında uygulama ve imalat kolaylığı sayesinde çakma kazıklar sıklıkla tercih edilir. Bu yapıların inşasında saha koşulları ve maliyete bağlı olarak

çakma kazık uygulamalarında çelik profiller, beton, prefabrik beton ya da ahşap elemanlar kullanılabilir.

Montajı zemine yapılan güneş panellerinin temel imalatı çakma kazık tekniği ile yapılıyorsa genellikle çelik elemanlar (Boru tipi, H-tipi, C-tipi ya da kutu tipi profiller) tercih edilmektedir. Güneş panel sistemlerinde kullanılan çelik boruların çapları genellikle 4-8 inç arasında değişmektedir. H-tipi kazıklar ise 6-10 inç arasında imal edilen W tipi profillerden yapılmaktadır (Lutenegger, 2016).

Çelik kazıkların kullanımında bu profillerin korozyona uğrama eğilimleri göz ardı edilmemelidir. Çelik profiller örselenmiş veya dolgu zeminlere çakılıyorsa korozyon riski söz konusudur; çünkü zemin yüzeyine yakın tabakalarda bulunan örselenmiş zeminde oksijen miktarı alt tabakalara göre (zemin yüzeyinden 1-2 m daha derin) daha fazladır. Güneş panellerinin kazık boyları genellikle sığ olarak tasarlanmaktadır. Dolayısıyla korozyon riski altında olan çelik temellerin, yapının servis ömrü göz önüne alınarak galvanizlenmesi ya da diğer korozyon önleyici yöntemlerin uygulanması gerekir.

Beton çakma kazıklar ise kazık dökülmesine elverişli bir yerde hazırlanıp ardından sahaya sevk edilir. Bu kazıklar büyük yükleri yumuşak ya da gevşek zemin tabakaları altındaki sağlam zemine iletmede oldukça elverişlidir. Kare, daire ya da sekizgen olarak imal edilebilen bu elemanların boy ve çapları imal ve çakım olanaklarına bağlı olarak seçilir.

Betonarme çakma kazıklar, prefabrik olarak da imal edilebilir. Bu tip kazıklar fabrika ortamında imal edildikleri için yüksek mukavemet/ağırlık oranına sahiptir; ayrıca çakma işlemleri esnasında meydana gelebilecek deformasyonlar kazığın öngerilme özelliği sayesinde indirgenebilmektedir. Prefabrik kazıklar uzun servis ömrüne sahip olmaları ve maliyetleri açısından güneş panelleri temel sistemleri için çelik profillere uygun bir alternatiftir.

2.8.5. Zemin Vidaları

Bu kazıklarda helisel kazıklar gibi düşük maliyetli ve yüksek dayanımlı olduğu için güneş tarlası projelerinde, prefabrik ev inşaatlarında, aydınlatmalarda sıklıkla tercih edilir. Diğer kazık imalat yöntemleriyle kıyaslandığında vidaların montajı kolay ve imalatı hızlıdır. Bu elemanların kullanımıyla ilgili en önemli problem korozyona uğrama ihtimalidir. Bu nedenle vidalar fabrika ortamında üretildikten sonra çinko ile galvanizlenir.



Şekil 2.19: Zemin vidası.

2.9. HELİSEL KAZIKLAR

Helisel kazıklar üst yapıyı desteklemek amacıyla zemin içine rotasyonla ilerletilen genellikle çelik malzemeden üretilen kazıklardır. Helisel temel sistemleri vidalı kazıklar, helisel kazıklar, helisel ankrajlar gibi farklı terimlerle ifade edilse de genel anlamda her biri benzer yapısal sistemlerdir. Kazık boyu ve tasarım kriterleri sebebiyle bu tip kazıklar farklı isimler almaktadır. Örneğin, bir helisel temel sistemi öncelikli olarak çekme yüklerine maruz kalacaksa *helisel ankraj*, eğer sığ bir kazık olarak imal edilecekse *helisel çubuk* ya da derin bir temel imal edilmek isteniyorsa *helisel kazık* olarak adlandırılır (Young, 2012).

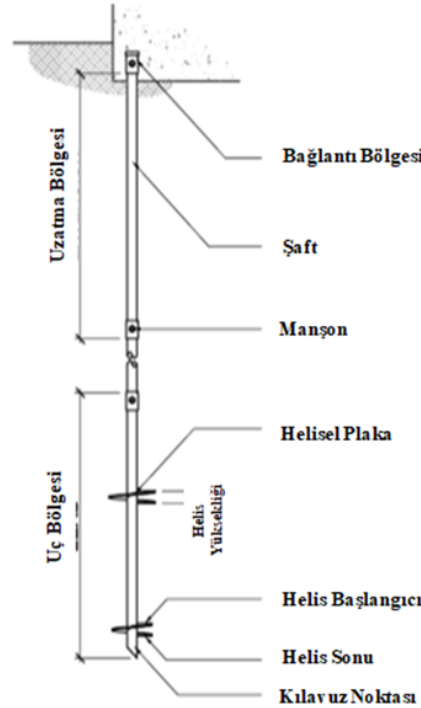
Günümüzde güneş panellerinin destek sistemlerinde rüzgâr kuvvetlerinden doğan çekmeye karşı dayanımları sayesinde helisel kazıklar sıklıkla tercih edilmektedir. Bu çalışma kapsamında yapılan analizlerde kare plakalı içeren kazıkların analizi yapıldığı için bu bölümde helisel kazıklar ile ilgili detaylı bilgi verilecektir.

Şekil 2.20’de görüldüğü gibi basit bir helisel kazık uç kısım ve uzatma bölgesi olmak üzere iki temel kısımdan oluşur. Taşıma plakaları kazığın uç bölgesinde yer alır. Uç bölge zemine ilk giren kısımdır. Eğer kazığın daha derin tabakalara inmesi isteniyorsa uzatma elemanları da eklenebilir. Bir helisel kazıkta bir ya da birden çok helisel plaka bulunabilir.

Helisel kazıklar birçok farklı zemin türünde uygulanabildikleri için tercih edilirler. Killerde, siltlerde, kum ve çakıllarda, şişme potansiyeli olan zeminlerde, çökebilen zeminlerde, donmuş

zeminlerde ve güneş paneli sistemlerinin çoğunlukla inşa edildiği geoteknik özellikleri değişiklik gösteren ya da bilinmeyen dolgu alanlarında kullanılabilirler.

Helisel kazıklar basınç ve çekmeye karşı çalışabilmesi, kurulum kolaylığı, farklı iklim koşullarında imal edilebilir olması, çevre dostu olması ve maliyet açısından diğer kazık türlerine göre bir adım önde yer alır. Örneğin, sahada helisel kazıkların imalat aşamasında kullanılan makinelerin manevra kabiliyeti çakma kazık imalatında kullanılan makinelerden daha fazladır. Portatif ya da elle çalıştırılabilen ekipmanlar helisel kazıkların zemine montajı esnasında kullanılabilir. Kurulumu oldukça hızlıdır. İmalatı esnasında aşırı titreşim ve gürültü söz konusu değildir. Dolayısıyla çevredeki yapılar kurulum esnasındaki titreşimden etkilenmediği gibi bu kazıkların imalatı gürültü kirliliğine de neden olmaz. Her türlü iklimsel koşulda rahatça imal edilebilir. Ayrıca bu kazıkların imalatında artık malzeme de oluşmaz. Bu kazıklar eğer gerekiyorsa geçici olarak imal edilip işlevi tamamlandıktan sonra zeminden çıkarılabilir. Korozyona karşı yapılması gereken galvaniz kaplama dışında herhangi bir bakım, kalıp ya da donatı maliyeti söz konusu değildir. Yer altı suyunun olduğu bölgelerde herhangi bir kılıf kullanmadan imal edilebilir (Yılmaz, 2016).



Şekil 2.20: Helisel kazık elemanları (Birand, 2001).



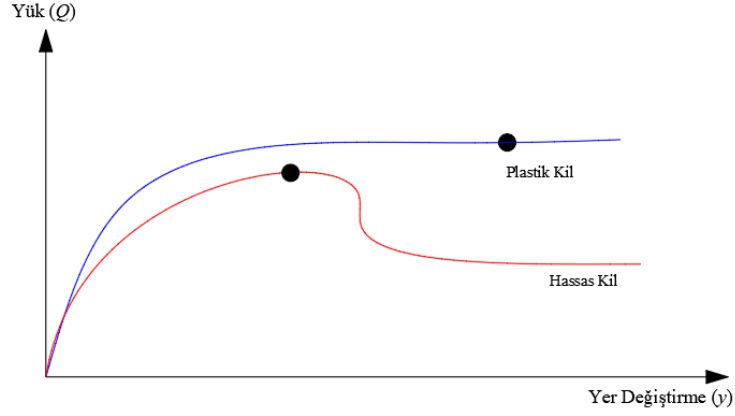
Şekil 2.21: Helisel kazık imalatı.

Güneş paneli sistemlerinde kullanılacak helisel kazıklar için muhtemel yükler altında kazığın direncini gözlemleyebilmek ve helisel kısmın gömme derinliğini belirlemek için eksenel ve yanal yükleme testleri uygulanmalıdır.

2.9.1. Tek Plakalı ve Helisel Ankrajların Çekme Yükleri Altında Mekanik Davranışı

Helisel ankrajların çekme kuvvetlerine karşı davranışı, kullanılan kazık profiline, gömme derinliğine, zemin gerilmelerine ve zemin özelliklerine bağlıdır. Plaka geometrisinin dayanıma etkisi ise ihmal edilebilir (Young, 2012). Örneğin, Merifield (2011), dairesel plakalı ankrajlar ile kare plakalı ankrajların çekme yükleri altında benzer şekilde şekil değiştirme gösterip yenildiklerini belirtmiştir.

Helisel ankrajlarda yenilme yükü, sistemin dayanabileceği maksimum çekme yükü olarak tanımlanabilir. Eğer helisel kazık sistemi killi bir zeminde imal ediliyorsa, kazığın çekme kapasitesini zeminin dranjızsız kayma mukavemeti, S_u ile en üst plakada çekmeye karşı meydana gelen taşıma gücü belirler (Mooney vd., 1985). Çünkü S_u , kazığın yukarı yöndeki hareketine ters yönde bir direnç sağlayacaktır. Şekil 2.22’de farklı kil zeminlerde imal edilmiş helisel ankrajların yenilme davranışı verilmiştir (Young, 2012). Şekilde noktalar kırılmanın gerçekleştiği deplasmanı temsil etmektedir. Mooney vd., (1985) hassas killerde imal edilen helisel kazıkların çekme altında dayanımı hesaplanırken kazık imalatı esnasında S_u ’da meydana gelecek azalmanın göz ardı edilmemesi gerektiğini belirtmiştir.

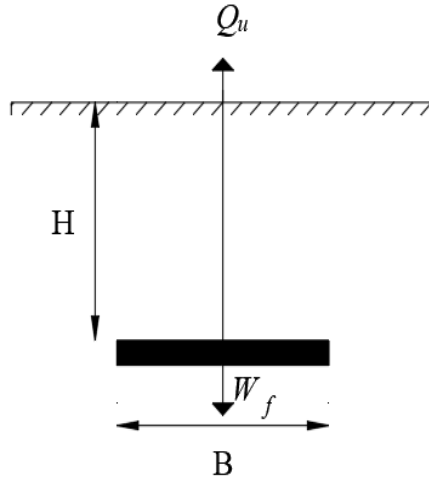


Şekil 2.22: Plakalı ankrajların çekme yükü altında davranışı (Young, 2012).

Tek plakalı düşey ve yatay ankrajların çekme yükleri altında davranışı ise literatürde birçok araştırmacı tarafından incelenmiştir (Das, 1978; Merifield vd., 2003; Meyerhof ve Adams, 1968; Vesic, 1971).

Das (1978) Şekil 2.23'teki gibi bir temel sisteminin çekme dayanımını Denklem 2.1 gibi tanımlamıştır. Denklemden Q_u değeri kazığın net çekme dayanımı, Q_0 brüt çekme dayanımı (*gross ultimate pull out load*), W_f temelin kendi ağırlığıdır (Das, 1978, 1980).

$$Q_0 = Q_u - W_f \quad (2.1)$$



Şekil 2.23: Çekme gerilmesine maruz kalan ankraj sistemi (Das, 1978).

Killi zeminlerde plakalı tekil kazığın net çekme dayanımı boyutsuz yenilme faktörü F_c , türünden Denklem 2.2 gibi yazılabilir (Vesic, 1961).

$$q_0 = \frac{Q_0}{A} = S_u F_c \quad (2.2)$$

Denklemdede yer alan A plaka yüzey alanıdır. Yenilme faktörü F_c , plaka şekline ve gömme derinliğine bağlıdır (Vesic, 1971).

Gerçekte kilin drenajsız kayma mukavemeti anizotropiktir ve homojen özellikte değildir; fakat aşağıda verilen yaklaşımda killi zeminin drenajsız kayma gerilmesinin homojen ve izotropik olduğu kabulü yapılarak yenilme faktörü iki ayrı durum için hesaplanabilir (Merifield vd., 2003):

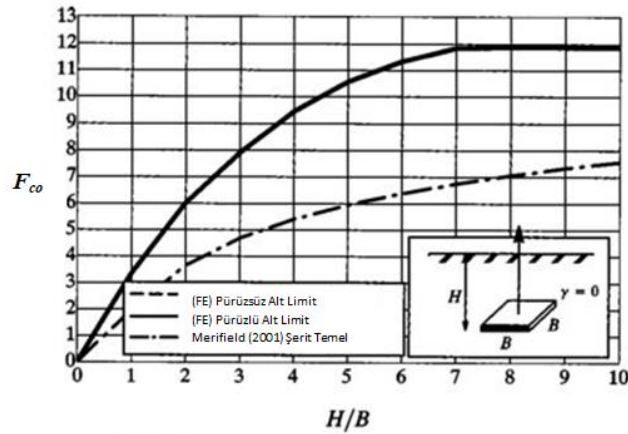
1. Birim hacim ağırlığının sıfıra eşit olan homojen zemin kabulü:

$$F_c = F_{c0} = \left(\frac{q_u}{S_u} \right)_{\gamma=0} \quad (2.3)$$

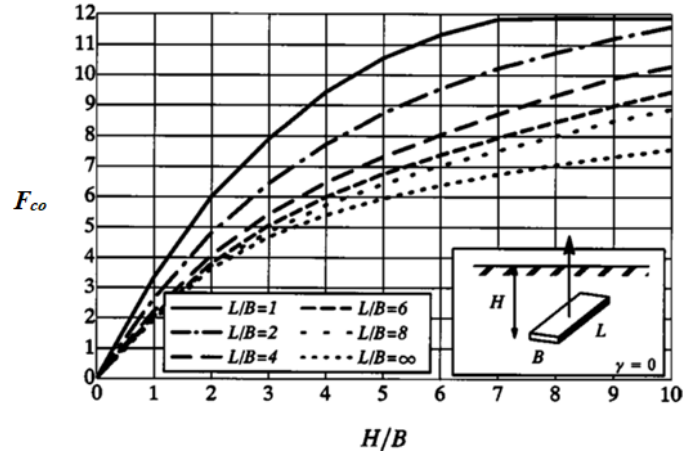
2. Birim hacim ağırlığı sıfırdan farklı homojen zemin kabulü:

$$F_c = F_{c\gamma} = F_{c0} + \frac{\gamma H}{S_u} \quad (2.4)$$

Şekil 2.24'te Merifield vd., (2003) tarafından zeminin birim hacim ağırlığının sıfıra eşit olduğu kabulüyle kare plakalı kazıklar için sonlu elemanlar yöntemiyle elde edilen kırılma faktörü değerlerinin alt limit değerleri verilmiştir. Şekil 2.25'te ise farklı boyuttaki plakalar için verilmiş kırılma faktörü eğrileri verilmiştir (Merifield vd., 2003).



Şekil 2.24: $\gamma_s=0$ için kırılma faktörü (Merifield, 2011).



Şekil 2.25: $\gamma_s=0$ için farklı zeminlerde kırılma faktörü (Merifield, 2011).

Yenilme faktörü F_c gömme oranı olarak ifade edilen H/B değeri (gömme derinliği/plaka boyutu) ile doğru orantılıdır. Kritik bir gömme derinliğine $((H/B)_{cr})$ ulaşıldıktan sonra plakalı sistemde yenilme, bölgesel olarak gerçekleşir ve boyutsuz F_c faktörü $(H/B)_{cr}$ değerinin ötesindeki tüm gömme oranlarında sabit kalır. Kritik gömme boyu, en üstte bulunan plaka üzerindeki zemin konisinin ağırlığının ankrajda yukarı yönde harekete neden olan çekme kuvvetlerini dengelediği derinliktir. Vesic (1971), gömme derinliği $(H/B)_{cr}$ 'den küçük olan temel sistemleri için Tablo 2.5'teki teorik değerleri önermiştir

Tablo 2.5: Killerde sıg temeller için F_c değerleri ($\phi = 0$) (Das, 1978).

H/B	0,5	1,0	1,5	2,5	5,0
Dairesel	1,76	3,8	6,12	11,6	30,3
Mütemadi B/L=0	0,81	1,61	2,42	4,04	8,07

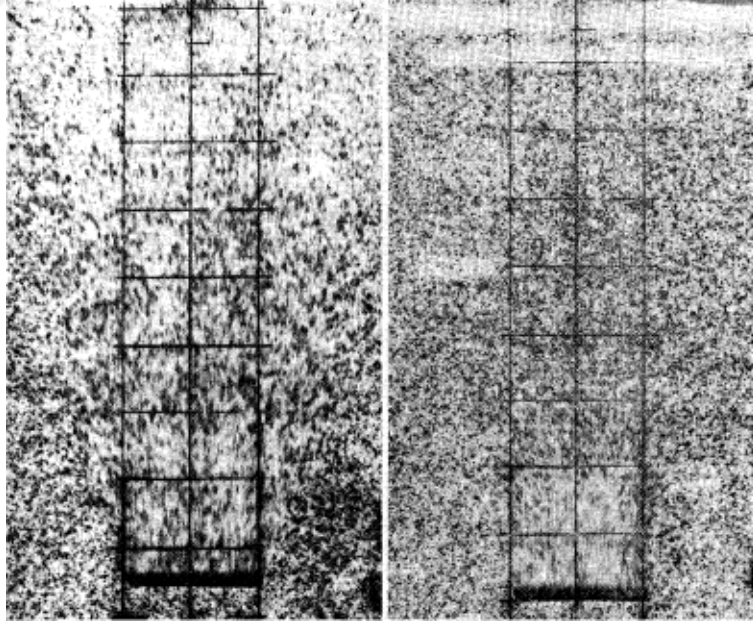
Drenajsız koşullarda killi zeminlere inşa edilmiş kare ve dairesel plakalı ankrajlarda kritik gömme derinliğinin tayininde Das (1978) Denklem 2.5'te verilmiş ampirik yaklaşımı önermiştir. Denklemde drenajsız kayma mukavemeti kN/m^2 birimindedir.

$$(H / B)_{cr} = 0.107S_u + 2.5 \quad (2.5)$$

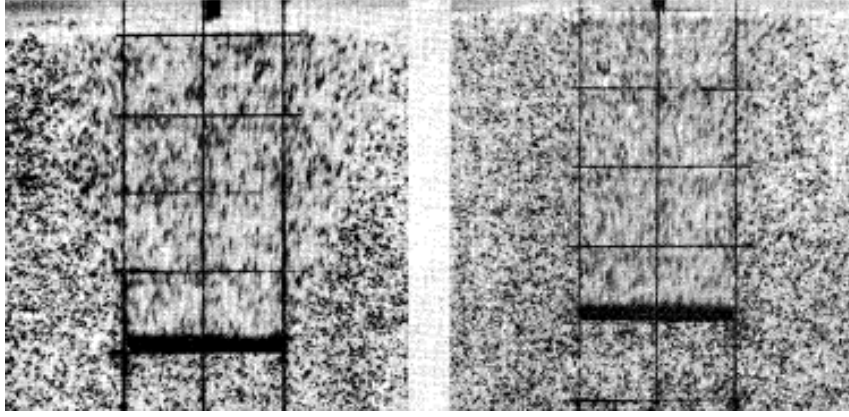
Yatay plakalı ankrajların çekme yükleri altında kumlu zeminlerdeki davranışını inceleyen birçok çalışma literatürde mevcuttur. Meyerhof ve Adams (1968), Adams ve Hayes (1967) tarafından farklı derinliklerde üniform ve iyi derecelendirilmiş, sıkı ve gevşek kumlu zeminlere imal edilen 1-4 inç çaplı metal diskli ankrajlara uygulanmış çekme deneylerinin

sonuçlarından yola çıkarak yatay plakalı ankrajlar için kırılma faktörü tayini yapmışlardır. Meyerhof ve Adams (1968) söz konusu deneylerde sıkı kumlarda çekme kapasitesinin derinliğe bağlı olarak arttığını belirtmişlerdir. Gevşek kumlarda ise çekme dayanımı derinlikle doğru orantılıdır; fakat sıkı kumlara nazaran çekme dayanımı daha düşüktür. Sıkı ve gevşek kumlarda uygulanmış çekme deneylerine ait görseller Şekil 2.26'da verilmiştir.

Meyerhof ve Adams (1968) gözlemledikleri deneyler sonucunda sıkı kumlara imal edilmiş sığ ankrajlarda, plaka kenarından yüzeye kadar uzanan bir yüzeysel eğri boyunca belirgin kayma düzlemi (*distinct slip surface*) oluştuğunu, derin ankrajlarda ise sığ olanlara kıyasla daha az belirgin, başlangıçla eğrisel görünümlü yüzeye doğru dikleşen bir yenilme yüzeyini oluştuğunu belirtmişlerdir. Şekil 2.26 ve Şekil 2.27'den de görülebileceği gibi gevşek kumlarda imal edilmiş derin ve sığ ankrajlarda yenilme düzlemi düşey doğrultuludur; fakat derin ankrajlarda yenilme yüzeyi plaka üzerindeki kısa bir derinlik boyunca sınırlıyken sığ ankrajlarda yenilme düzlemi kaması plaka üzerinden zemin yüzeyine kadar uzanmaktadır. Meyerhof ve Adams (1968)'a göre bu durum kayma dayanımının sıkı kumda gevşek kuma göre daha büyük bir yüzey alanında mobilize olduğunun kanıtıdır.



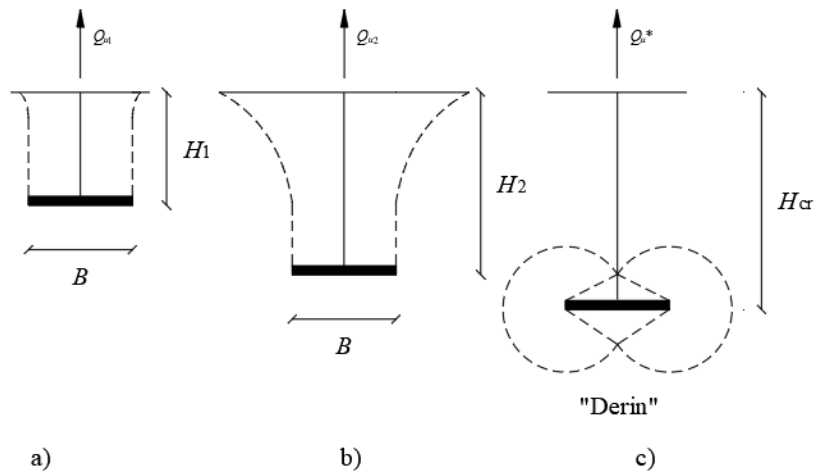
Şekil 2.26: Kumda yapılmış çekme deneyleri (sağ fotoğraf sıkı kum, sol fotoğraf gevşek kum).



Şekil 2.27: Kumda yapılmış çekme deneyleri (sağ fotoğraf sıkı kum, sol fotoğraf gevşek kum).

Meyerhof ve Adams (1968), Adams ve Hayes (1967) yumuşak ve sert killerde gerçekleştirilen çekme deneylerini de gözlemlemişlerdir. Yazarlar her iki kil türünde de çekme dayanımının sabit bir nihai değere ulaşana dek derinliğe bağlı olarak arttığını belirtmişlerdir. Killi zeminlerdeki yenilme mekanizmasında kumlara göre daha fazla yer değiştirme meydana geldiğini belirtmişlerdir.

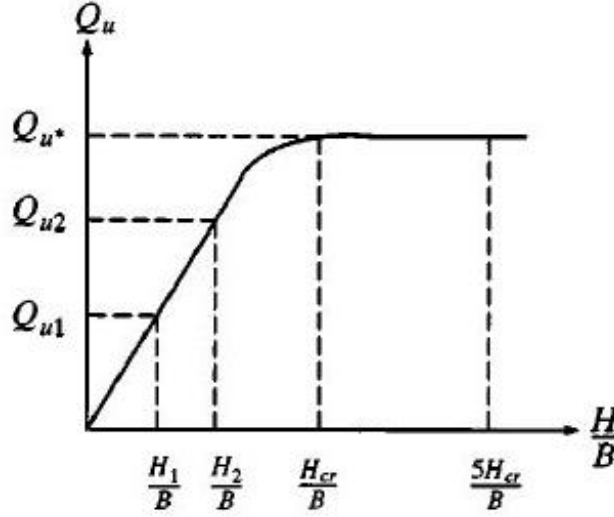
Çekme yükleri altında düşey ankrajlarda yenilme davranışı, yukarıdaki paragraflardan yola çıkarak derin ve sığ yenilme olarak da sınıflandırılabilir. Bu durumda nihai çekme yükü altında meydana gelen yenilme zemin yüzeyine $(H/B < (H/B)_{cr})$ ulaşıyorsa sığ (Şekil 2.28a ve 2.28b), eğer yenilme plaka etrafında meydana geliyor ve yenilme mekanizması zemin yüzeyini etkilemiyorsa $(H/B \geq (H/B)_{cr})$ derin (Şekil 2.28c) olarak adlandırılır.



Şekil 2.28: Sığ ve derin ankraj davranışı (Merifield vd., 2003).

Merifield vd., (2003), derin yenilme türünün önemini nihai çekme dayanımının limit bir maksimum değere ulaşmasıyla bağdaştırmıştır. Ayrıca yazarlara göre söz konusu yenilme

durumu, drenajsız kayma dayanımının aksel gerilmeden bağımsız olduğu kabulüyle ortaya çıkmaktadır. Sonuç olarak eğer yenilme bu durumda meydana gelirse yenilmeye neden olan gerilme ankrajın dayanabilceği maksimum limit değeri verecektir denilebilir.



Şekil 2.29: Şekil 2.28’de verilen sistemlerin yenilme mekanizması (Merifield vd., 2003).

2.9.2. Çoklu Plakalı/Helisel Ankrajların Çekme Yükleri Altında Mekanik Davranışı

Rowe ve Davis (1982) kohezyonlu doymuş zeminlerde, çoklu plakalı ankrajların çekme dayanımını etkileyen faktörleri gözlemek amacıyla elasto-plastik sonlu elemanlar yöntemi (FEM) ile analizlerini gerçekleştirmiş ve uyguladıkları çekme deneyleri sonucunda yenilmenin iki farklı şekilde meydana geldiğini belirtmişlerdir:

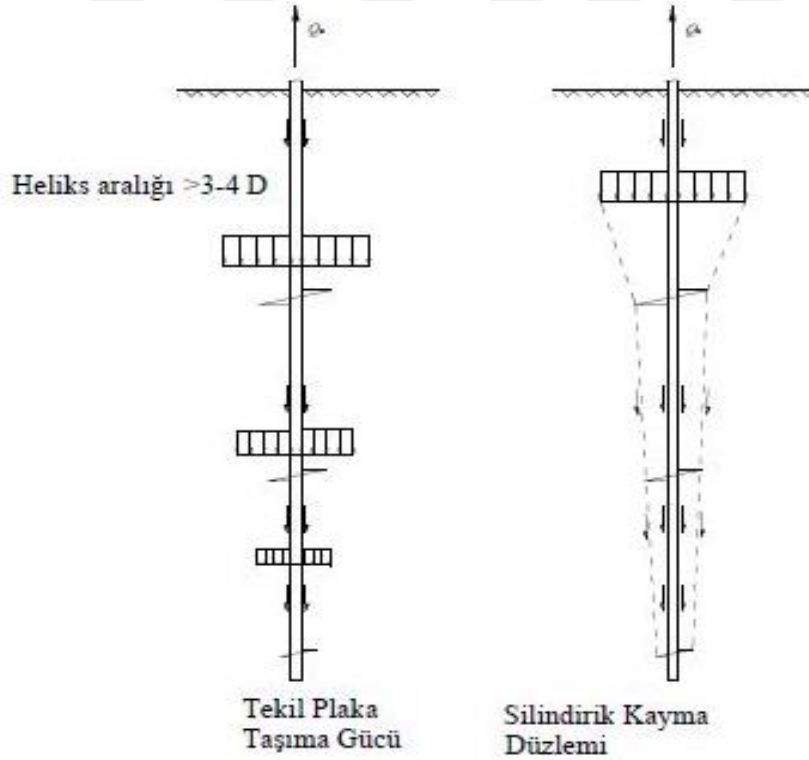
1. Zemin içinden ani sıyrılmayla (*immediate breakaway*),
2. Sıyrılmaya gerçekleşmeden (*no breakaway*).

Ani sıyrılmamanın gerçekleştiği yenilmelerde ankraj ve zemin ara yüzünde meydana gelen gerilmelerin ankraja etkiyen çekme gerilmelerine direnemediği varsayılır. Ankraj çekme gerilmelerine maruz kaldığında plaka altında meydana gelen zemin gerilmelerinin sıfıra yaklaştığı dolayısıyla zemin ve plaka arasında bir adhezyon kuvveti meydana gelmediği kabulü yapılır. Bu durumda plaka, altında bulunan zeminle teması tamamen kaybedecek ve ankraj çekme yükü altında zemin içinden sıyrılacaktır. Sıyrılmamanın gerçekleşmediği durumda ise zemin kazık ara yüzünde oluşan gerilmelerinin çekme yüküne direnebileceği ve adhezyon, vakum etkisi ya da başlangıç gerilmelerinin yeteri kadar büyük olması durumunda zemin plaka ara yüzündeki temasın her zaman korunduğu varsayılır (Rowe ve Davis, 1982).

Çoklu helisel ankrajlarda ise çekme yükleri altında yenilme davranışları plakalar arasındaki mesafeye bağlı olarak iki şekilde gerçekleşir, (Lutenegger, 2009):

1. Bireysel (ayrık) plaka taşıma gücü modeli,
2. Silindirik kayma düzlemi modeli.

Çoklu helisel kazıklarda çekme yükleri altında meydana gelecek yenilme davranışı kazık geometrisine bağlıdır. Örneğin, eksenel yükler altındaki tekli helisel kazıklarda, tekil plaka taşıma gücü yöntemine göre analiz yapılabilir; fakat çoklu helisel kazıklarda plakalar arası mesafenin (S), helislerin ortalama çapına (D_{ort}) oranı ($SR=S/D_{ort}$) yenilme davranışını etkileyen en önemli faktördür. Literatürde bu oranın değişimine bağlı meydana gelen yenilme davranışının gözlenmesiyle ilgili yapılmış birçok çalışma mevcuttur. Bu çalışmalar ışığında plakalar arasındaki mesafe ortalama plaka çapından üç ya da daha fazla kat büyükse plakalar bireysel çalışır; aksi halde plakalar grubu rijit bir eleman gibi davranır ve yenilme silindirik kayma düzlemi modeli ile gerçekleşir genellemesi yapılabilir (Şekil 2.30).



Şekil 2.30: Helisel ankrajların çekme yükleri altında yenilme davranışı (Lutenegger, 2009).

Şekil 2.31’de Rao vd., (1991) tarafından gerçekleştirilmiş çekme deneylerinde gözlemlenen yenilmeye ait fotoğraflar verilmiştir. Şekilde verilen çapı 44 mm olan ankrajlara SR oranı

sırasıyla 1,5; 2,3 ve 4,6 olan 100 mm çaplı helisel plakalar yerleştirilmiştir. SR değeri 1,5'a eşit olduğu durumda (birinci ankraj) tam silindirik kayma durumu gözlemlenmiştir. Plakalar arasındaki mesafe arttıkça yenilme davranışının silindirik kayma düzleminde bireysel plaka taşıma gücü yöntemine doğru değişmekte olduğu görülmektedir. Rao vd. (1991)'e göre orta katı ve katı killerde silindirik kayma düzleminin gözlemlenebilmesi için en uygun helis aralığı helis çapı oranı 1,0 ve 1,5 aralığıdır; bu değer arttıkça çekmeye karşı direnen alan azalacak ve bireysel plaka yenilmeleri gözlemlenecektir.



Şekil 2.31: Çekme yüklerine maruz kalan helisel ankrajlar (Rao vd., 1991).

Adams ve Klym (1972) çekme gerilmeleri altında en üstte bulunan plakanın üzerinde meydana gelen zeminin basınç altında da benzer davranış gösterdiğini belirtmişlerdir. Bu nedenle basınç yüklerine maruz kalan helisel kazıkların analizi aşağıda verilen yöntemlere benzer şekilde yapılabilir.

2.9.2.1. Çekme Yükü Altında Bireysel (Ayrık) Plaka Taşıma Gücü Modeli

Bireysel plaka taşıma gücü metodunda bir önceki bölümde bahsedildiği gibi kazığın yenilme davranışını SR oranı belirlemektedir ve bu yöntemle çekme yükleri altında yenilme her bir helisel plaka üzerinde aynı anda gerçekleşmektedir (Lutenegger, 2009), (Şekil 2.30). Dolayısıyla ankrajın toplam çekme kapasitesi, her bir helisel plakanın üstündeki zeminin

taşıma gücünün toplamına, her bir helis plakanın üzerindeki bir efektif ankraj uzunluğu (H_{eff}) boyunca zemin kazık ara yüzünde meydana gelen çeper sürtünmesinin eklenmesiyle elde edilmektedir. Çoklu helisel kazıkların çekme kapasitesini tanımlarken yukarıdaki ifadeden yola çıkarak Denklem 2.6 verilebilir. Burada q_u , her bir helisel plakanın taşıma gücü, A_n , n . helisel plakanın taban alanı, D kazık çapı, α ise zemin ve kazık arasındaki adhezyondur. Denklemin ikinci ifadesi olan adhezyonun etkisi ihmal edilebilir.

$$Q_u = \sum_{i=1}^n q_u A_n + H_{eff} (\pi D) a \quad (2.6)$$

Lutenegger (2009), sabit drenajsız kayma gerilmesine sahip killerde helisel kazıkların çekme kapasitesinin hesaplanmasında Denklem 2.7'yi önermiş; fakat bu denklemde drenajsız yükleme altında, doymun killi zeminlerde kazık tabanında gerçekleşmesi muhtemel vakum (*suction*) davranışı ile ankraj şaftının çekmeye karşı dayanım etkisinin ifade edilmediğini belirtmiştir. Denklemde Q_e her bir helise ait çekmeye karşı taşıma gücü, W_s plakalar arasındaki zeminin ağırlığı, W_f ise şaft ağırlığı n ise plaka sayısıdır. Q_e değeri zeminin drenajsız kayma gerilmesine bağlı olarak Denklem 2.8 gibi hesaplanabilir.

$$Q_u = nQ_e + W_s + W_f \quad (2.7)$$

$$Q_e = 9S_u A_e \quad (2.8)$$

Kazıklı temellerin uç kısmında meydana gelen taşıma gücü (q_u) ile yüzeysel temellerde taşıma gücü oluşum mekanizmasına benzerlik göstermektedir. Merifield (2011), özellikle derine gömülen helisel kazıklarda Terzaghi (1943) taşıma teorisinden yola çıkarak bireysel plaka taşıma gücü metoduna göre teorik taşıma direnci hesabının sıklıkla tercih edildiğini belirtmektedir. Yazara göre bireysel (ayrık) plaka yenilme davranışında aşırı yüklenen zemin altında her bir helisel plaka logaritmik spiral modunda yer değiştirir ve her bir helisin taşıma gücünü Terzaghi taşıma gücü denklemi kullanarak hesaplamakta hiçbir sakınca yoktur. Ayrıca Merifield (2011), plakalar arasında silindirik yüzey oluşturan sistem mekanik olarak rijit eleman gibi davrandığı için toplam çekme kapasitesini hesaplarken şaftın çekme dayanımının ihmal edilebileceğini belirterek çok sayıda helis içeren ankrajların toplam çekme kapasitesini silindirik yüzey etrafında meydana gelen kayma gerilmesi ve en üstteki plakanın taşıma gücüne bağlı olarak Denklem 2.9'daki gibi vermiştir.

$$Q_u = \pi D(n-1)S(c + \sigma_v \tan \phi) + 0.25\pi D^2(1.3cN_c + \sigma_v N_q) \quad (2.9)$$

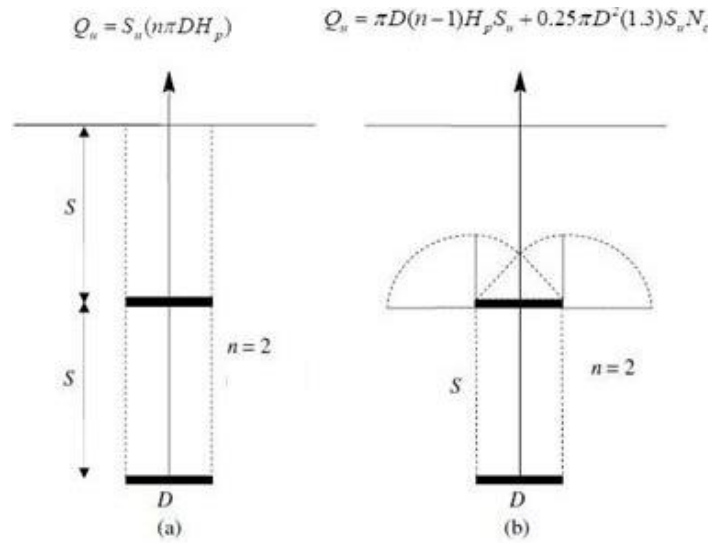
Denklemden D_{avg} ortalama plaka çapı, S plakalar arasındaki mesafe, c zeminin kohezyonu, ϕ zeminin içsel sürtünme açısı, σ_v düşey efektif gerilme, N_c ve N_q ifadeleri ise Terzaghi (1943)'nin taşıma gücü katsayılarıdır.

Merifield (2011), killi zeminlerde ($\phi=0$) imal edilen dairesel plakalı ankrajların, silindirik kayma düzlemi yöntemine göre çekme dayanımı hesaplanırken iki ayrı varsayım yapılabileceğinden söz etmiştir. Bu varsayımlardan ilki çekme dayanımının sadece plakalar arasında meydana gelen silindirik kayma düzlemine eşit olduğudur. Bu durumda Denklem 2.9 aşağıda verilen haliyle ifade edilebilir (Şekil 2.32a).

$$Q_u = S_u(n\pi DS) \quad (2.10)$$

Killi zeminlerde Merifield (2011) tarafından bahsedilen bir diğer varsayım ise Şekil 2.32b'de verilmiş olan, ankrajın çekme kapasitesinin silindirik yüzey etrafında meydana gelen kayma yüzeyi ile en üst plakanın çekmeye karşı taşıma gücünün kombinasyonu olmasıdır (Denklem 2.11).

$$Q_u = \pi D(n-1)H_p S_u + 0.25\pi D^2(1.3)S_u N_c \quad (2.11)$$



Şekil 2.32: a) Silindirik kayma yenilmesi b) silindirik kayma ve taşıma gücü yenilmesi.

n Tane helisel plaka içeren bir ankraj için toplam taşıma gücünü Denklem 2.12'deki gibi vermiştir. Killi zeminlerde ise taşıma gücü hesabının Denklem 2.13 gibi yapılacağını belirtmiştir.

$$Q_u = \sum_n A_n \left(1.3cN_c + \sigma_{vn} N_q + \frac{1}{2} \gamma B N_\gamma \right) \quad (2.12)$$

$$Q_u = \sum_n A_n (1.3cN_c + \sigma_{vn}) \quad (2.13)$$

2.9.2.2. Silindirik Kayma Düzlemi Modeli

Mooney vd. (1985), çoklu helis içeren kazıkların aksel yükler altındaki kapasitesini silindirik kayma düzlemiyle incelemişlerdir ve killi zeminlerde bu tür kazıkların analizinde silindirik yenilme modelini kullanmayı önermişlerdir. Yazarlar kil ve silt zeminlerde gerçekleştirdikleri 26 adet küçük ölçekli laboratuvar deneyi ve 28 adet büyük ölçekli saha deneyinde Şekil 2.33'de verilen yenilme davranışını gözlemlemişlerdir. Şekle göre helisel ankrajların nihai çekme kapasitesi peş peşe helisel plakaların oluşturduğu silindirik yüzey etrafında meydana gelen kayma düzlemi, en üst plakanın çekme dayanımı ve kazık profili boyunca meydana gelen sürtünmeye bağlıdır ve killi zeminlerde kazığın zemin içinde hareketini önleyen faktör drenajsız kayma gerilmesidir (Mooney vd., 1985). Bu tür yenilme durumunda sistemin davranışını en üstte bulunan plaka yönlendirmektedir. Silindirik kayma düzlemiyle yenilen sistemin kil ve siltlerde nihai çekme dayanımının gösteren eşitlikler sırasıyla Denklem 2.14 ve Denklem 2.15 ile Şekil 2.33'de verilmiştir:

$$Q_u = Q_p + Q_c + Q_{sh} \quad (2.14)$$

$$Q_u = Q_p + Q_c + Q_{sh} + Q_f \quad (2.15)$$

Denklemlerde yer alan Q_u , kazığın nihai çekme kapasitesini, Q_p en üstte bulunan plakanın taşıma gücünü, Q_f silindirik kayma yüzeyi boyunca meydana gelen sürtünmeyi, Q_{sh} kazık ve zemin arasındaki sürtünmeyi Q_c ise yenilme düzlemindeki zeminin kohezyonunu temsil etmektedir.

Denklem 2.13’de verilen ifadeleri açarak yazmak gerekirse Denklem 2.15’te verilen eşitlik elde edilir. Burada q_u değeri en üstte bulunan helisel plakanın çekme dayanımı, A_1 aynı plakanın yüzey alanı, τ_f zeminin kayma mukavemeti, H_{eff} en üstte bulunan plakan üzerinde bulunan shaftın uzunluğudur. Kohezyonlu zeminlerde τ_f değeri drenajsız kayma gerilmesi S_u ’ya eşit alınabilir (Denklem 2.16).

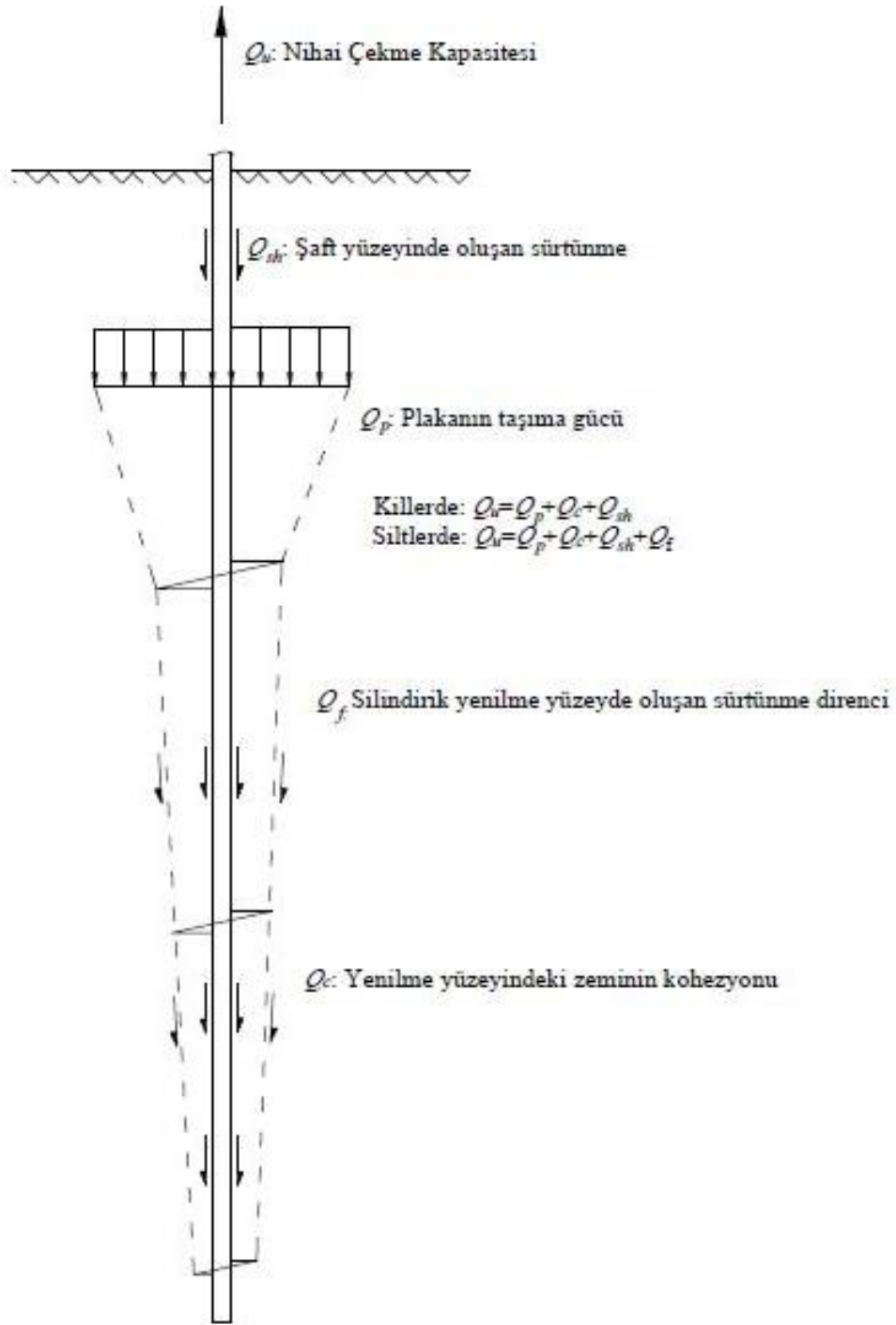
$$Q_u = q_u A_1 + \tau_f \pi D_{avg} (n-1)H + aH_{eff} (\pi D_{shaft}) \quad (2.15)$$

$$Q_u = S_u N_{cu} A_1 + S_u \pi D_{avg} (n-1)H + aH_{eff} (\pi D_{shaft}) \quad (2.16)$$

Çoklu helislerin kohezyonlu zeminlerdeki davranışı Rao ve Prasad (1993) tarafından da incelenmiştir. Yazarlar aynı malzeme özelliklerine sahip çelik profillerden elde ettikleri eşit boydaki dört ayrı kazığa en alt ve en üstteki helislerin yeri tüm kazıklarda aynı olmak üzere farklı aralıklarda ve sayılarda helisel plakalar yerleştirmişler ve sonra bu kazıkları içerisinde killi zemin bulunan deney tanklarına yerleştirip çekme deneyi uygulamışlardır. Yaptıkları deney sonucunda kazıklarda gözlemlenen yenilme davranışının SR ile arasında doğrudan bir bağlantı olduğunu belirtmişlerdir. Yazarlara göre SR değeri 1,5’e eşit ya da küçük olan kazıklarda silindirik yüzey yenilmesi gerçekleşmektedir. Bu değer azaldıkça ankraj kapasitesi artmakta ve $SR \approx 1.5$ için optimum kapasiteye erişilmektedir (Rao ve Prasad, 1993).

Kohezyonsuz zeminlerde helisel kazıkların davranışı literatürde birçok araştırmacı tarafından incelenmiştir. Örneğin, Mayerhof ve Adams (1968) kumlu zeminlere inşa edilmiş çok sayıda helis içeren ankrajların çekme yükleri altında davranışını incelemiş ve çekme kapasitesinin gömme derinliği, kazık çapı oranına ile kumun bağlı sıklığına bağlı olduğunu belirtmişlerdir.

Mitsch ve Clemence (1985), laboratuvar ve saha ortamında kumlu zeminlerde imal edilen çoklu helisel kazıklara uyguladıkları çekme deneyleri gerçekleştirmişler ve Mooney vd., (1985)’nin teorisine benzer bir şekilde çekme dayanımını ifade etmişlerdir. Bu durumda kumlu zeminlerde çoklu helisel ankrajın çekme kapasitesi üst plakanın taşıma gücü, helisel plakalar arasındaki kumlu zeminin sürtünme direnci ve shaft boyunca meydana gelen sürtünme gerilmesinin toplamıdır.



Şekil 2.33: Helisel ankrajlarda silindirik kayma düzlemi (Mooney vd., 1985).

2.10. YATAY YÜKLER ALTINDA TEKİL KAZIĞIN DAVRANIŞI

Temel kazıkları servis ömürleri süresince rüzgâr, toprak basıncı, su basıncı, deprem, gemi çarpması gibi yanal yüklere maruz kalabilir. Kuvvetin yatay bileşeninin düşey bileşene göre küçük olduğu durumlarda, düşey kazıklar yanal yükleri emniyetle taşıyacak yatay

dirence sahip olabilir. Kazıklı bir temelin taşıyabileceği yanal yük, kazık cinsine, zemin özelliklerine ve kazık başlığının kazığa bağlanma şekline bağlıdır (Toğrol ve Tan, 2009).

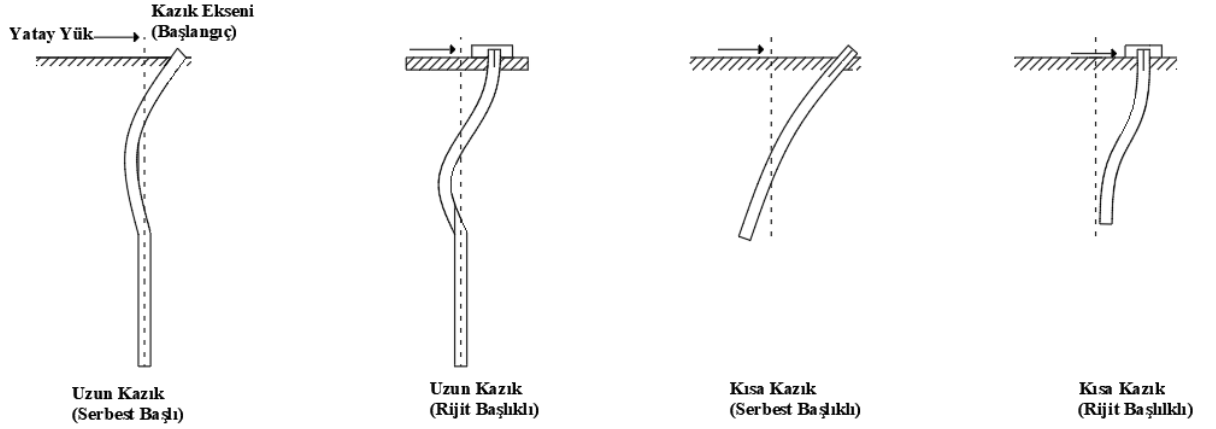
Yanal yüklenmiş kazıklar bir yapı-zemin etkileşim problemidir. Bu tür yüklenmiş sistemlerde kazıkta ve zeminde aynı deformasyon ve yer değiştirme söz konusudur. Zeminde meydana gelen gerilme-şekil değiştirme davranışı doğrusal olmadığından yük, moment ve yer öteleme ilişkisi güvenli çalışma bölgesinde doğrusal olmayacaktır (Yıldırım, 2009).

Yanal yüklenmiş kazıkların davranışı incelenirken yük altında kazığın eğilmesi ve kazığın nihai dayanımı ayrı ayrı incelenir. Ayrıca bu tip kazıklarda tasarım yapılırken çoğunlukla yükleme altında meydana gelmesi muhtemel olan yer değiştirmeler göz önüne alınır. Bu kazıklarda yenilme ya zemin göçmesi ya da kazıkta kırılma şeklinde gerçekleşir.

Yanal yüklenmiş kazıkların proje yükleri altında yer değiştirmesini kesin olarak hesaplamak zordur. Çünkü zemin için net bir gerilme şekil değiştirme bağıntısı bulmak güçtür. Bu nedenle bir zemin yapı etkileşim problemi olan yatay yüklenmiş kazıkların analizini yaparken bir takım kabuller yapmak gerekmektedir (Toğrol ve Tan, 2009):

- Zemini davranışını temsil edecek bir yatak katsayısı tanımlamak,
- Zeminin ideal elastik bir cisim olduğunu kabul etmektir.

Yanal yüklenmiş kazıklar boyları (uzun-kısa) ve kazık başının serbest ya da rijit başlıklı olup olmamasına (dönme koşuluna) göre Şekil 2.34'deki gibi ayrılır. Eğer düşey kısa bir kazık rijit bir başlıkla bağlanmamışsa, kazık başına gelen yükün tamamını zemin alır. Bu durumda, yanal kuvvet, kazığın şekil değiştirmesine bağlı olarak belirli bir derinliğe kadar zeminde oluşan gerilmeler tarafından karşılanacaktır. Bu tip kazıklarda (serbest başlı) kazığa gelen yanal etkilere bağlı olarak zemin içinde kazık ötelenecektir. Serbest başlıklı uzun kazıkların yanal yük altındaki davranışı ise tamamen farklıdır. Bu tip kazıklarda kazığın alt tarafı sabit kalırken üst tarafı yer değiştirir (Toğrol ve Tan, 2009). Yumuşak kil ve silt gibi zeminlere inşa edilen kazıklarda zeminin yanal dirence etkisi azdır.



Şekil 2.34: Yanal yüklenmiş tekil kazıkların sınıflandırılması.

Zemine yerleştirilen bir kazığın yatay olarak yüklenmesiyle zemin yüzeyinde meydana gelen etkiler iki boyutta incelenen aktif ve pasif toprak basıncı etkisinden farklıdır. Örneğin, yatay yüklü kazığın yer değiştirmesine karşılık zeminde meydana gelen direnç iki boyutta hesaplanan maksimum pasif dirençten daha büyüktür.

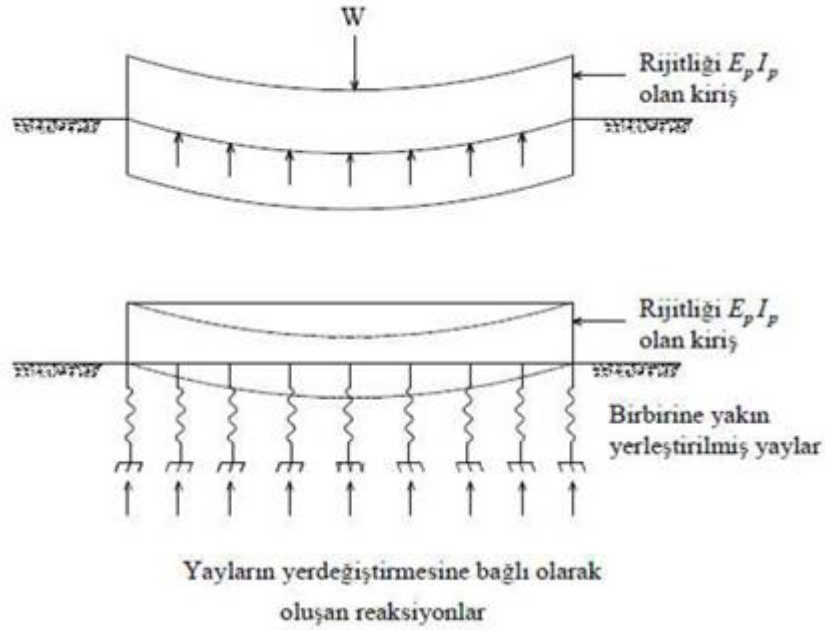
Yatay yüklü, D çaplı tekil bir kazığın davranışı belirlenirken, moment (M_g), kesme kuvveti (Q_g) ve eksenel kuvvet (Q_v) altındaki elastik bir kazığın davranışı incelenir. Kazık boyunca herhangi bir x noktasında meydana gelen zemin direnci p , o noktada oluşan deformasyon ise y ile orantılı olarak alınır. Burada, yatay yüklü bir kazıkta yük ve deformasyon arasındaki ilişki k_h yatay yatak katsayısı olmak üzere $p = k_h \times y$ olarak ifade edilir.

Killi zeminlere yerleştirilen kazıklar eğer tekrarlı yüklere maruz kalıyorsa yüzeyine yakın bölgelerde zemin direncinde azalma oluşur. Kaymaya bağlı deplasmanlar kilin mekanik özelliklerinde (rijitliği, kayma direnci) azalmaya neden olur. Fakat tekrarlı yükleme bir süreliğine durduğunda killi zemin daha sıkı ve dayanıklı hale gelir. Örneğin bu tip zeminlere çakma kazık uygulaması yapıldığında kazığın yanal direncinin zamanla arttığı gözlemlenmektedir. Bu durum kilin konsolidasyon özellikleri ile üzerine gelen düşey yüke bağlıdır. Tekrarlı yüklerin kumlu zeminlere etkimesi ise eğer zeminde yatay yüklenmiş kazık var ise kazığın etkisi tekrar eden yükün etkisiyle iki katına çıkabilir. Eğer kum gevşek ise bu durum kumun sıkılığını arttıracak ve daha sonradan oluşması muhtemel deplasmanların azalmasını sağlayacaktır.

2.11. YATAY YATAK KATSAYISI KAVRAMI

Kın ve diğ. (1991), yatak katsayısını (k_s) yüzeysel ve derin temellerin hesabında yapı-zemin karşılıklı etkileşiminin modellenmesi için yaygın olarak kullanılan, zemin basıncı ile yer değiştirmesi arasındaki kavramsal bir ilişki olarak tanımlamışlardır. Bu katsayı homojen ve izotrop olduğu varsayılan zemin içerisinde yatay düzlemde sabit ya da değişken olabilir. Düşey de ise derinliğe bağlı olarak değişmekte ve belirli bir sınır değere kadar derinlikle doğru orantılı olarak artmaktadır (Karaca vd., 2001).

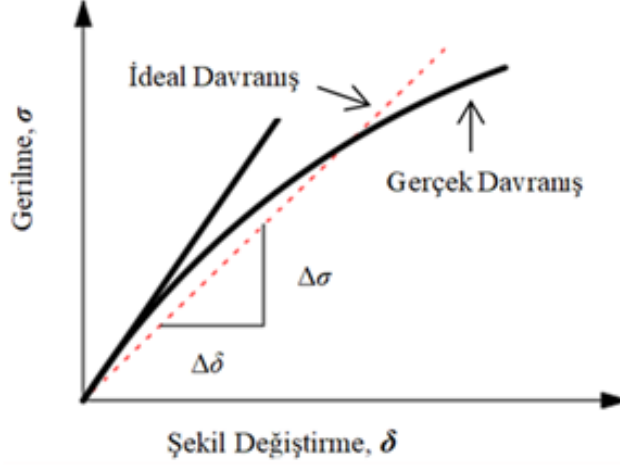
Yatak katsayısı, temelin boyutlarına, şekline, temelin zemine gömülme derinliğine, zeminin elastisite özelliklerine bağlıdır. Radye temeller, şerit temeller ve derin temeller için yapılan analizlerde bu katsayı kullanılır.



Şekil 2.35: Elastik zemin üzerine oturan kiriş ve zeminin elastik yaylarla temsil edilmesi.

Zemin ortamının temel altında tek boyutta sıkışabilen elastik yaylarla temsil edilmesi ilk kez Winkler (1867) tarafından ortaya atılmış bir hipotez olup daha sonra Zimmermann (1888) tarafından demiryolu traversleri üzerine düşen gerilmeyi hesaplamak için kullanılmıştır (Terzaghi, 1955). Winkler Hipotezi, zeminin gerçek gerilme ve birim boy değiştirme özelliklerini tümüyle göz ardı etmekte ve temelin sonsuz sayıda bir seri yay üzerinde doğrusal gerilme-şekil değiştirme davranışı gösterdiğini kabul etmektedir (Önalp, 2013). Diğer bir ifadeyle zemine oturtulan bir kirişin herhangi bir noktasında meydana gelecek gerilme o nokta

altında oluşan yer değiştirme ile Hook yasası gereğince doğru orantılı olacaktır (Şekil 3.36). Bu durumda zeminin herhangi bir noktasına etki eden gerilme (p) ile aynı noktanın şekil değiştirmesi (δ) arasındaki ilişki Denklem 2.17'deki gibi ifade edilir:



Şekil 2.36: Zeminin gerilme-şekil değiştirme davranışı.

$$k_s = \frac{p}{\delta} \quad (2.17)$$

Winkler (1867)'in elastik kiriş hipotezine dayanarak yatak katsayısına Denklem 2.18'de verilen dördüncü dereceden diferansiyel denklemin çözümüyle yapılır:

$$E_p I_p \frac{d^4 y}{dx^4} + p = 0 \quad (2.18)$$

$$E_p I_p \frac{d^4 y}{dx^4} + k_s y = 0 \quad (2.19)$$

2.11.1. Yatak Modülü, Yatak Katsayısı Ve Yay Katsayısı Kavramları

Yatay yüklü kazıklarda yatak katsayısı kullanılarak yapılan analiz yöntemlerinden söz etmeden önce yatak modülü, yatak katsayısı ve yay katsayısı kavramlarından ve bu parametrelerin birimlerinden söz etmek gerekir. Literatürde terminolojik açıdan yatak katsayısı ve yatak modülü ifadeleri karıştırılmaktadır. Bazı araştırmacılar k_s (KU^{-3}) ifadesini yatak katsayısı olarak kullanılırken bir grup yazar da aynı terimi yatak modülü olarak kullanmayı tercih etmektedir. Literatürde bu amaçla yapılmış birçok tanım mevcuttur. Örneğin, Terzaghi (1955), düşey yatak katsayısını (*coefficient of subgrade reaction*) düşey

yönde yüklenen bir zeminin herhangi bir noktasındaki gerilmeyle o noktada meydana gelen oturma arasındaki, oran olarak tanımlamıştır (Denklem 2.17). Dolayısıyla yatak katsayısının birimi K ifadesi kuvvet, U uzunluk olmak üzere KU^3 'tür.

Birand, (2001) ise bir plaka yükleme deneyinden elde edilmiş yük (P), birim alana düşen gerilme (q), plaka kesit alanı (A) ve plaka altında meydana gelen oturma (y) olmak üzere yatak modülünü (*modulus of subgrade reaction*) aşağıda verilen eşitlikteki gibi ifade edilmiştir. Bu doğrultuda yatak modülünün birimi KU^3 'tür. Birand (2001) yatak modülünü simgesel olarak k_0 şeklinde ifade etmiş ve kazıkların düşey ya da yatay doğrultuda yüklenmeleri halinde yük ve şekil değiştirme arasındaki bağıntı olarak tanımlamıştır.

$$k_0 = \frac{P}{Ay} = \frac{q}{y} \quad (2.20)$$

Yatay yüklenmiş kazıklarda, yatak modülü (k_h '), kazık ve zemin ara yüzündeki ilişkinin tayinindeki zorluklar göz önüne alınarak birim derinlik için ifade edilir, birimi düşey doğrultudaki yatak modülünde olduğu gibi KU^3 'tür. Yatak katsayısı (k_h) hesaplanırken kazık modülü kazık çapı ile çarpılır, KU^2 olarak birimlendirilir (Birand, 2001).

$$k_h' = \frac{q}{y} = \frac{Q}{Ay} = \frac{Q}{(1)Dy} \quad (2.21)$$

$$k_h = k_h' D = \frac{Q}{(1)y} \quad (2.22)$$

Yatay yüklü kazığın deplasmanı için gereken yük [KU^1] ve de belirli bir yük altında yatayda meydana gelecek yer değiştirme [UK^1] sırasıyla Denklem 2.21 ve 2.22'de olduğu gibi ifade edilir. Bu ifadelerde Denklem 2.21'de kazığın bir metrelik boyuna denk gelen U^1 biriminin etkisi de dâhildir (Keleşoğlu, 1999).

$$Q = k_h y \quad (2.23)$$

$$y = \left(\frac{1}{k_h} \right) Q \quad (2.24)$$

Yatak katsayısı, yatak modülü ve yay rijitliği ile ilgili bir farklı tanımlama da Pender (1994) tarafından verilmiştir. Pender (1994), k_s [KU^{-3}] terimini yatak katsayısı, k [KU^{-2}] terimini zeminin elastisite modülü ile olan ilişkisinden yola çıkarak yatak modülü ve yay rijitliğini ise K , [KU^{-1}], şeklinde tanımlanmıştır. Ayrıca Birand (2001)' a göre eğer bir kazığın yük altındaki yer değiştirme davranışı yayın sıkışma davranışı ile modelleniyorsa, yatak katsayısı yerine yay katsayısı K_s kullanılabilir.

Bu çalışmada ise terimsel anlamda karışıklığı önlemek için k_s ' ifadesi yatak modülülü [KU^{-3}], k_s yatak katsayısı [KU^{-2}] ve K yay rijitliği [KU^{-1}] olarak kullanılmıştır.

2.12. YATAK KATSAYISININ HESABINDA KULLANILAN YÖNTEMLER

Yatak katsayısı, sonlu elemanlar yöntemiyle (FEM) çözüm yapan SAP2000, ETABS, SAFE gibi yapısal analiz yapan programlarda kullanıcıdan zemin özelliklerini tanımlamak için istenen bir parametredir. FEM'le çözüm yapan yazılımlarda, zemin, temeli oluşturan sonlu eleman ağında düğüm noktaları altına yerleştirilmiş yaylarla temsil edilir. Bu yayların rijitlikleri, her bir düğüm noktasının etkili alanı ile yatak modülünün çarpımıyla bulunur. Her bir düğüm noktasının etkili alanı, o düğüm noktasına komşu olan sonlu elemanların alanlarının dörtte birinin toplamına eşit olmakta dolayısıyla eleman boyutu eşit olan bir sonlu eleman ağında dahi köşede, kenarda veya ortada olan yayların rijitlikleri farklı değerler almaktadır. Eleman boyutlarının farklı olduğu modellerde yay katsayıları için etki alanlarının da ayrıca tespit edilmesi gerekmektedir (Önalp, 2013).

Zeminlerin yaylarla temsil edilmesi bir sürekli ortam problemidir. Gerçekte anizotropik ve süreksiz olan ayrıca elastik olmayan zeminin tek bir katsayı ile ifade edilmesi zordur (Birand, 2001). Ayrıca doğru analizlerin yapılabilmesi için bu katsayının doğru tayin edilmesi gerekir. Elastik zemine oturan giriş varsayımına dayanarak hesap yapan yazılımlar yatak katsayısının tabakalı zeminlerde, temel yüklenince meydana gelecek taban basıncı alanı içinde değişimini göz ardı eder. Genelde zemin tabakalarının yatak katsayısına etkisi geoteknik açıdan incelenmekle birlikte, bu parametrenin temel alanı içerisindeki değişimi, bir yapı-zemin etkileşimi problemidir. Dolayısıyla, doğru ya da gerçeğe en yakın yatak katsayısı değerinin tespiti çok önemlidir. Günümüze kadar yatak katsayısının belirlenmesi için birçok sayısal yöntem, arazi (standart penetrasyon deneyi (SPT), presiyometre deneyi (PMT), plaka yükleme deneyi) ve laboratuvar deneyi (konsolidasyon deneyi, tek ve üç eksenli basınç

deneyi), abak ve tablolar önerilmiştir. Örneğin, Tablo 2.6'da Bowles (1996), tarafından çeşitli zeminler tarafından önerilen yatak katsayısı değerleri Tablo 2.7'de ise Das (1990) tarafından yeterli deneysel veri olmaması durumunda boyutları 0,3×0,3 m olan standart plaka için verilen yatak katsayısı değerleri verilmiştir (Yıldırım, 2009).

Tablo 2.6: Farklı zeminler için yatak modülü değerleri (Bowles, 1996).

Zemin Cinsi	k_s (kN/m ³)
Gevşek kum	4800-16000
Orta sıkılıkta kum	9600-80000
Sıkı kum	64000-128000
Killi orta sıkılıkta kum	32000-80000
Siltli orta sıkılıkta kum	24000-48000
Killi zeminler:	
$q_a \leq 200$ kPa	12000-24000
$200 < q_a \leq 800$ kPa	24000-48000
$q_a > 800$ kPa	>48000

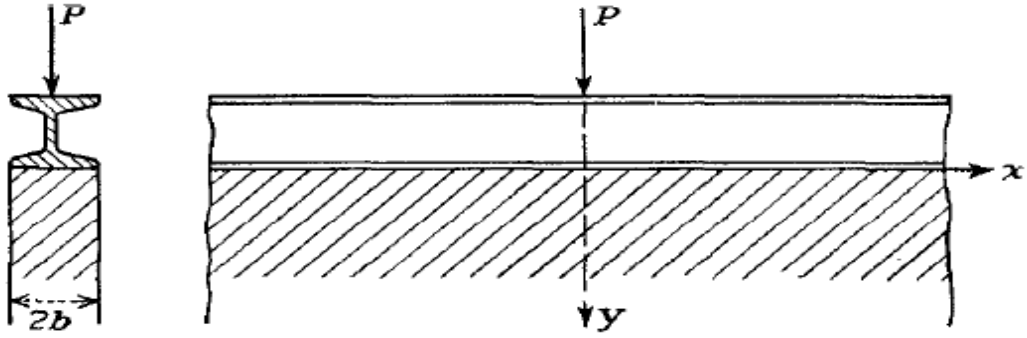
Tablo 2.7: Das (1990)'a göre bazı zemin türleri için yatak katsayısı değerleri.

Zemin	Sıklık-Kıvam	$k_{0.3}$ (MN/m ³)
Kuru veya nemli kum	Gevşek	8-25
	Sıkı	25-125
	Orta Sıkı	125-375
Suya doymuş kum	Gevşek	10-15
	Sıkı	35-40
	Orta Sıkı	130-150
Kil	Katı ($S_u=50-100$ kPa)	12-25
	Çok Katı ($S_u=100-200$ kPa)	25-50
	Sert ($S_u>200$ kPa)	>50

Yatay yatak katsayısı yöntemi kullanılarak yapılmış analizlerin saha gözlemleri ve sürekli ortam analizlerinden elde edilen sonuçlar kıyaslandığında doğru tespit edilmiş yatak katsayılarının gerçeğe yakın değerler verdiği gözlemlenmiştir. Birand (2001), yatak katsayısının tayininde bazı araştırmacıların kazıkta meydana gelen ötelenmeyi kullanarak, bazılarının elastik ortam analizlerinden elde edilen sonuçlardan yola çıktıklarından, bir grup araştırmacının ise maksimum moment değerini yay katsayısı olarak kullanıp elastik ortam çözümlerinden elde ettikleri sonuçlara yakınsamaya çalıştıklarından söz etmektedir.

Bu çalışma kapsamında düşey ve yatay yatak katsayılarının hesabında zemine ait kullanılacak parametreler zeminin Elstisite Modülü (E_s) ve Poisson oranıdır (ν_s).

Literatürde zeminin homojen, izotrop ve elastik özelliklerini tanımlayan iki parametre olan Elastisite Modülü ve Poisson oranına bağlı olarak bu katsayıyı bulmayı amaçlayan birçok araştırma mevcuttur. Biot (1937), üç boyutlu yarı elastik zemin üzerine oturan $2b$ genişliğindeki şerit bir temel için tekil yük altında çözüm yapmıştır. Zeminde meydana gelen deplasmanı çift sinüs eğrisi ile tanımlamıştır. Biot, (1937) Denklem 2.25 ile Winkler hipotezi ve elastik zemin modeli arasındaki ilişkiyi göstermiştir. Eşitlikte E_s ve E_p zemin ve kazığın elastisite modülü, B ($2b$) temel genişliği, I_p kazığın atalet momenti ve ν_s ise zeminin Poisson oranıdır. Bu ifadenin elastik ortam çözümleri için yapılmış analizlerle kıyaslandığında maksimum moment bulgularının yakınlığı görülmüştür (Birand, 2001).



Şekil 2.37: Biot (1937)'un elastik zemine oturan şerit temeli.

$$k_s = \frac{0.95E_s}{B(1-\nu_s^2)} \left[\frac{B^4 E_s}{(1-\nu_s^2) E_p I_p} \right]^{0.108} \quad (2.25)$$

Terzaghi, (1955) gerçek boyuttaki bir temel için yatak katsayısının plaka yükleme deneyi sonuçları kullanarak Denklem 2.26 ve 2.27'deki eşitlikler vasıtasıyla bulunacağını öne sürmüştür.

Kil zemine oturan temeller için, k_s :

$$k_s = k_1 \frac{B_1}{B} \quad (2.26)$$

Kum zemine oturan temeller için, k_s :

$$k_s = k_1 \left(\frac{B+B_1}{2B} \right)^2 \quad (2.27)$$

Burada k_1 bir kenarının uzunluğu 0,3 m olan kare plaka kullanılarak yapılmış plaka yükleme deneyi ile hesaplanan yatak katsayısıdır. B_1 , plaka yükleme deneyinde kullanılan temelin genişliği ya da kare temelse bir kenar uzunluğudur. Terzaghi (1955) killi zeminlerde ve taban basıncının taşıma gücünün yarısından daha az olması durumunda $B_1=0,3\text{m}$ değerinin kullanabileceğini önermiştir; fakat Bowles (1996), boyutlar arasındaki ilişkinin $B/B_1 \approx >3$ olması durumunda Denklem 2.26 ve 2.27'den elde edilecek değerlerin doğruluğunun bozulacağını öne sürmüştür. Ayrıca Bowles (1996) Terzaghi'nin yaklaşımıyla yatak katsayısı hesabı yapılırken plaka yükleme deneyinde kullanılan gerçek plaka boyutların kullanılmasını önermektedir.

Elastisite Modülü ve yatak katsayısı arasında doğrudan ilişkiyi gösteren bir diğer çalışma ise Vesic (1961), tarafından yapılmıştır. Bu çalışmada yatak katsayısı ile zeminin ve temelin elastisite modülü arasındaki ilişki Denklem 2.28'deki gibi tanımlamıştır.

$$k_s = \frac{0.65E_s}{B(1-\nu^2)} \sqrt[12]{\frac{E_s B^4}{E_p I_p}} \quad (2.28)$$

Bu denkleme göre herhangi bir sayının 12. dereceden kökünün 0,65 ile çarpılmasıyla elde edilecek sayı 1,0'e çok yakın olacağı için denklem pratik kullanıma uygun hale getirilerek Denklem 2.29'daki halini almıştır:

$$k_s = \frac{E_s}{B(1-\nu^2)} \quad (2.29)$$

Yatak katsayısının tahmininde kullanılan bir formül de Bowles (1996) tarafından önerilmiştir. Bu yaklaşımda, temel yapısının, zeminden 10 kat veya daha fazla rijit olması sebebiyle yatak katsayısının zeminin izin verilir taşıma gücüne göre hesaplanabileceğini önermiştir (Bowles, 1996).

$$k_s = 40(GS)q_a \quad (2.30)$$

$$q_a = q_{ult}/GS \quad (2.31)$$

Bu denklem, zeminde $\delta=25$ mm oturmaya neden olacak nihai taşıma gücünün (q_{ult}) bir güvenlik sayısına (GS) bölünmesiyle elde edilen izin verilir taşıma gücüne dayanmaktadır.

Burada, 25 mm'lik deplasman için güvenlik sayısı 40 olarak alınmıştır. Farklı oturma değerleri $\delta=6, 12, 20$ mm için güvenlik sayısı sırasıyla 160, 83, 50 olur.

Bowles ayrıca, yatay ve düşey yatak katsayısının hesaplanmasında Denklem 2.32'de verilen yöntemi de önermiştir:

$$k_s = A_s + B_s Z^n \quad (2.32)$$

Bu denklemde A_s düşey ve yatay yatak katsayısı için bir katsayı, B_s derinliğe bağlı bir katsayı, Z derinlik ve n gerçeğe en uygun k_s değerini elde etmeyi sağlayan kuvvet değeridir. A_s , B_s ve n değerleri önceden bilinmeyen ve her özel arazi koşulu deneyleri sonuçları kullanılarak tersten hesaplanabilir (Kın, vd., 1991). Ayrıca, bu eşitlikte A_s veya B_s , sıfır olabilir. Örneğin, zemin yüzeyinde yatay yöndeki yatak katsayısı hesabında A_s değeri sıfıra eşittir; fakat yüzey dışındaki tün derinlikler için $A_s > 0$ olmalıdır. Sığ pabuç ve radye temeller için $A_s > 0$ ve $B_s \cong 0$ olmaktadır (Bowles, 1996).

Yatak katsayısının Elastisite Modülüne bağlı olarak hesaplandığı yöntemlere örnek olarak sırasıyla Mayerhof ve Baice (1965) ve Selvadurai (1984) Denklem 2.33 ve 2.34 ile örnek olarak verilebilir

$$k_s = \frac{E_s}{B(1-\nu_s^2)} \quad (2.33)$$

$$k_s = \frac{0.65}{B} \cdot \frac{E_s}{(1-\nu_s^2)} \quad (2.34)$$

2.12.1 Yatay Yatak Katsayısının Bulunmasında Kullanılan Yöntemler

Yatay yatak katsayısı ile analiz yaparken kazık boyunca belirli aralıklarla yerleştirilmiş bu yayların rijitliğinin yer değiştirmeye, derinliğe, zemin türüne ve kazık çapına bağlı olarak değiştiğinin göz önünde bulundurmak gerekir. Yatay yatak katsayısının ayrık daneli, kohezyonsuz zeminlerde ve (normal konsolide) yumuşak killi-siltli zeminlerde derinlikle arttığı varsayılır. Bu tip zeminlerde yatay yatak katsayısının tayininde Denklem 2.35 kullanılabilir:

$$k_h = n_h x \quad (2.35)$$

Burada n_h (kN/m³) değeri derinliğe göre yatak katsayısı değişim çarpanıdır. Değişim çarpanının alacağı değerler kumlu zeminlerde bağıl sıklığa bağlı olarak Terzaghi tarafından Tablo 2.8'deki gibi verilmiştir:

Tablo 2.8: Kumlar için n_h (kN/m³) değerleri.

Kum	Gevşek	Orta	Sıkı
Kuru	1800-2200	5500-7000	15000-80000
Suya Doygun	1000-1400	3500-4500	9000-12000

Ayrıca Elson (1984), kumlu zeminlerde yatay yatak katsayısı çarpanının bağıl sıklığın bir fonksiyonu olarak da hesaplanabileceğini gösteren bir yaklaşım sunmuştur. Denklemden D_f kumun bağıl sıklığıdır:

$$n_h = 0.19D_f^{1.16} \quad (2.36)$$

Normal konsolide killerde ise yatay yatak katsayısının derinlikle doğrusal olarak değiştiği varsayımına dayanarak literatürde yatay yatak katsayısı çarpanıyla ilgili birçok değer verilmiştir (Tablo 2.9). Ayrıca bu tür zeminlerde n_h 'ı belirlemede zeminin kıvamı da belirleyici bir kıstas olabilir. Örneğin çok yumuşak zeminlerde n_h değerleri 0-300 kN/m³, yumuşak kıvamda olan zeminlerde 300-1500 kN/m³ ve orta katı kıvamda olan zeminlerde ise 1500-3030 kN/m³ arasında değerler alınabilir (Yıldırım, 2009)

Tablo 2.9: Normal konsolide zeminlerde n_h değerleri (Yıldırım, 2009).

Zemin Türü	n_h (kN/m ³)	Kaynak
Yumuşak Kil	160 - 3500	Reese - Matlock (1956)
	270 - 340	Davisson - Prakash (1963)
	100 - 270	Peck - Davis (1962)
Organik zemin	100 - 815	Davisson (1970)
	55	Davisson (1970)
Turba	30 - 100	Wilson - Hilfs (1967)

Aşırı konsolide olmuş kohezyonlu zeminlerde ise yatay yatak katsayısının serbest basınç mukavemeti S_u ile yaklaşık olarak doğru orantılı olduğu kabul edilir. Üzerindeki buzulların kalkması gibi nedenlerle aşırı konsolide (ön gerilmeye uğramış) olmuş killi zeminlerde yatay yatak katsayısı derinlikle değişmezken, aşırı konsolide olmuş zeminlerde yatay yatak katsayısı derinlikle azalır (Toğrol ve Tan, 2009). Davisson (1970) aşırı konsolide olmuş zeminlerde yatak katsayısının derinlikle değişmeyeceği varsayımından yola çıkarak yatay yatak katsayısı ve drenajsız kayma mukavemeti arasındaki Denklem 2.37'de verilen bağıntıyı önermiştir.

Fakat daha sonra yatay yatak katsayısı hesabında bu yaklaşımın oldukça muhafazakâr olduğu düşüncesiyle yaklaşık iki katının alınması gerektiği öne sürülmüştür (Robinson, 1979).

$$k_h \approx 67S_u \quad (2.37)$$

Literatürde bazı araştırmacılar elastik ortam çözümlerinden elde edilen sonuçlara dayanarak yatak katsayısını bulmayı amaçlamışlardır. Örneğin, Vesic (1961)'in elastik zemine oturan sığ temeller için yatak katsayısı teorisinde dayanarak (Denklem (2.28)) yatay yatak katsayısının hesaplanabileceğini belirtmişlerdir (Poulos ve Davis, 1980). Ayrıca bu ifade ile hesaplanmış yatak katsayısı değerleri kullanılarak yapılan çözümlerle, kesit kuvvetleri ve ötelenme miktarları için elastik ortam çözümleri kıyaslandığında %10 mertebesinde hata payı olduğu gözlemlenmiştir (Birand, 2001).

$$k_h = \frac{0.65E_s}{D(1-\nu^2)} \sqrt[12]{\frac{E_s D^4}{E_p I_p}} \quad (2.38)$$

Bowles (1996) yatay yatak katsayısı hesaplanırken kazıklı temeller için bu bağlantının iki katının kullanılmasını önermiştir (Kın vd., 1991). Diğer yandan elastik parametreler ve Denklem 2.28'de verilen yöntemle hesaplanan yatak katsayısı kullanılarak yapılan analiz sonuçları kıyaslandığında maksimum moment değerlerinin birbirine yakın olduğu saptanmıştır (Birand, 2001).

$$k_h = \frac{0.95E_s}{(1-\nu^2)} \left[\frac{E_s D^4}{(1-\nu^2)EI} \right]^{0.108} \quad (2.39)$$

Poulos ve Davis (1980), kazık boyunun kazık çapına oranı (narinlik) 25 olan yanal yüklenmiş ankastre kazıklarda yatay yatak katsayısı olarak Denklem 2.40'daki ifade kullanıldığı takdirde bulunan ötelenme miktarının elastik teori ile bulunan değere yakın olduğunu belirtmiştir.

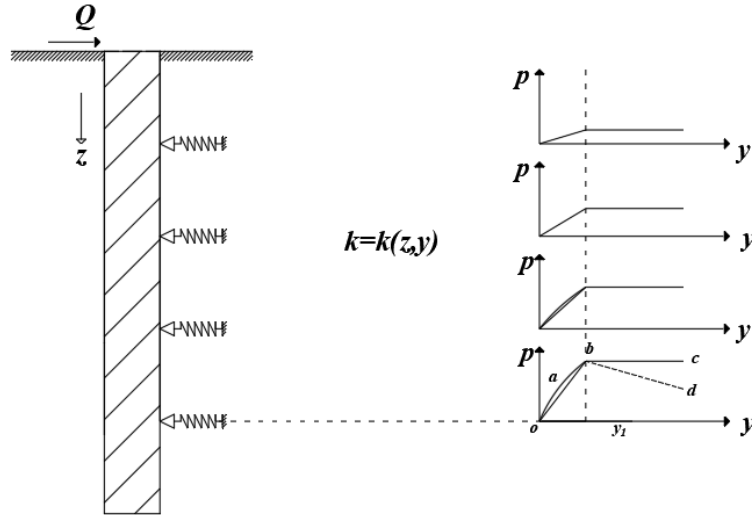
$$k_h = \frac{0.82E_s}{D} \quad (2.40)$$

Scott (1981) yatay yatak katsayısı değerini hesaplarken aşağıda verilen bağıntıyı önermektedir.

$$k_h = \frac{E_s}{D} \quad (2.41)$$

2.13. YATAY YATAK KATSAYISININ DEĞİŞİMİ

Yatay yatak katsayısı derinlik, kazık çapı, deplasman, yükleme tipi, yükleme hızı ve zeminin geçmişinde kaç kez yüklendiğine bağlı olarak değişebilir. Zemin ortamına yerleştirilmiş düşey bir kazık yatay yönde yüklendiğinde içinde olduğu zeminde ötelenmeye neden olur. Kazığa etkiyen yanal kuvvetlere karşı zeminin verdiği tepki bir grup yay ile temsil edilebilir. Terzaghi (1955), kazığın düşey bir kiriş gibi davrandığını varsayarak yatay yükleme altında kazığın birim boyunda meydana gelecek birim yatay yer değiştirmeyi yayın bu doğrultudaki rijitliğinin belirlediğini öne sürmüştür ve yatay yatak katsayısı kavramını geliştirmiştir



Şekil 2.38: Yatay yüklenen bir kazıkta zemin davranışının temsili (Birand, 2001).

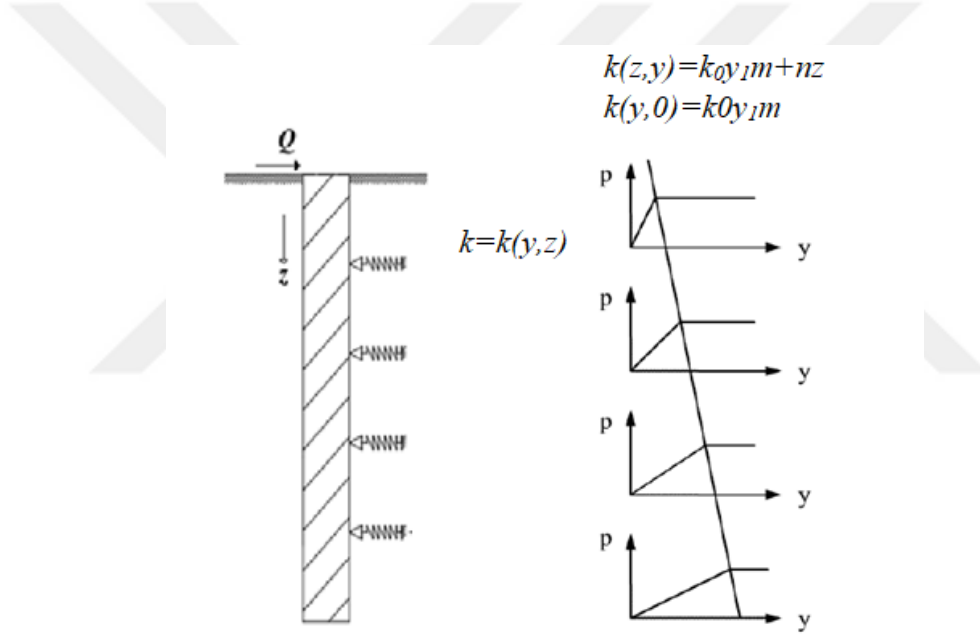
Şekil 2.38’de bir tekil kazık boyunca zemini temsil eden yaylar verilmiştir. Şekle göre bir kazık yatay olarak yüklendiğinde zeminde meydana gelecek ötelenme zeminde gerilme artışına neden olacak ve p_y ile tarif edilen taşıma gücüne ulaşacaktır. Bu durum Şekil 2.38’deki en alt yayla gösterilmiştir. Durum diğer yaylarda da aynıdır. Şekildeki en alttaki yayla ait $oabd$ eğrisi, zeminin gerçek davranışını doğrusal olmayan (nonlineer) bir matematiksel ilişki ile ifade eder. Bu eğriye göre göre zemin nihai taşıma gücüne (p_{ult}) ulaşana kadar oab eğrisi gibi davranır. Ayrıca kazık boyunca derine inildikçe aynı öteleme miktarına ulaşabilmek için daha fazla yük gerektiği görülmektedir. Diğer bir değişle yay rijitliği derine inildikçe artacaktır. Bu davranış Denklem 2.42 ile ifade edilir ve derinliğe bağlı

olarak kazıkta meydana gelen deplasmana karşılık gelen zemin direncini gösteren eğrilere p - y eğrileri adı verilir. Bu eğriler zeminin doğrusal olmayan davranışını temsil etmektedir.

$$p = k(z, y)y \quad (2.42)$$

Aşırı konsolide killer gibi bazı zemin türlerinde analizde hesap kolaylığı açısından eğrinin doğrusal olduğu kabul edilirse Denklem 2.43 elde edilir. Bu denklemde k'_h değeri yatak modülüdür.

$$p_z = k'_h y \quad (2.43)$$



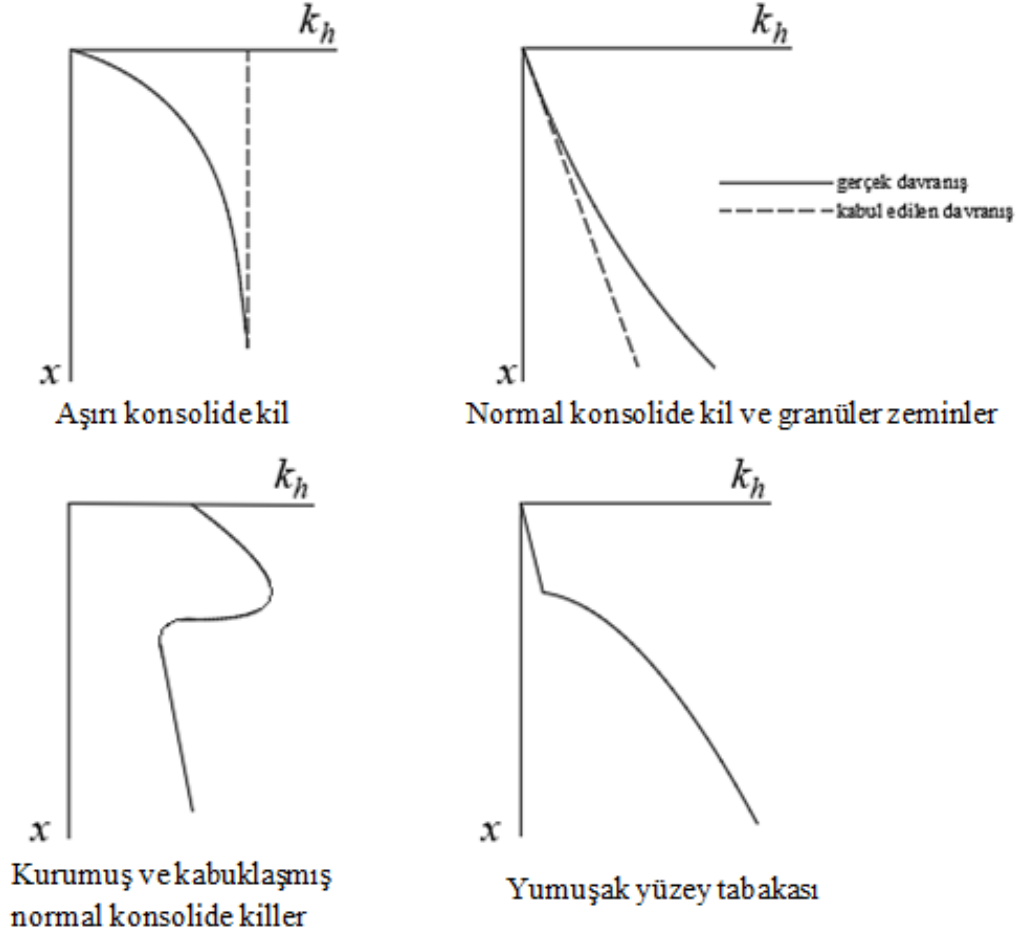
Şekil 2.39: Doğrusal elastik-plastik davranış (Birand, 2001).

Kohezyonsuz zeminler ile yumuşak kil ve siltlerin davranışını ifade etmek için Şekil 2.39’da verilen elastik-plastik yaylar kullanılır. Bu tip zeminlerde yatak katsayısı derinliğe bağlı değişmektedir (Denklem 2.44). İfadede yer alan n değeri yatak katsayısının derinlikle doğrusal olarak artan granüler zeminlerde ve yumuşak killerde 1,0 olarak alınırken, yatay yatak katsayısının sabit olduğu aşırı konsolide killerde derinlik faktörünün etkisini ortadan kaldırmak için sıfır olarak alınır.

$$p_z = k'_h x^n y \quad (2.44)$$

Drenajsız koşullar altında, Denklem 2.43’de $n=0,15$ değerinin kullanılması zemin yüzeyinde oluşan plastik davranışın göz önüne alınmasını sağlamaktadır (Poulos ve Davis, 1980).

Şekil 2.40’da yatay yatak katsayısının farklı zemin türleri için derinlikle değişiminin gerçeğe yakın ve kabul edilen değişim eğrileri verilmiştir.

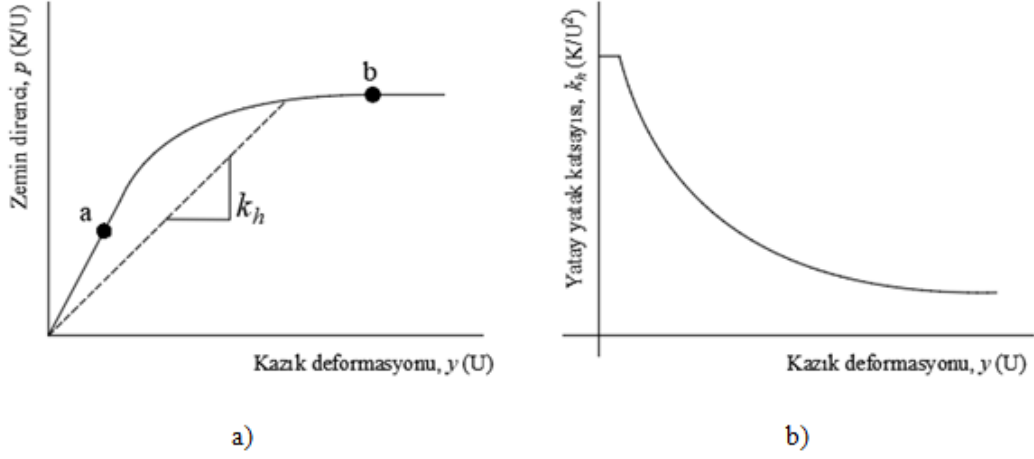


Şekil 2.40: Yatak katsayısının derinlikle değişimi.

Denklem 2.45’te yatay yatak modülünün derinliğe bağlı değişimini gösteren en yaygın kullanımı verilmiştir.

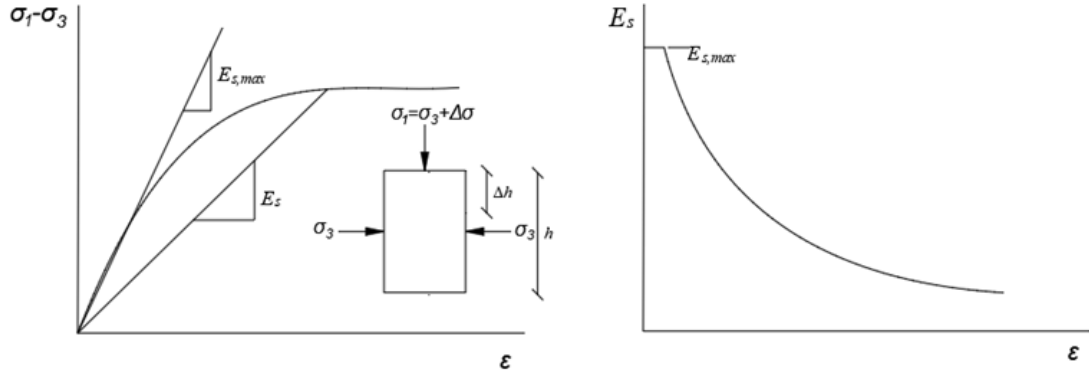
$$k_h' = n_h \frac{x}{D} \quad (2.45)$$

Yatak katsayısının deplasmana değişim de bu katsayısının değeri incelenirken göz önünde bulundurulması gereken önemli bir husustur. Kazığın maruz kaldığı yüke bağlı olarak zemin davranışını temsil eden yay rijitliklerinde bir miktar azalma olacaktır.



Şekil 2.41: a) Yük-deformasyon (p-y) eğrisi b) Yatak katsayısının deformasyona bağlı değişimi.

Şekil 2.41b’de görüldüğü üzere yatay yüklere maruz kalan kazıklarda küçük deformasyonlar altında belirli bir değere kadar yatak katsayısı sabit kalır. Fakat sınır deplasman değeri aşıldıktan sonra yatak katsayısında hızlı bir düşüş meydana gelir. Bu davranışın benzeri üç eksenli basınç deneyi sonucunda elde edilen elastisite modülü-şekil değiştirme eğrisinde gözlemlenebilir.



Şekil 2.42: Üç eksenli basınç deneyi ile elastisite modülü gösterimi ve deformasyonla ilişkisi.

2.14. YÜKLER

Yükler, servis ömrü boyunca yapıyı etkileyeceği öngörülen ve yapının tasarımı sırasında göz önüne alınması gereken (düşey yükler, rüzgâr, deprem vb. yatay yükler, farklı temel oturmaları, sıcaklık değişimleri, sünme, büzülme olayları sonucunda oluşan şekil değiştirmeler) fiziksel etkilerdir (TS500, 2000).

Güneş panellerinin taşıyıcı elemanları tasarımcıya bağlı olarak farklı türde yapı malzemeleri (beton, çelik, ahşap) kullanılarak üretilebilir. Çelik yapısal elemanlar kullanılarak inşa edilmiş bir güneş paneli sisteminin tasarımı, yapının maruz kalacağı yükler ve muhtemel yük kombinasyonları ilgili şartnameler (TS 498 Yapı Yüklemleri Hakkında Yönetmelik, TS 648 Çelik Yapılar Hakkında Yönetmelik, DBYYHY 2007 Deprem Bölgelerinde Yapılacak Yapılar Hakkında Yönetmelik) doğrultusunda yapılır.

TS 648, kalınlığı minimum 4 mm olan tüm çelik taşıyıcı eleman ve bileşenleri için gerekli tasarım esaslarını sağlar. Aynı şartnameye göre dayanım ve stabilite hesapları için gerekli tüm hareketli ve ölü yüklerin TSE 498’de verilen hesap yöntemleri ile elde edilmesi gerekmektedir. Bu standart, konutlar, bürolar, resmi daireler, okullar, hastaneler, spor tesisleri, eğlence yerleri, garajlar vb. yapılardaki taşıyıcı elemanların (kagir, beton, betonarme, ahşap, çelik vb.) boyutlandırılmasında alınacak yüklerin hesap değerini kapsar. Projenin uygulanacağı bölgede meydana gelecek ölü ya da hareketli yüklerle ilgili yeterli bilgi olmadığı takdirde, muhtemel yükler yetkili proje kontrolü ile ortaklaşa tayin edilir (TS468, 1980).

2.14.1. Düşey Yükler

Güneş paneli projelerinde sisteme etkiyen düşey doğrultulu yükler, yapının kendi ağırlığı (zati yük), güneş panellerinin ağırlığı ve kar yüküdür.

2.14.1.1. Zati Yük ve Panel Yükleri

Güneş paneli sistemlerinde zati yük diğer bir ifadeyle yapının kendi ağırlığı, çelik konstrüksiyonu oluşturan tüm elemanların (kolonlar, kirişler, aşıklar, çapraz elemanlar vb.) ağırlıkları toplamıdır. Panel ağırlıkları ise değişiklik göstermektedir. Zati yük ve panel yükleri sisteme etkiyen ölü (hareketsiz) yüklerdir.

2.14.1.2. Kar Yükleri

Panellerin maruz kalması muhtemel bir diğer düşey yük ise kar yüküdür (P_{k0}). Kar yükleri binaların yapılacağı bölgelerin coğrafi ve meteorolojik etkenlerine bağlı olarak değişen hareketli yüklerdir.

[illegible]

Kar yükü azaltma değeri hesaplandıktan sonra kar yükü hesap değeri yatayla α kadar eğim yapan ve kar kaymasının engellenmediği çatılarda kar yükü hesap değeri aşağıdaki gibi hesaplanır:

$$P_k = m \times P_{k0} \quad (2.47)$$

Ayrıca kar yükü (P_{k0}) değeri, Şekil 2.43'te verilen haritadan hesap yapılacak bölgenin numarası belirlendikten sonra TS 498 Çizelge 4'ten (Tablo 2.11) zati kar yükü hesaplanabilir. Kar yağışı gerçekleşmeyen bölgelerde kar yükü hesap değerinin sıfır olduğu kabul edilir (TS498, 1997).

Tablo 2.11: Zati kar yükü (P_{k0}) değerleri (kN/m^2).

Yapı Yerinin Denizden Yüksekliği	BÖLGELER			
m	I	II	III	IV
≤ 200	0.75	0.75	0.75	0.75
300	0.75	0.75	0.75	0.80
400	0.75	0.75	0.75	0.80
500	0.75	0.75	0.75	0.85
600	0.75	0.75	0.80	0.90
700	0.75	0.75	0.85	0.95
800	0.80	0.85	1.25	1.40
900	0.80	0.95	1.30	1.50
1000	0.80	1.05	1.35	1.60
>1000	1000 m'ye tekabül eden değerler, 1500 m'ye kadar %10, 1500 m'den yukarı yüksekliklerde %15 artırılır.			

2.14.1.3. Buz Yükleri

Buz oluşumu birçok farklı etmene (rüzgâr yönü, yükseklik, nem, hava sıcaklığı, yapı malzemesi cinsi vb.) bağlı olduğu için TS 498'de yapılara etkiyen buz yükünün hesabıyla ilgili detaylı hesap yöntemleri verilmemiştir. Fakat buzlanmanın kaçınılmaz olduğu bölgelerde tasarım aşamasında mutlaka buz yükü değerinin hesaplanması gerekiyorsa deniz seviyesinden 400 m ve daha yüksekteki bölgelerde buzlanmaya maruz kalacak yapı elemanlarının tüm yüzeylerinin 3 cm kalınlıkta buz ile kaplı olduğu kabul edilerek hesap yapılır ($\gamma_{buz} = 7 \text{ kN} / \text{m}^3$) (TS498, 1997). Bu çalışmada güneş panellerinin sahip olduğu mevcut ısı nedeniyle üzerinde buz tabakasının oluşmayacağı varsayılmıştır.

2.14.2. Yatay Yükler

2.14.2.1. Rüzgâr Yükleri

Rüzgâr yükü hesabı yapılırken yapının geometrisi göz önüne alınır. Rüzgâr yapıda basınç, emme ve sürtünme etkileri meydana getirir. Analiz sırasında bu etkiler birleştirilerek hesap yapılır. Rüzgâr yükü, her yönde en büyük değerinde tesir eder şekilde ele alınmalıdır. Rüzgâr yükünün doğrultusu genellikle yatay kabul edilir (TS498, 1997).

Bir yapıya etki eden rüzgâr yükünün büyüklüğü TS 498'e göre Denklem 2.48'de verildiği gibi hesaplanabilir.

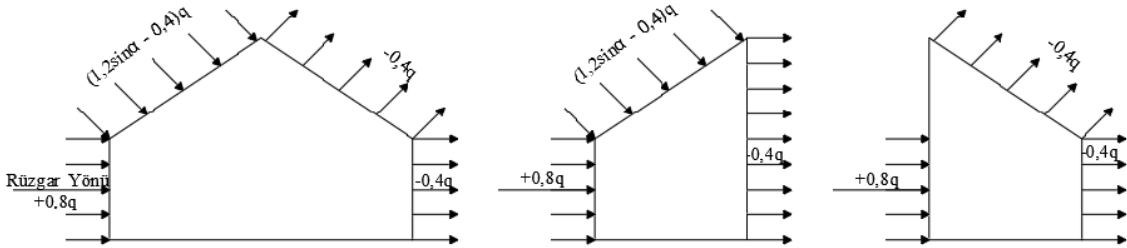
$$W = C_f \times q \times A \text{ (kN)} \quad (2.48)$$

C_f : Aerodinamik yük katsayısı

q : emme (hız basıncı), kN/m^2

A =Etkilenen yüzey alanı, m^2

Rüzgâr kanalı deneyinden elde edilen aerodinamik yük katsayısı, yapı geometrisine ve rüzgârın esiş yönüne bağlıdır. Bu katsayı Şekil 2.47'den ya da TS498 Çizelge 6'dan hesaplanabilir (TS498, 1997).



Şekil 2.44: Planda kare kesitli ve eğik çatılı kapalı yapılarda rüzgâr yükünün dağıtımı

Emme basıncı ise Denklem 2.49'a göre hesaplanabilir:

$$q = \frac{\rho v^2}{2g} \text{ (kN/m}^2\text{)} \quad (2.49)$$

Yapıya etki eden rüzgâr hızı topografik şartlar nedeniyle değişebilir. TS 498 Çizelge 5'te yapının yerden yüksekliğine bağlı olarak rüzgâr hızı ve emme basıncı değerleri verilmiştir (Tablo 2.12). Bu çalışmada analizi yapılan güneş panellerinin yerden yüksekliği yaklaşık olarak 80 cm ve 200 cm olduğundan panellere etkiyen emme değeri 0-8 m aralığı içinden 0,5 kN/m² olarak seçilir.

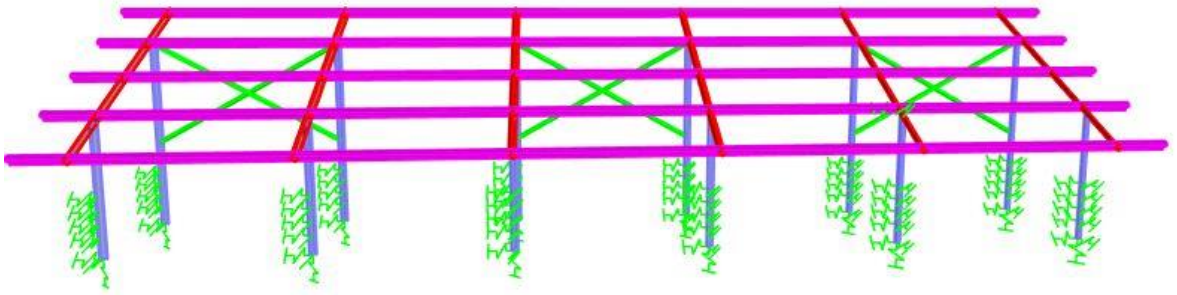
Tablo 2.12: Yüksekliğe bağlı olarak rüzgâr hızı ve emme (TS498, 1997).

ZemindenYükseklik (m)	Rüzgâr Hızı, v (m/s)	Emme ,q (kN/m ²)
0 - 8	28	0,5
21 - 100	36	0,8
21 - 100	42	1,1
> 100	46	1,3

3. MALZEME VE YÖNTEM

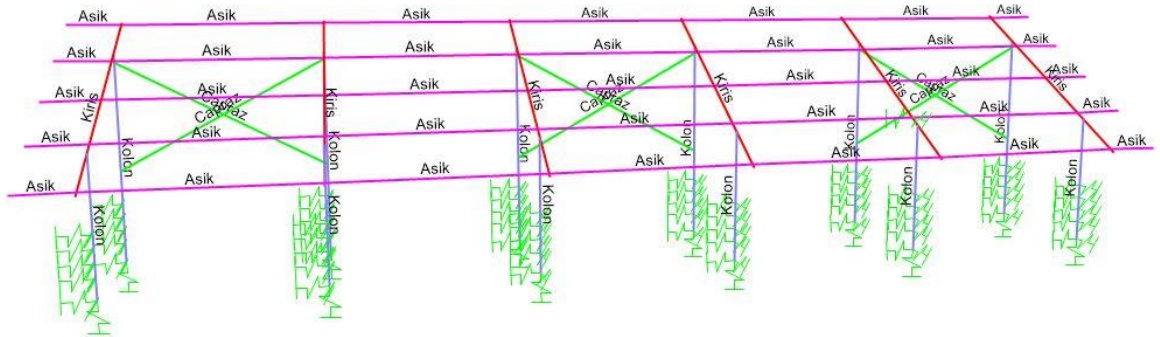
3.1. YÖNTEM

Bu çalışmada Ankara ili Gölbaşı ilçesi Emirler mevkiine kurulacak Acar Emirler GES-2 Projesi için Sayhan Mühendislik tarafından hazırlanmış güneş paneli taşıyıcı sistem statik hesap raporunda verilen kesitler ve boyutlar kullanılarak sisteminin üç boyutlu modeli yapısal analiz programı SAP2000’de oluşturulmuştur.



Şekil 3.1: Panel sistemi: Taşıyıcı konstrüksiyonun üç boyutlu modeli.

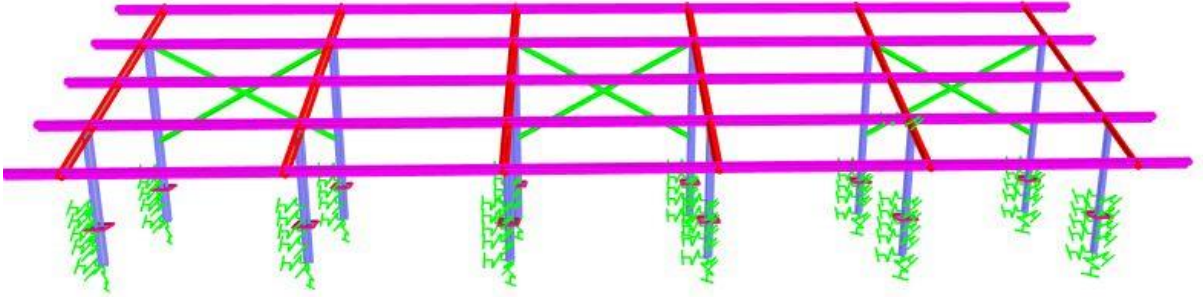
Model toplamda 12 adet kazık, 6 adet kiriş ve diğer yardımcı elemanlardan (aşık ve çapraz bağlar) oluşmaktadır (Şekil 3.2). Projenin kurulacağı mevki göz önüne alınarak maruz kalması muhtemel kar ve rüzgâr yükleri hesaplanmış ve istem modeline uygulanmıştır. Panel sisteminin imal edildiği zemin tabakasının projede verilen soket boyu 1,20 m olduğu için tek tabakadan oluştuğu varsayılmıştır.



Şekil 3.2: Çelik elemanlar ve yaylar.

Bir statik analiz programı olan SAP2000’de zeminin mekanik davranışını tanımlamak için gerekli olan tek girdi yatak katsayısıdır. Vesic (1961)’e dayanarak yatak modülleri (k_s) hesaplanmış ve bu değerler kullanarak yatay ve düşey yay rijitlikleri elde edilmiştir. Hesaplanan yay rijitlikleri kazıklarda gömme derinliği boyunca 20 cm’de bir oluşturulan düğüm noktalarına atanmıştır.

Çalışmanın ikinci aşamasında, çekme yüklerine maruz kalan güneş panellerinin temel sistemlerinde sıklıkla tercih edilen plakalı ve helisel kazıkların mekanik davranışını SAP2000 programında modelleyebilmek için AutoCAD’de iki boyutlu olarak çizilen plakalı kazıklar SAP2000 yazılımına entegre edilmiştir. Lutenege (2016) tarafından tekil plakalı kazıklar üzerinde uygulanmış çekme deneyleri incelenmiş ve deneyler SAP2000’de modellenerek bu tip sistemlerin SAP2000’de uygulanması hususunda fikir edinilmiştir. Bu doğrultuda çalışmanın ilk kısmında analiz edilen güneş paneli sistemi de plakalı olarak da modellenmiştir.



Şekil 3.3: Plakalı panel sistemi.

3.1.1. SAP2000

SAP 2000 (Structural Analysis Desing Program) çeşitli yapı sistemlerinin tasarım ve nümerik analizi için kullanılan bir yapısal analiz programıdır. Program sayesinde kullanıcı modelleme, yük belirleme ve farklı yük kombinasyonları altında sayısal çözümleme yapabilir. Bir inşaat mühendisliği yazılımı olan SAP2000 sonlu elemanlar yöntemiyle (FEM) analiz yapmaktadır. Bu metot sayesinde program yapısal elemanları sonlu sayıda ağlara bölerek her birinin ayrı ayrı gerilme analizi yapar, ardından çıkan sonuçlar birleştirilerek tek bir seferde gerilme analizinin mümkün olmadığı parçaların analizinin doğru bir şekilde yapılması sağlanır.

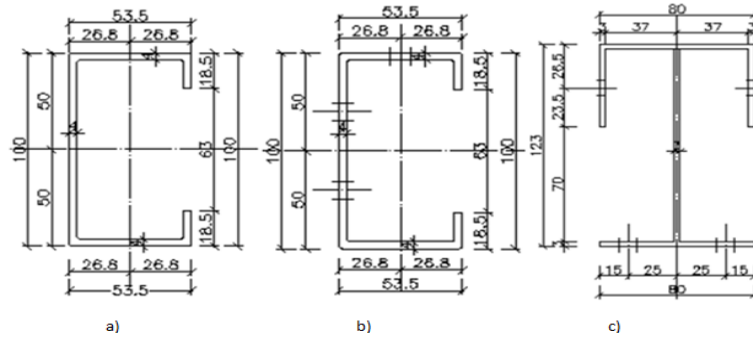
3.1.2. Güneş Paneli Sisteminde Bulunan Yapı Elemanlarının Malzeme ve Geometrik Özelliklerinin Tanımlanması

Projede kullanılan tüm yapısal elemanlar çeliktir. Modelde belirtilen yapı elemanları tanımlanırken Tablo 3.1'deki çelik profillere ait akma dayanımı (f_{yk}) ve Young Modülü (E_p) değerleri programa girilmiştir.

Tablo 3.1: Çelik profillerin malzeme özellikleri.

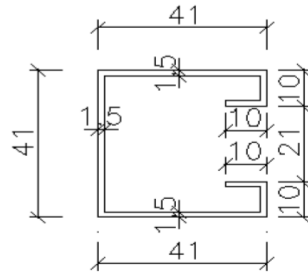
	Çelik Türü	f_{yk} (MPa)	E_p (MPa)
Yapısal Çelik 1	S235JR	235,36	210000
Yapısal Çelik 2	S235C	235,0	210000

Kolon, kiriş ve aşıkların geometrik şekilleri tanımlanırken SAP2000 içinde bulunan *Section Designer* özelliği kullanılmıştır. Böylelikle tüm çelik elemanların profil kesitleri projede verildiği şekilde SAP2000'de ayrı ayrı çizilmiştir.



Şekil 3.4: a) Çelik kolon profil detayı b) Çelik kiriş profil detayı c) Çelik aşıkların kesit detayı.

Projede belirtildiği üzere SAP2000'de oluşturulan modelde kolon, kiriş ve aşıkların S235JR çeliği, çapraz bağ elemanları ise soğuk döküm çelik olarak (S235C) olarak tanımlanmıştır.



Şekil 3.5: Çapraz eleman kesiti.

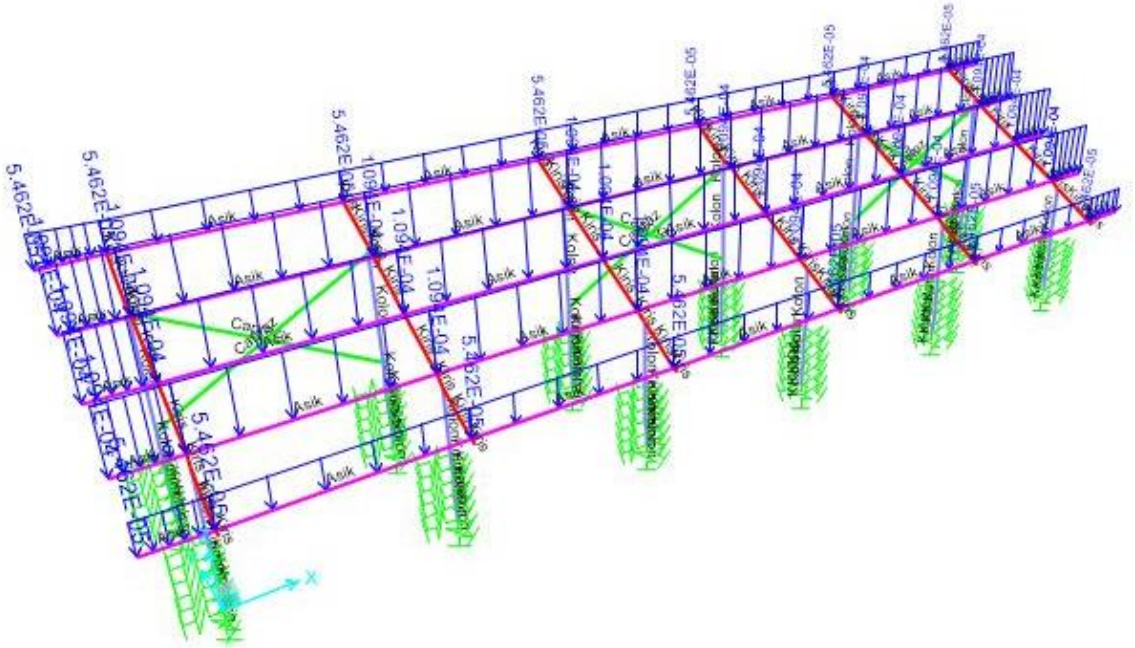
3.2. PANEL SİSTEMİNE ETKİYEN YÜKLERİN HESAPLANMASI VE MODELE UYGULANMASI

3.2.1. Panel Yüğü Hesabı

Çalışmada kullanılan modelde, yapı üzerinde ebatları 1640×990 mm ve ağırlığı 18,30 kg olan güneş panelleri bulunmaktadır. Panel yükleri aşıklar elemanlara düzgün yayılı yük olarak etkimektedir. Tablo 3.2’de sisteme etkiyecek güneş paneli yükleri hesaplanmıştır. Hesaplanan yükler Şekil 3.6’daki gibi modele düzgün yayılı yük olarak atanmıştır.

Tablo 3.2: Sisteme etkiyen panel yükleri.

Panel Yüğü (kg/adet)	18,30
Panel Yüzey Alanı (m ²)	1,623
Panel Yüğü (kN/m ²)	0,112
İç Kirişlere Aktarılan Panel Yüğü (kN/m)	0,055
Dış Kirişlere Aktarılan Panel Yüğü (kN/m)	0,109



Şekil 3.6: Panel yüklerinin aşıklara etkimesi (kN/m).

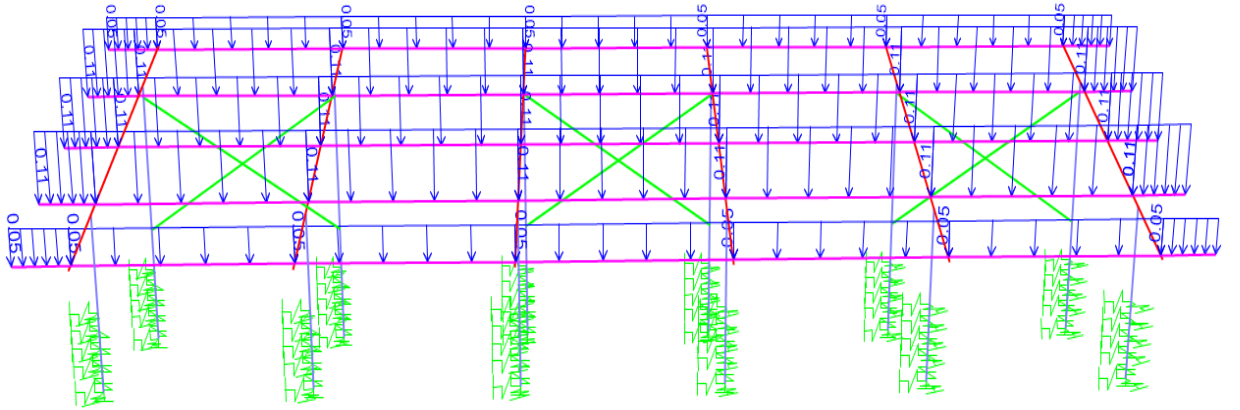
3.2.2. Kar Yüğü Hesabı

Bu çalışmada projesi incelenen güneş enerjisi santrali Ankara İli, Gölbaşı İlçesi, Emirler Köyü mevkiine inşa edilecektir. Bölgenin rakımı yaklaşık 1200 m’dir. Söz konusu bölge TS

498/EK-I İl ve İlçelere Göre Zatî Kar Yüğü Bölgeleri çizelgesi ve TS 498/EK-II’de verilen Kar Yağış Yüksekliği haritasına göre II. Bölge sınırları içinde yer almaktadır. TS 498’de verilen Çizelge 4’ten zati kar yüğü (P_{k0}) değeri santralin kurulacağı bölgenin rakımına ve kar yüğü bölgesine göre belirlenmiştir. Bu durumda panellere etkimesi muhtemel kar yüğü 30°’lik çatı meyili için ($m=1$), Tablo 3.3’teki gibi hesaplanmıştır. Şekil 3.7’de aşık elemanlara etkileyen kar yüğü verilmiştir.

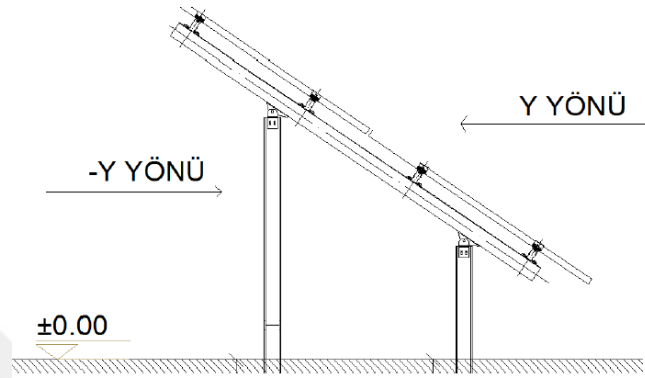
Tablo 3.3: Kar yüğü değeri.

Kar Yüğü	
P_{k0} (kN/m ²)	1,155
P_k (kN/m ²)	1,155
İç Kirişlere Aktarılan Kar Yüğü (kN/m)	1,143
Dış Kirişlere Aktarılan Kar Yüğü (kN/m)	0,571

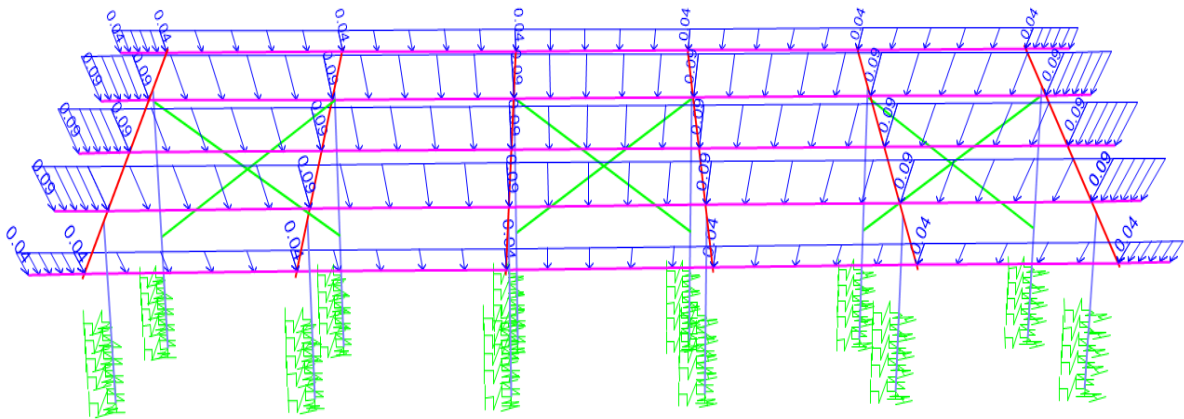


Tablo 3.4: Yapıya etkiyen rüzgâr yükleri.

Rüzgâr Yüğü (kN/m)/Yönü	+Y	-Y
İç Kirişlere Aktarılan	0,089	0,198
Dış Kirişlere Aktarılan	0,045	0,099

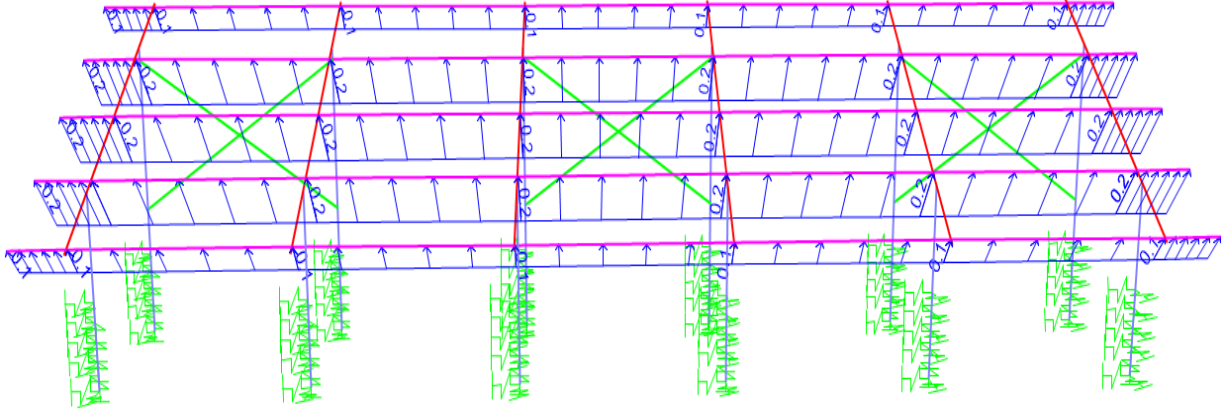


Şekil 3.8: Sisteme etkiyen $\pm Y$ yönünde rüzgâr yükü.



Şekil 3.9: +Y yönünde rüzgâr (kN/m).

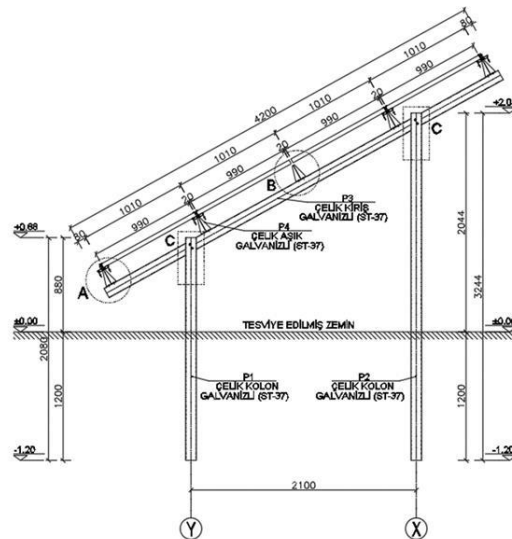
Model SAP2000’de tanımlandıktan sonra panel, kar ve rüzgâr yükleri ayrı ayrı düzgün yayılı yük olarak aşık elemanlara yüklenmiştir. Panel ve kar yükleri yer çekimi doğrultusunda sisteme yükletilirken rüzgâr yükleri TS498’de verilen yöntem doğrultusunda hesaplandığı üzere aşık elemanların normal eksenleri doğrultusunda + ve – yönlerde uygulanmıştır (Şekil 3.9 ve 3.10). Zati yükleme elemanların fiziksel özelliklerine bağlı olarak program tarafından hesaplanmaktadır.



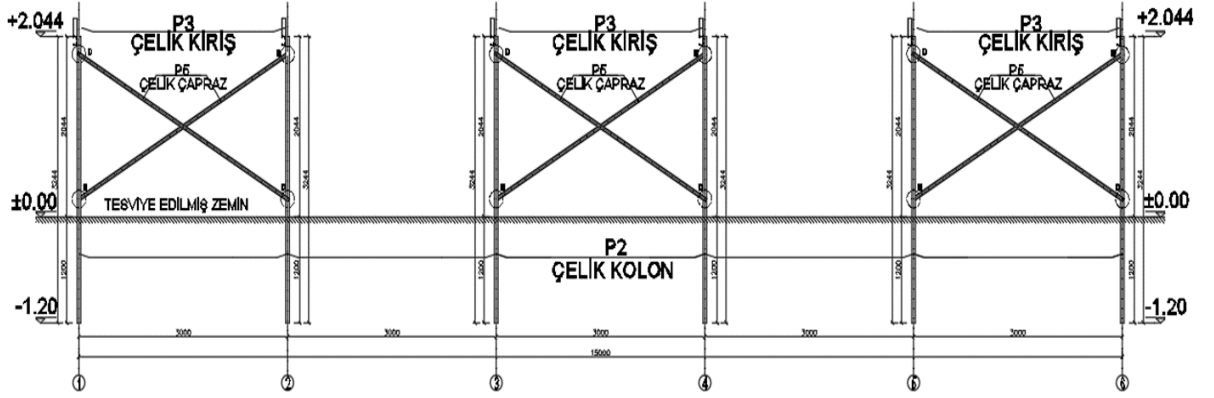
Şekil 3.10: -Y yönünde rüzgâr (kN/m).

3.3. PANEL SİSTEMİNİN YAPISAL MODELİ

Yapıda, ebatları 1640×990 mm olan paneller eğik aşık elemanlar üzerinde oturmaktadır. Aşıklar yükü kirişlere aktaran çelik profillerdir. Sistemin kolonlarını ve kirişlerini oluşturan çelik elemanların kesit boyutları 100×53,5×4 mm'dir. Kısa kolonların uzunluğu 2,08 m iken uzun kolonların boyu 3,24 m'dir (Şekil 3.11). Kirişlerin uzunluğu ise 4,20 mm'dir. Yatay yükler altında sistem stabilitesinin etkilemesini engellemek amacıyla uzun kolonlar Şekil 3.12'de gösterildiği gibi çapraz elemanlarla bağlanmıştır. Zemin içinde kalan soket boyu yapılan tüm analizlerde 1,20 m olarak alınmıştır.



Şekil 3.11: Panel sisteminin X-Y aksı kesiti.



Şekil 3.12: Panel sisteminde kullanılan çapraz elemanlar.

3.4. ZEMİN PARAMETRELERİ

Bu tez kapsamında güneş paneli sistemi için yapılan analizlerde zeminin lineer-elastik davranış gösterdiği kabul edilip zemin davranışının Hooke yasasına uyduğu varsayılmıştır. Panel sisteminde zemine ait kullanılan parametreler sadece Elastisite Modülü (E_s) ve Poisson (ν_s) oranıdır. Yatak katsayıları kullanılarak SAP2000’de oluşturulan model üzerinden yapılan analizlerden elde edilen deplasman değerlerinin kontrolü için Çıkılı (2017)’nin yapmış olduğu referans analizler kullanılmıştır. Bu çalışmadan yola çıkılarak zeminin Elastisite Modülü’nün gömme derinliği boyunca sabit ve 20 MPa ve 40 MPa olarak, Poisson oranı ise sabit 0,3 alınmıştır.

3.5.1. Yatak Katsayılarının Belirlenmesi

Acar Emirler GES-2 Projesi için hazırlanan statik raporda yatak katsayısı 30000 kN/m^3 olarak verilmiştir. Projede yatay yaylar zemin yüzeyinden itibaren 30 cm aralıklarla yerleştirilmiştir ve kazık tabanı ankastre mesnetlerle sabitlenmiştir. Zeminin kazık yüzeyi arasındaki sürtünme davranışı ihmal edilmiştir.

Bu çalışma kapsamında yatak katsayıları, düşey ve yatay doğrultuda analizi yapılan C profil kazık için Tablo 3.5 gibi hesaplanmıştır. Hesaplarda düşey yatak modülü hesaplanırken Vesic (1961) tarafından önerilen Denklem 2.28 kullanılmış, yatay yatak modülü hesaplanırken ise Bowles, (1996) tarafından önerildiği üzere düşey yatak modülünün iki katı alınmıştır. Proje kazığı için hesaplanan yatak modülü değerleri (k_s) ile SAP2000’e girilen yay rijitlikleri (K) Tablo 3.5’teki gibi verilmiştir.

Tablo 3.5: Panel sistemi yatak modülleri.

Yatak Modülü	$E_s=20$ MPa	$E_s=40$ MPa
k_s (kN/m ³)	98978	419454
k_h (kN/m ³)	197957	250000
K_s (kN/m)	97	204
K_f (kN/m)	4355	9228
K_{hx} (kN/m)	2000	5000
K_{hy} (kN/m)	3590	8389

Analizlerde plakalı kazıklarda mevcuttur. Plakalar için de ayrıca düşey doğrultuda çalışan yatak katsayıları Vesic (1961)'e göre hesaplanmıştır. Güneş paneli sistemindeki plakaların üzerine plaka gömme derinliği kadar zemin gerilmeleri etkidiği için yaylar sadece basınca çalışır biçimde tanımlanmıştır. Plakalara etkiyen yatak modülü değeri $E_s=20$ MPa olan zemin için 39403 kN/m³ olarak hesaplanmıştır ve SAP2000 tarafından otomatik olarak 2×2'lik ağlara bölünen plakalara atanmıştır.

3.5. PANEL SİSTEMİNE ETKİYEN YÜK KOMBİNASYONLARI

Bir yapıya etkiyen çeşitli yük türlerinin aynı anda yapıya tesir etme ihtimali çok küçüktür. Farklı yüklerin önemsenabilir olasılıkla aynı anda yapıya etki etmesini göz önüne alarak bu yükleri ekonomik ve güvenilir bir yapı inşa etme kriterine dayanarak bir araya getiren birleşimlere yük kombinasyonları denir. Sisteme etkiyecek yükler belirlendikten sonra yük birleşimleri şartnameler doğrultusunda belirlenip yapısal çözümleme yapılabilir. Bu çalışmada aşağıdaki tabloda verilen yük birleşimleri kullanılmıştır.

Tablo 3.6: Yük kombinasyonları.

Yük Kombinasyonu	Yük Adı	Yük Katsayısı	Yük Kombinasyonu	Yük Adı	Yük Katsayısı
D	DEAD	1	D+S+0.5WY	SNOW	1
D	PANEL	1	D+S+0.5WY	WINDY+	0,5
D+0.5S+WY	SNOW	0,5	D+S+0.5WY	D	1
D+0.5S+WY	WINDY+	1	D+S-0.5WY	SNOW	1
D+0.5S+WY	D	1	D+S-0.5WY	WINDY-	-0,5
D+0.5S-WY	SNOW	0,5	D+S-0.5WY	D	1
D+0.5S-WY	WINDY-	-1	D+WY	WINDY+	1
D+0.5S-WY	DEAD	1	D+WY	D	1
D+S	SNOW	1	D-WY	WINDY-	-1
D+S	D	1	D-WY	D	1

3.6. LUTENEGGER (2016) DENEYLERİNİN SAP2000'DE MODELLENMESİ

Güneş paneli sisteminin plakalı analizi yapılmadan evvel Lutenegeer (2016), tarafından düz ve plakalı çelik borular üzerinde gerçekleştirilen saha deneyleri SAP2000'de modellenmiştir. Amaç düz kazıklar için deney sonuçlarını karşılayan zemin parametrelerine erişerek, plakalı kazıkları SAP2000'de modelleyebilmektir.

Çalışmanın bu aşamasında Lutenegeer (2012, 2016)'e ait plakalı kazıklar üzerinde yapılan çekme deneyleri incelenmiş ve çapı 4,5 inç olan boru şaftlar kullanıldığı görülmüştür; fakat söz konusu çalışmalarda çeliğin malzeme özelliği ile ilgili bilgi verilmemiştir. Bu nedenle helisel ve plakalı kazıkların tasarımıyla ilgili şartnameler incelenmiş ve bu tip kazık sistemlerinde şaft malzemesi olarak genellikle ASTM500 grade B çeliği kullanıldığı görülmüştür (Ramjack, 2015). Lutenegeer (2016) deneylerinin modellendiği analizler ve güneş paneli sisteminde kullanılan boruların Elastisite Modülü 199948 MPa olarak belirlenmiştir. Profillere ait geometrik özellikler Tablo 3.7'deki gibidir.

Tablo 3.7: Çelik boru geometrik özellikleri.

Şaft çapı, (D)	114,30 mm
Boru et kalınlığı (t)	6,02 mm
Şaft atalet momenti (I)	27400000 mm ⁴

3.6.1. Sistem Modeli

Lutenegeer (2016) güneş paneli sistemlerinde sıklıkla kullanılan plakalı ankrajların çekme yükleri altındaki davranışını gözlemlemek için bir grup saha deneyi yapmıştır. Ankraj malzemesi, ankraj geometrisi ve gömme derinliği değişen on ayrı kazık için çekme deneyi uygulamıştır. Bu çalışmada kazık çapı 114,3 mm (4,5 inç) olan iki ayrı boru tipi kazık üzerinde uygulanmış çekme deneyleri modellenmiştir. Gömme derinliği yaklaşık olarak 2,4 m (8 ft)'dir. Kazıklardan biri 1,2 m'de (4 ft) çapı 305 mm olan (12 inç) dairesel plaka içermektedir. Kazıklar sırasıyla aşağıda verilen çekme yüklerine maruz bırakılmışlardır.

Tablo 3.8: Lutenegeer (2016) çekme yükleri.

Yük (kN)	0	18	20	22	24	26	29	31	33	35	40	44	48	53	57	62	66
----------	---	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----

Bölüm 2.9'da bahsedildiği üzere plakalı kazıklarda plaka geometrisinin çekme dayanıma etkisi ise ihmal edilebilmektedir. Bu doğrultuda, Lutenegeer (2016)'in deneylerinde

kullandığı dairesel plakalarla aynı etkili alana sahip bir boyutu 270 mm olan kare plakalar modellenmiştir.

$$A_{plaka} = \frac{\pi(304)^2}{4} = 72583mm^2$$

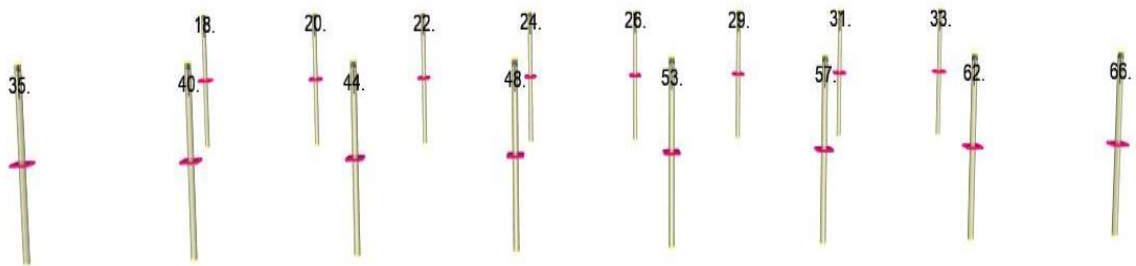
$$B^2 = 72583mm^2$$

$$B = 270mm$$

Bu çalışma kapsamında SAP2000’de modellenmiş plakalı ve plakasız kazıklar aşağıda verilen şekillerdeki gibidir.



Şekil 3.13: Lutenegger (2016) düz kazık deneylerinin SAP2000’de modellenmesi.



Şekil 3.14: Lutenegger (2016) plakalı kazık deneylerinin SAP2000’de modellenmesi.

Plakalı kazıklar önce AutoCAD programında iki boyutlu çizilerek SAP2000 programına entegre edilmiş ve bu programda plaka (*shell*) eleman olarak tanımlanmıştır.

3.6.2. Zemin Özellikleri

Lutenegger (2016)'in çalışmasında zemin özellikleri ile ilgili ayrıntılı bilgi verilmemiştir. Zeminle ilgili belirtilen tek özellik, zeminin katı kil bir yapay dolgu (*surficial layer of stiff clay*) tabakadan meydana geldiğidir. Zeminin birim hacim ağırlığı hakkında da bir bilgi verilmediği için plakalar üzerine etkiyen efektif gerilme hesaplanırken zeminin katı kil olduğu bilinciyle $\gamma=18 \text{ kN/m}^3$ olduğu varsayılmıştır. Bu durumda plakalara etkiyen zemin gerilmesi ortamda yer altı suyu olmadığı kabulüyle aşağıdaki gibi hesaplanmıştır:

$$\sigma = 18 \times 1,2 = 21,6 \text{ kN} / \text{m}^2$$

3.6.3. Yatak Katsayılarının Belirlenmesi

Zemin parametreleri ile ilgili Lutenegger (2016)'da yeterli bilgi olmadığı için yatak katsayıları belirlenirken aşağıda verilen yollar izlenmiştir:

1. Katı kile uygun Elastisite Modülünün belirlenmesi ve sistem modelinin Vesic (1961)'e göre hesaplanan yay rijitlikleri ile analiz edilmesi,
2. Katı kile uygun yatak katsayısının belirlenmesi ve sistem modelinin bu yaylarla temsil edilerek analiz edilmesi.

Hesaplanan sürtünme yayları 30 cm'lik aralıklarla tanımlanan düğüm noktalarına atanmıştır. Kazıklara sadece çekme yükü etkidiği için kazık tabanına yay atanmamıştır. Plakalar da benzer şekilde çekmeye çalıştığı için yay atanmamış sadece üzerine gelen zemin gerilmesi tanımlanmıştır.

3.6.3.1. Vesic (1961)'e Göre Yay Modülünün Belirlenmesi

Bu aşamada öncelikle ilgili literatür incelenerek ve katı killerin elastisite modülü değerinin çok geniş bir aralıkta değiştiği görülmüştür. Örneğin USACE (1990)'ye göre katı killerin elastisite modülü 50-100 MPa arasında değişmektedir. Söz konusu deneylerin 2,4 m derinlikte bir dolgu tabakasında gerçekleştiği göz önüne alınarak bu aralığın minimum değerlerinin altından başlamak üzere 20 MPa, 30 MPa, 40MPa ve 50 MPa için Vesic (1961)'in yöntemine göre yatak modülü değerleri göz önüne alınarak sürtünme yayları tanımlanmıştır. Sürtünme yayları hesaplanırken kazığın iç çeperinde meydana gelecek sürtünme de hesaplanmıştır. Buna göre yatak modülü ve yay rijitlikleri aşağıdaki gibidir:

Tablo 3.9: Yatak modülü ve yay rijitliği (Vesic, 1961).

E_s (Mpa)	k_s (kN/m ³)	K_f (kN/mm)
20	67567.49	14153,07
30	104834.28	21959,18
40	143170.52	29989,31
50	182322.16	38190,24

3.6.3.2. Katı Kile Uygun Yatak Katsayısı Değerinin Belirlenerek Sistem Modeline Uygulanması

Çalışmanın bu aşamasında da ilgili literatür araştırılmış 2. Bölüm Tablo 2.7’de sunulan, Das (1990) tarafından deneysel veri olmaması durumunda killi zeminler için drenajsız kayma gerilmesine (S_u) bağlı olarak kullanabilecek yatak katsayısı değerleri kullanılmıştır. Lutenegeer (2016)’in çalışmasında çekme yüklerinin yapıldığı yapay bir katı kil dolgusudur. Tablo 2.7’de katı killer için yatak katsayısı 25000-50000 kN/m³ olarak verilmiştir. Bir önceki bölümde olduğu gibi söz konusu deneylerin 2,4 m derinlikte gerçekleştiği göz önüne alınarak bu aralığın minimum değerlerinin altından başlamak üzere 20000 kN/m³, 25000 kN/m³, 30000 kN/m³, 35000 kN/m³ ve 40000 kN/m³ yatak modülü değerleri alınarak analizler gerçekleştirilmiştir. Bu durumda hesaplanan sürtünme yaylarının rijitlikleri Tablo 3.11’deki gibidir. Bu rijitlik değerleri hesaplanırken kazığın iç kısmında meydana gelen sürtünme davranışı da göz önüne alınmıştır.

Tablo 3.10: Yatak modülü ve yay rijitliği (Das, 1990).

k_s (kN/m ³)	K_f (kN/m)
25000	485,33
30000	582,40
35000	679,46
40000	776,53

4. BULGULAR

Bu çalışmada bir güneş paneli sistemi iki farklı temel türü kullanarak modellenmiştir:

- C profil düz kazık,
- C profil plakalı kazık.

Bölüm 3.3’de verilen yükleme koşulları altında, güneş paneli sistemi SAP2000 programında analiz edilmiş ve elde edilen deplasman değerleri Çıkılı, (2017) tarafından gerçekleştirilmiş referans analizlerle kıyaslanmıştır. Ayrıca güneş paneli sistemleri sürekli rüzgâr yükleri altında çekme yüklerine maruz kaldığı için plakalı kazıkların bu yükler altındaki davranışını gözlemlemek amacıyla Lutenegeer (2016) tarafından gerçekleştirilen saha deneyleri incelenmiştir. Bu doğrultuda, Vesic (1961)’e göre uygun yatak katsayıları hesaplanarak Lutenegeer (2016)’in saha deneylerinde çekme yüklerine maruz kalan bir grup plakalı ve düz boru kazık SAP2000’de modellenerek çekme yükleri altında plakalı kazıkların bir yapısal analiz programında davranışı incelenmiştir.

4.1. GÜNEŞ PANELİ SİSTEMİNDE C PROFİL DÜZ KAZIKLA YAPILAN ANALİZLER

Sayhan Mühendislik tarafından hazırlanan statik hesap raporunda verilen kazık tipi esas alınarak güneş paneli sistemi SAP2000’de modellenmiştir.

4.1.1. Sadece Uç Direncinin Tanımlandığı Analizler

Çalışmanın bu aşamasında zemin Elastisite Modülünün sırasıyla 20 MPa ve 40 MPa olduğu ve Poisson oranının $\nu_s = 0,3$ olduğu kabul edilerek düşey ve yatay yatak katsayıları Vesic (1961)’e göre hesaplanmıştır. Elastisite Modülünün 20 MPa olduğu kabulüyle yapılan hesaplarda düşey yatak modülü (k'_s) 98978 kN/m³, yatay yatak modülü ise (k'_h) 197957 kN/m³ olarak bulunmuştur.

Zeminin elastisite modülünün 40 MPa olduğu durumda ise değerler yaklaşık olarak iki kat artmış ve düşey yatak modülü (k'_s) 209728 kN/m³ olurken, yatay yatak modülü (k'_h) 419457 kN/m³ olarak hesaplanmıştır. Bowles (1996) tarafından çeşitli zemin türleri için verilen yatak

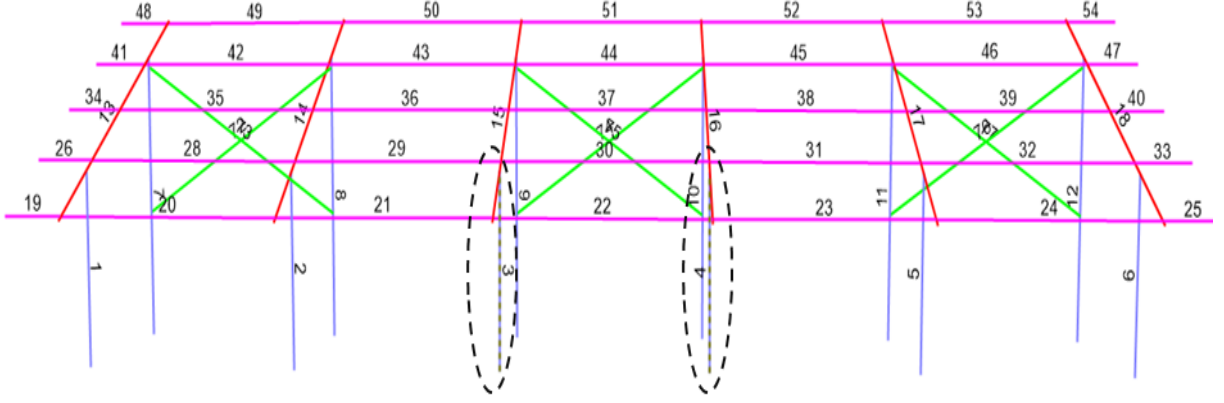
katsayısı değerleri sıkı kumlar için 64000-128000 kN/m³ aralığında, killi zeminler için de kilin drenajsız kayma mukavemetine bağlı olarak 12000 kN/m³ ile 48000 kN/m³ arasında değişmektedir. Dolayısıyla gömme derinliği 1,2 m olan bu kazık sistemi için Vesic (1961)'e göre hesaplanan yatak katsayısı değerleri çok büyüktür.

Sistemde yatay yaylar yanal kuvvetlere karşı çalışmak üzere modelde kazık elemanlarda 20 cm de bir oluşturulan düğüm noktalarına x ve y doğrultularında atanmıştır. Çelik kazıkların x eksenindeki boyutu 60 mm y eksenindeki boyutu ise 100 mm'dir. Bu yüzden kazığın x ve y boyutu için ayrı ayrı yatay yay rijitlikleri hesaplanmıştır. Sadece tabandaki düğüm noktasında basınç gerilmeleri altında meydana gelecek düşey doğrultulu yer değiştirmeyi gözlemlemek için z doğrultusunda bir adet yay modellenmiştir. Bu noktadaki yayın rijitliği çelik profilin taban alanına göre 96,06 kN/m olarak hesaplanmıştır. Her bir kazıkta en üstteki yayın kotu 0,9 m'dir. Böylelikle zemin yüzeyinin 30 cm altına kadar kazık-zemin arasında bir etkileşim gerçekleşmediği varsayılmıştır.

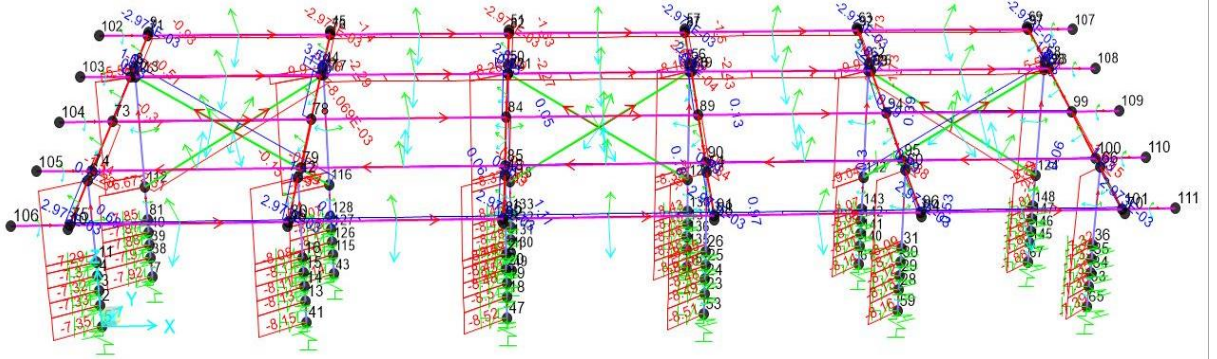
4.1.1.1. C Profil Kazıkta Meydana Gelen Deplasmanların Çıkılı (2017)'nin Analiz Sonuçlarıyla Kıyaslanması

Çalışmanın bu aşamasında, sadece Elastisite Modülü (E_s) ve Poisson oranı (ν_s) kullanarak Vesic (1961)'e göre düşey ve yatayda hesaplanmış yatak katsayıları ile yapılan analizlerde elde edilen deplasman değerleri Çıkılı (2017) tarafından aynı yük kombinasyonlar altında ve aynı parametrelere sahip zeminler için FLAC3D ile yapılan analizlerle kıyaslanmıştır. Çıkılı (2017) söz konusu analizleri içsel sürtünme açısı $\phi = 30^\circ$ olan zemin için kazık ve zemin ara yüzünde meydana gelen sürtünmeyi göz önüne alarak yaparken, çalışmanın bu aşamasında zemin kazık arasında meydana gelen çevre sürtünmesi tanımlanmamıştır.

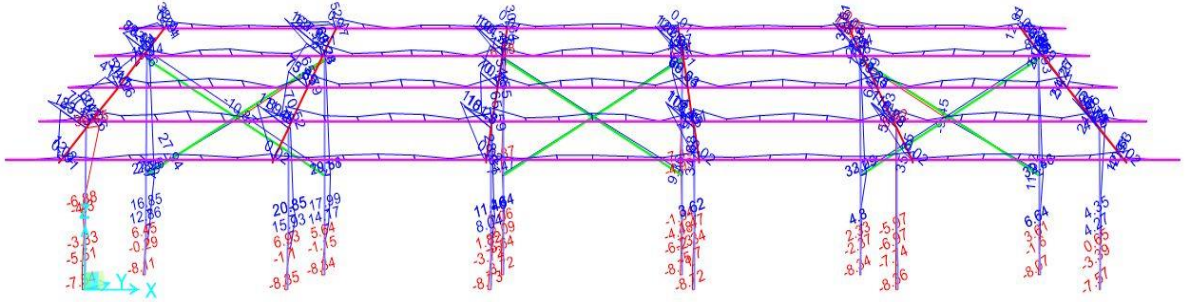
Çıkılı (2017), analizlerinde sistemin iki kazık elemandan oluşan tek bir modülünde meydana gelen gerilme ve deformasyonları incelemiştir. Kıyaslama yapabilmek için söz konusu yükleme koşulları altında maksimum eksenel gerilmelerin kaydedildiği kazık eleman seçilmiştir. Bunun için Şekil 4.1'de görseli verilen çelik konstrüksiyonda 4 numaralı kazık eleman seçilmiştir. Çünkü SAP2000'de yapılan analizlerde maksimum eksenel gerilmelerin 3 ve 4 numaralı kazıklarda meydana geldiği görülmüştür. Şekil 4.2'de en yüksek basınç gerilmelerinin olduğu D+S+0.5W_y yüklemesi altında tüm kazıklarda meydana gelen gerilmeler verilmiştir.



Şekil 4.1: Maksimum gerilmelerin meydana geldiği kazıklar.

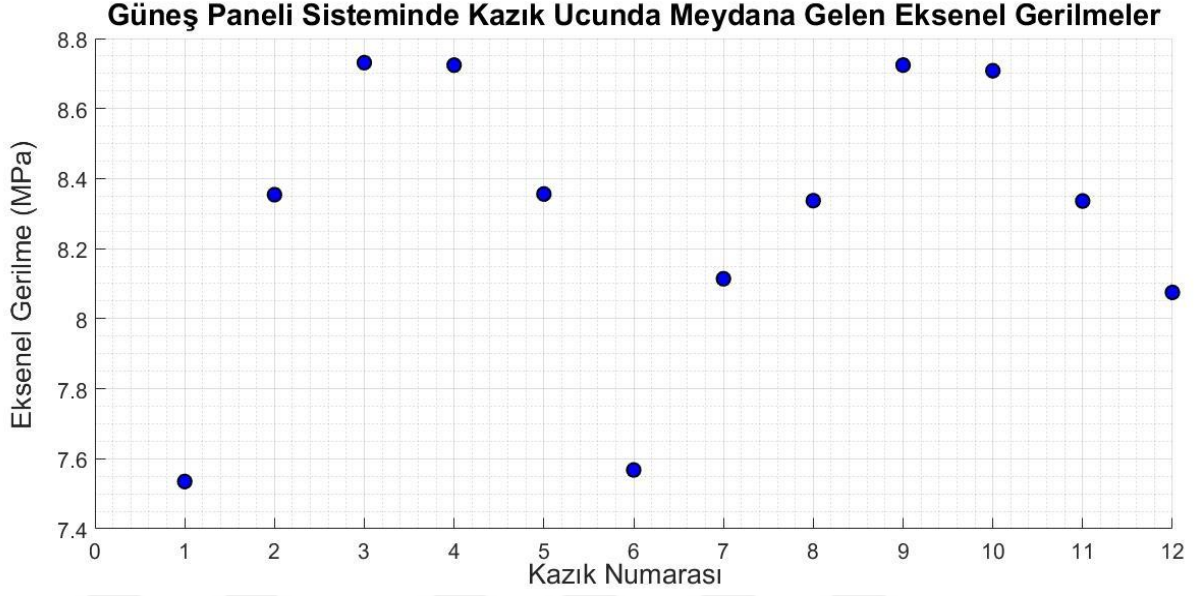


Şekil 4.2: D+S+0.5Wy yüklemesi altında kazıklarda meydana gelen eksenel kuvvetler (kN).



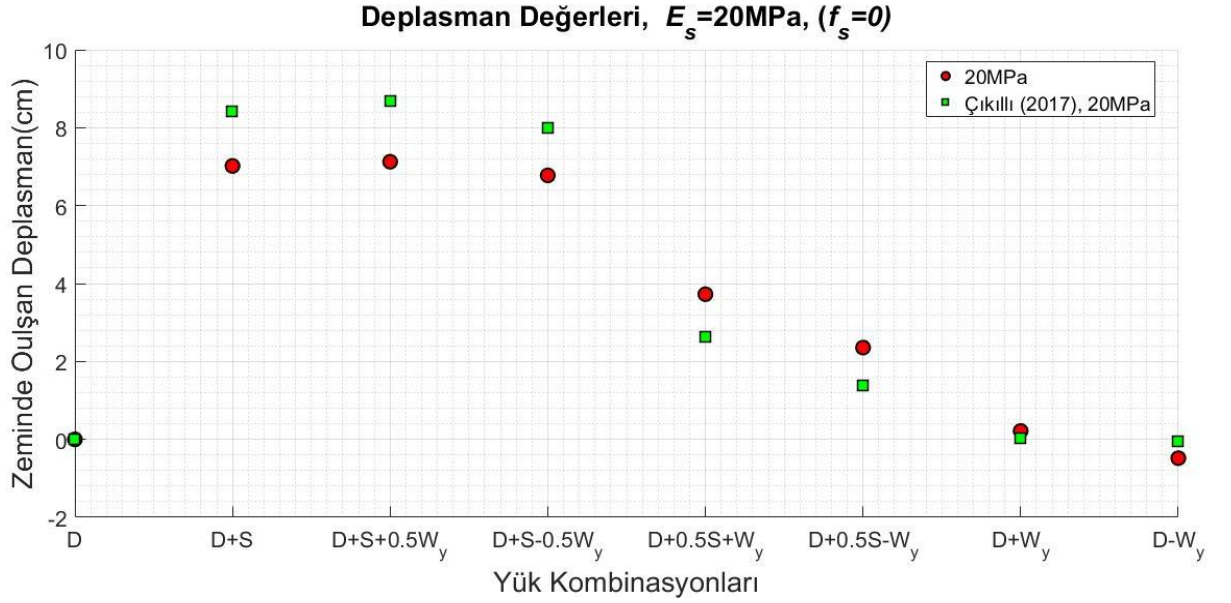
Şekil 4.3: D+S+0.5Wy yüklemesi altında kazıklarda meydana gelen gerilmeler (MPa).

Şekil 4.3'te ise sistemdeki tüm kazıkların uç noktalarında oluşan gerilme değerleri verilmiştir. Şekil 4.4'de kazık tabanında bulunan düğüm noktalarında meydana gelen eksenel gerilmeler sunulmuştur. Şekle göre sistemi oluşturan tüm kazıkların tabanında meydana gelen eksenel gerilme değerleri birbirine çok yakın olsa da maksimum gerilme 4 numaralı kazıkta gerçekleştiği için çalışmanın bu aşamasında bu kazık incelenmiştir.



Şekil 4.4: Panel sisteminde kazık ucunda oluşan maksimum gerilmeler.

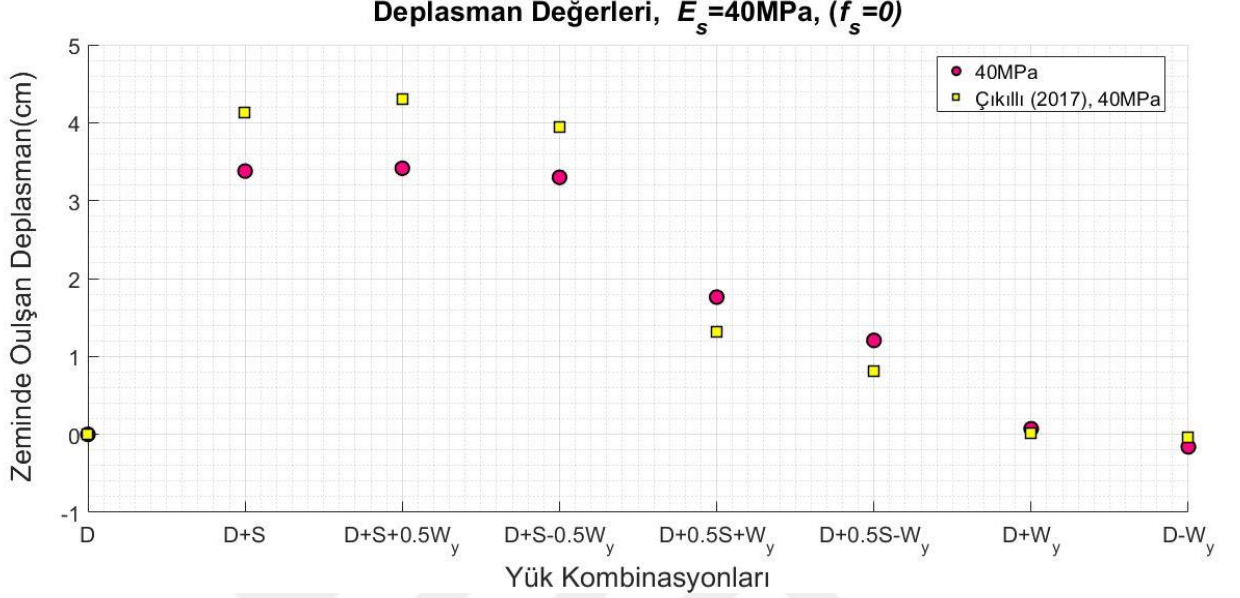
Aşağıda verilen dağılım grafiklerinde sürtünme davranışını tanımlanmadığı güneş paneli sisteminde elastisite modülü 20 MPa ve 40 MPa olan zeminler için 4 numaralı kazık altında meydana gelen deplasman değerleri Çıkılı (2017) tarafından elde edilen değerler ile karşılaştırılmıştır. Şekil 4.5'te $E_s=20$ MPa için yapılan analiz sonuçları verilmiştir.



Şekil 4.5: Güneş paneli sisteminde $E_s=20$ MPa için yapılan analizler.

Elastisite Modülünün 40 MPa kabul edildiği zeminler için yapılan analizlerden elde edilen deplasman değerleri ise Şekil 4.6'da verilmiştir. Şekillerde görüldüğü gibi sürtünme etkisinin

temsil edilmediği modellerden elde edilen deplasman değerleri zemin özelliklerinin daha ayrıntılı tanımladığı diğer çalışmayla oldukça yakındır.



Şekil 4.6: Güneş paneli sisteminde $E_s=40\text{ MPa}$ için yapılan analizler.

Şekillerde verilen değerlerde sistemin zati yükü ve panel yükleri alınmamıştır. Bu çalışma kapsamında ölü yükler altında meydana gelen deplasman değerleri EK 6'da detaylı olarak verilmiştir.

Şekil 4.5 ve 4.6'da verilen yükleme koşullarında pozitif deplasman değerleri basınç gerilmeleri altında oluşan oturmaya, negatif işaretli deplasman değerleri ise çekme gerilmeleri altında meydana gelen +z yönlü yer değiştirmeleri ifade etmektedir. Güneş paneli sistemlerinde bu iki durum altında meydana gelen deplasman mertebesinin doğru tayini hem farklı oturmaları önlemek hem de sürekli çekme yükleri altında kazıklar etrafında meydana gelmesi muhtemel aşınma ve sıyrılmaların önüne geçmek açısından gereklidir.

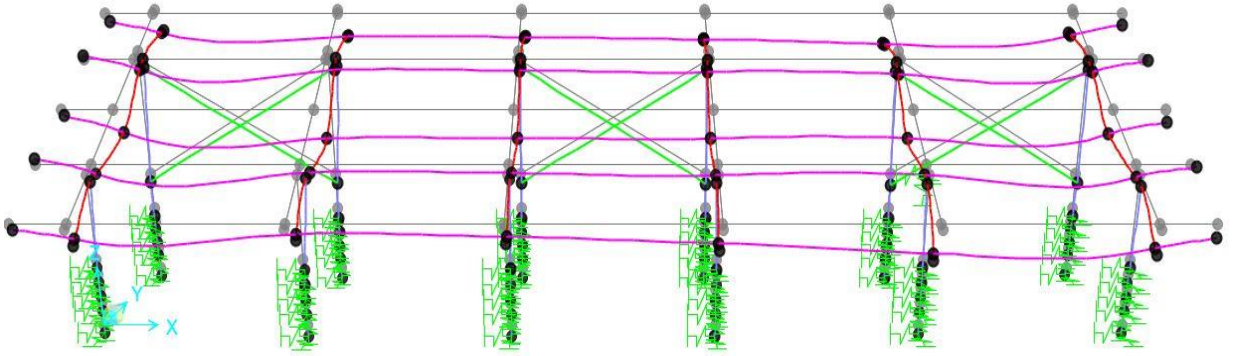
Her iki Elastisite Modülüyle yapılmış analizlerden de anlaşıldığı üzere zeminde meydana gelen maksimum deplasmanlar sırasıyla D+S+0.5W, D+S ve D+S-0.5W yük birleşimleri altında gerçekleşmiştir ve her biri kazık tabanında oturmaya neden olmuştur. Elastisite Modülünün 20 MPa olduğu kabul edilen zeminde D+S+0.5W yükleme durumunda 4 numaralı kazık altında yaklaşık olarak 7,1 cm oturma meydana gelmiştir. Bu değer başka hiçbir parametrede değişiklik yapılmadan sadece Elastisite Modülünün iki katına çıkarılmasıyla yaklaşık olarak aynı oranla azalmış ve 3,41 cm olarak kaydedilmiştir.

Dolayısıyla zeminin elastik modülündeki doğrusal artış, deplasmanlarda aynı oranda azalmayı sağlamıştır.

4.1.2. Sürtünme Yayları ile Yapılan Analizler

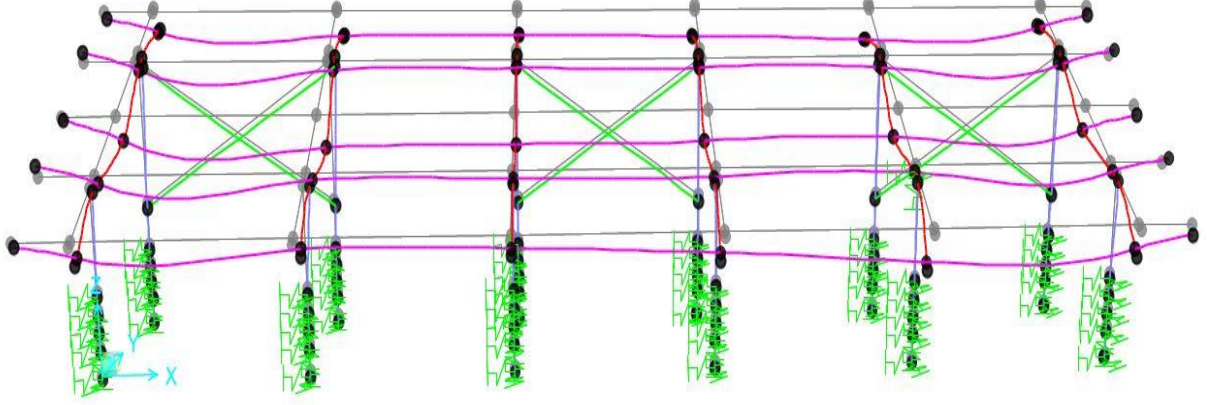
SAP2000 ile yapılan analizlerde sürtünme etkisini yaylarla temsil ederken, Vesic (1961)'e göre hesaplanan düşey yatak modülü değerleri kazığın yüzey alanıyla çarpılmış, sürtünme davranışını temsil edecek düşey yay rijitlikleri hesaplanmıştır. Yaylar kazık boyunca 20 cm aralıklı düğüm noktalarına z ekseninde atanmıştır. Kazık tabanına, yüzeyde sürtünmeyi temsil eden yay rijitlikleri çok büyük olduğu için yay ataması yapılmamıştır.

Elastisite Modülünün 20 MPa olduğu kabulüyle yapılan analizlerde sürtünme yay rijitlikleri 4355 kN/m, 40 MPa olarak kabul edilen yaylarla yapılan rijitlikler ise 8710 kN/m olarak hesaplanmıştır. Şekil 4.7 ve Şekil 4.8'de sistem modelinde bu koşullar altında meydana gelen deplasmanlar verilmiştir. Şekillerden kazık dibinde meydana gelen deplasman mertebesinin çok küçük olduğu gözlemlenebilmektedir.

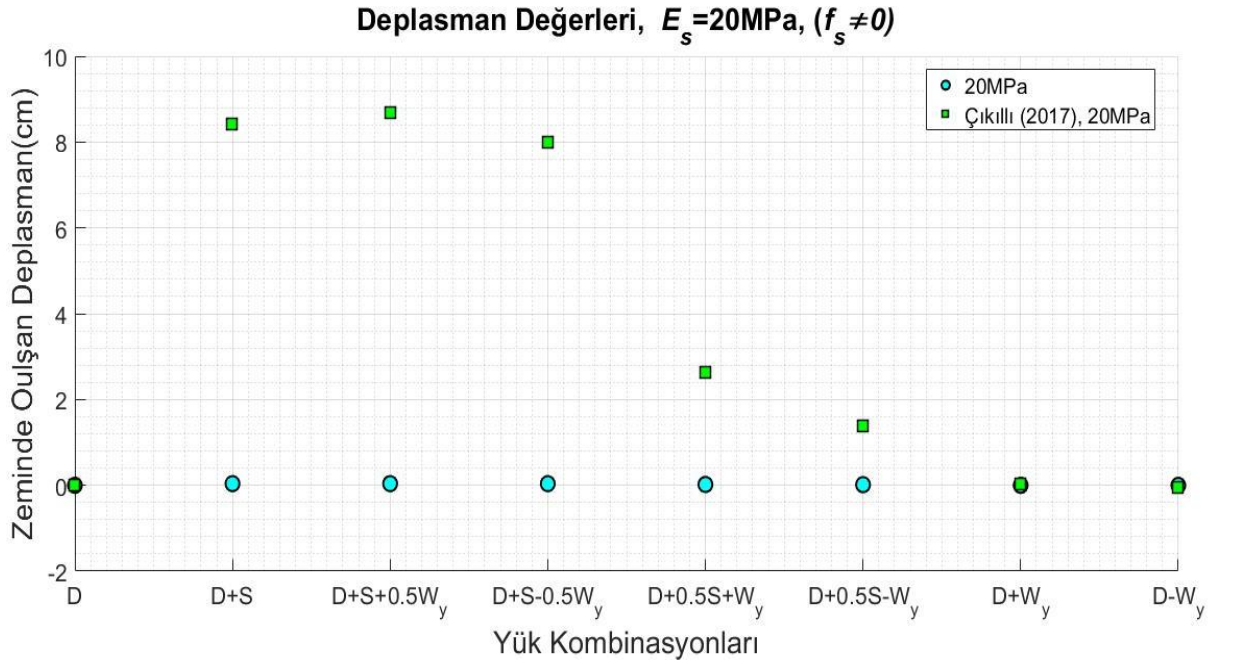


Şekil 4.7: Sürtünme yayları tanımlanan sistemde meydana gelen deplasmanlar ($E_s=20\text{MPa}$).

Bu yöntemle bulunan deplasmanlar ve Çıkkılı (1990)'ın içsel sürtünme açısı $\phi = 30^\circ$ için elde ettiği deplasman değerleri Şekil 4.9'da verilmiştir. Analizlerde panel yükü ve sistemin zati yükü de göz önüne alınmamıştır.

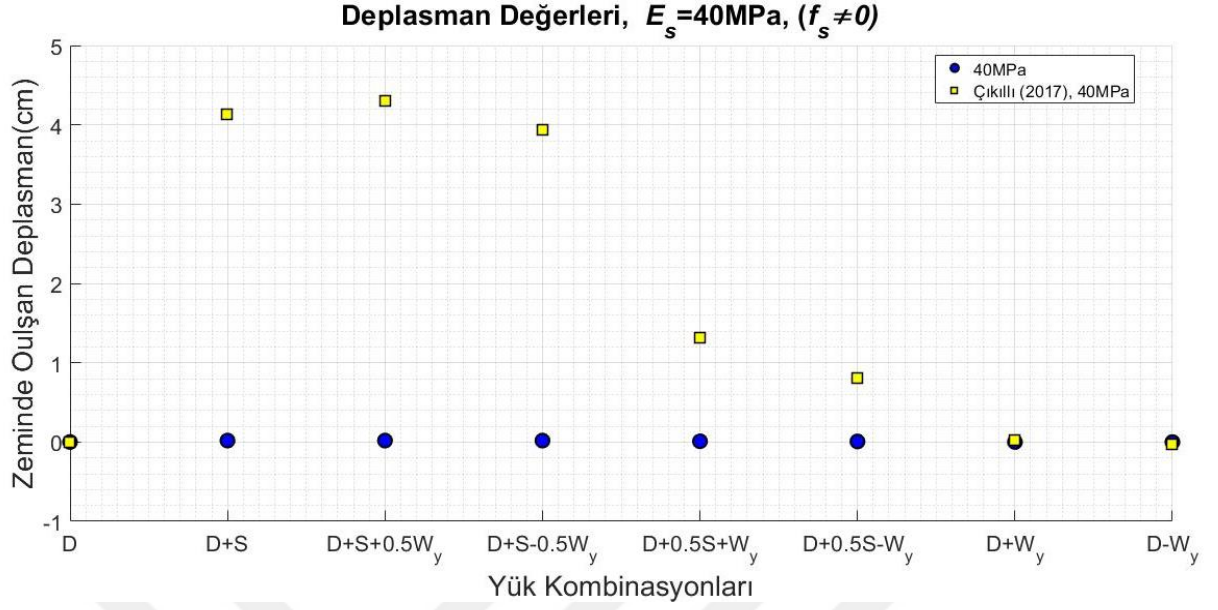


Şekil 4.8: Sürtünme yayları tanımlanan sistemde meydana gelen deplasmanlar ($E_s=20\text{MPa}$).



Şekil 4.9: Sürtünme davranışının yaylarla modellendiği analizlerden kaydedilen deplasmanlar.

Şekil 4.9 ve Şekil 4.10'dan görüldüğü üzere Vesic (1961)' e göre hesaplanmış yatak modülü değerinin kazık yüzey alanı ile çarpılarak elde edilen yatak rijitlikleri ile panel sistemi SAP2000'de modellendiğinde elde edilen deplasman değerleri sürtünmesiz analizlerle ve Çıkıllı (2017) analizleriyle kıyaslandığında %90 mertebesinde küçük çıkmıştır.



Şekil 4.10: Sürtünme davranışının yaylarla modellendiği analizlerden kaydedilen deplasmanlar.

4.2. PLAKALI ANKRAJLARIN SAP2000 İLE MODELLENMESİ

Güneş panellerinin temel sistemlerinin plakalı analizlerin öncesinde, plakalı kazıkların davranışını gözlemleyebilmek için Lutenegeger (2016) tarafından düz ve plakalı kazıklarda gerçekleştirilen çekme deneyleri SAP2000’de modellenmiştir. Bu amaçla öncelikle düz kazıklar için Lutenegeger (2016) deneylerini sağlayacak uygun yatak katsayısı değerleri araştırılmış ardından plakalı kazıklar modellenmiştir.

4.2.1. Lutenegeger (2016), Düz Kazıklarda Gerçekleştirilen Çekme Deneylerinin SAP2000’de Modellenmesi

Lutenegeger (2016), çalışmasında zemin özellikleri ile ilgili detaylı bilgi vermemekle beraber sadece zeminin katı kil olduğundan bahsetmiştir. Bu aşamada öncelikle Vesic (1961)’e göre yatak katsayısı hesabında zeminin Elatisite Modülünün bilinmesi gerektiği için çekme deneylerinin yapıldığı zeminin katı kil olduğu bilinciyle 20 MPa, 30 MPa, 40 MPa ve 50 MPa olan zeminler için yatak katsayıları hesaplanmış ve analizler yapılmıştır. Ayrıca katı killer için yatak modülü, Das (1990)’a göre 20000 kN/m³, 25000 kN/m³, 30000 kN/m³, 35000 kN/m³ ve 40000 kN/m³ olarak seçildi ve analizler bu değerler için tekrarlanmıştır.

Düz kazıkların sürtünme rijitlikleri, yay modüllerinin kazığın iç ve dış yüzey alanıyla çarpılmasıyla bulunmuştur. Analizlerde yatay yaylar olmadığı takdirde çekme yükleri altında

sistemin hata vererek çözülemediği görülmüş ve 30 cm'lik düğüm noktalarına yatay yaylar da atanmıştır. Yapılan analizler sonucunda Vesic (1961)'e göre hesaplanan yatak modülünden elde edilen deplasman değerleri Şekil 4.11'de verilmiştir.



Şekil 4.11: SAP2000'de düz kazıkta meydana gelen deplasmanlar (Vesic 1961).

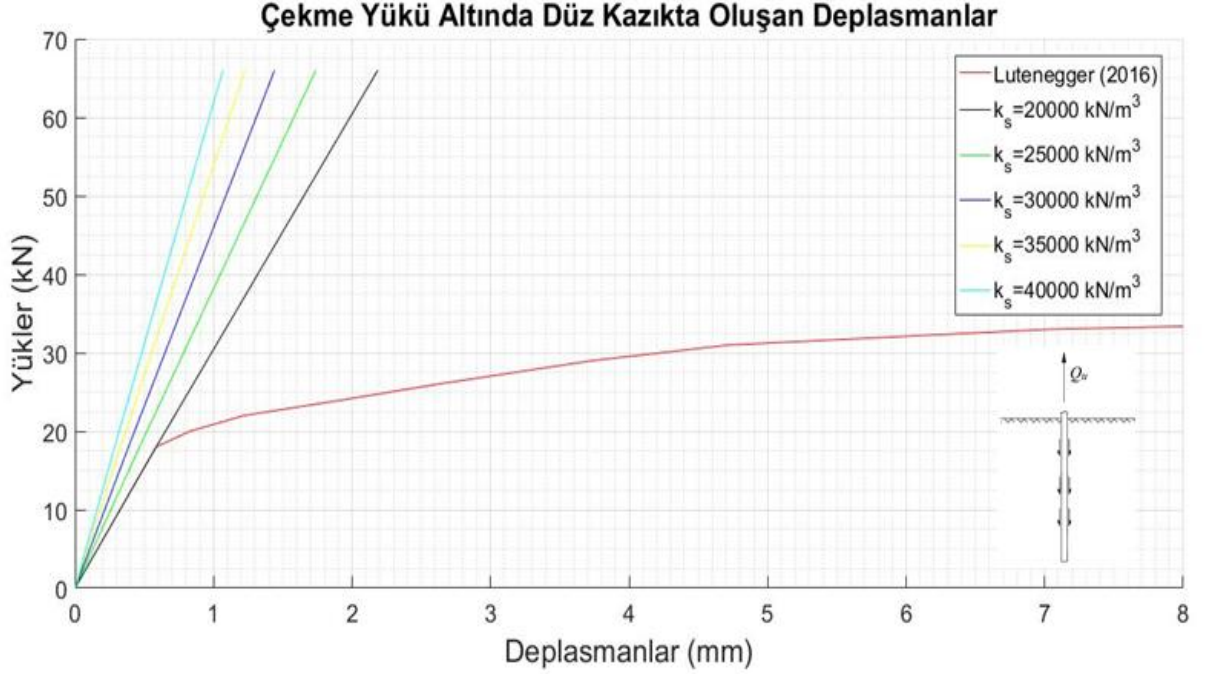
Şekil 4.11'den de görüldüğü üzere Bölüm 4.1.2'de güneş paneli sisteminde olduğu gibi Vesic (1961)'e göre hesaplanan yay modülü ile sürtünme yayları modellendiğinde deplasmanlar çok küçük çıkmaktadır.

Yatak modülünün Das (1990)'a göre katı killer için belirlendiği analizlerden elde edilen deplasman değerleri ise Şekil 4.12'de verilmiştir.

Şekil 4.12'de verilen eğrilerden görüldüğü üzere yatak katsayısının 20000 kN/m^3 seçilerek sürtünme yaylarının tanımlandığı analizler Lutenegger (2016)'nın deplasman-yük eğrisine yakınlık göstermiştir. Yaklaşık olarak 18 kN altına kadar meydana gelen deplasman değerlerinin birbirine oldukça yakın olduğu gözlemlenmiştir.

Bu çalışmada yükleme-şekil değiştirme davranışı doğrusal kabul edilip, kazığın yük altında şekil değiştirmediği varsayılmıştır. Ayrıca söz konusu kazık sisteminin soket boyu çok derin olmadığı için kazık gömme derinliği boyunca zeminin Elastisite Modülü değerinin değişmediği varsayılmıştır. Dolayısıyla yay rijitlikleri gömme derinliği boyunca sabit tanımlanmış artan yükleme koşullarında meydana gelen deplasmanların doğrusal olarak arttığı

kabul edilmiştir. Bu nedenle Şekil 4.11 ve Şekil 4.12’de verilen yükleme şekil değiştirme eğrileri doğrusaldır.



Şekil 4.12: SAP2000’de düz kazıkta meydana gelen deplasmanlar (Das 1990).

4.2.2. Lutenegeer (2016), Düz Kazıklarında Çekme Altında Taşıma Gücü Tahkiki

Bir kazığın çekmeye karşı toplam taşıma gücü (Q_{up}), net çekme taşıma gücü ile kazık ağırlığının toplamıdır. Zeminin drenajsız kayma gerilmesi katı killer için 200 kPa olduğu kabul edilirse boru tipi kazıklar için kazık çevresinde çekme altında oluşan adhezyon faktörü $\alpha' = 0,2$ seçilir (Das ve Seeley, 1982).

Buradan tekil kazığın çekmeye karşı net taşıma gücü aşağıdaki gibi hesaplanmıştır.

$$T_{up} = \pi DL\alpha' S_u \quad (\text{Das ve Seeley, 1982}) \quad (4.1)$$

$$T_{up} = \pi \times 0,114 \times 2,4 \times 0,2 \times 200 = 34,38 \text{ kN}$$

Birim hacim ağırlığı $\gamma_p = 76,97 \text{ kN/m}^3$ olan çelik borunun ağırlığı aşağıdaki gibidir.

$$W_f = \pi \frac{(0,114^2 - 0,108^2)}{4} \times 2,4 \times 76,97 = 0,193 \text{ kN}$$

Bu durumda çekme altında düz kazığın toplam çekme taşıma gücü:

$$T_u = 34,38 + 0,193 = 34,57 \text{ kN} \text{ olarak bulunmuştur.}$$

Lutenegger (2016) çalışmasında düz kazıklarda çekme yükü 35 kN olduğunda sistemde sıyrılma meydana geldiğini ve artan yükleme koşulları altında sistemde deplasman gerçekleşmediğini belirtmiştir. Hesaplar $S_u=200\text{kPa}$ için deney sonuçlarıyla örtüşmektedir.

4.2.3. Lutenegger (2016), Plakalı Kazıklarda Gerçekleştirilen Çekme Deneylerinin SAP2000’de Modellenmesi

Lutenegger (2016)’de tanımlanan tek plakalı ankrajlar da SAP2000’de modellenmiştir. Vesic (1961)’e göre hesaplanan yatak modülüne göre bulunan sürtünme yayları ile yapılan analizlerde deplasmanlar çok küçük çıkmıştır. Düz kazıklarda sürtünme yayları, yatak modülü 20000 kN/m^3 olarak kabul edilerek gerçekleştirilen analizler Lutenegger (2016)’in deney sonuçlarıyla yakınlık gösterdiği için plakalı kazıkları modellerken de bu yatak modülü sürtünme yayları tanımlanırken kullanılmıştır.

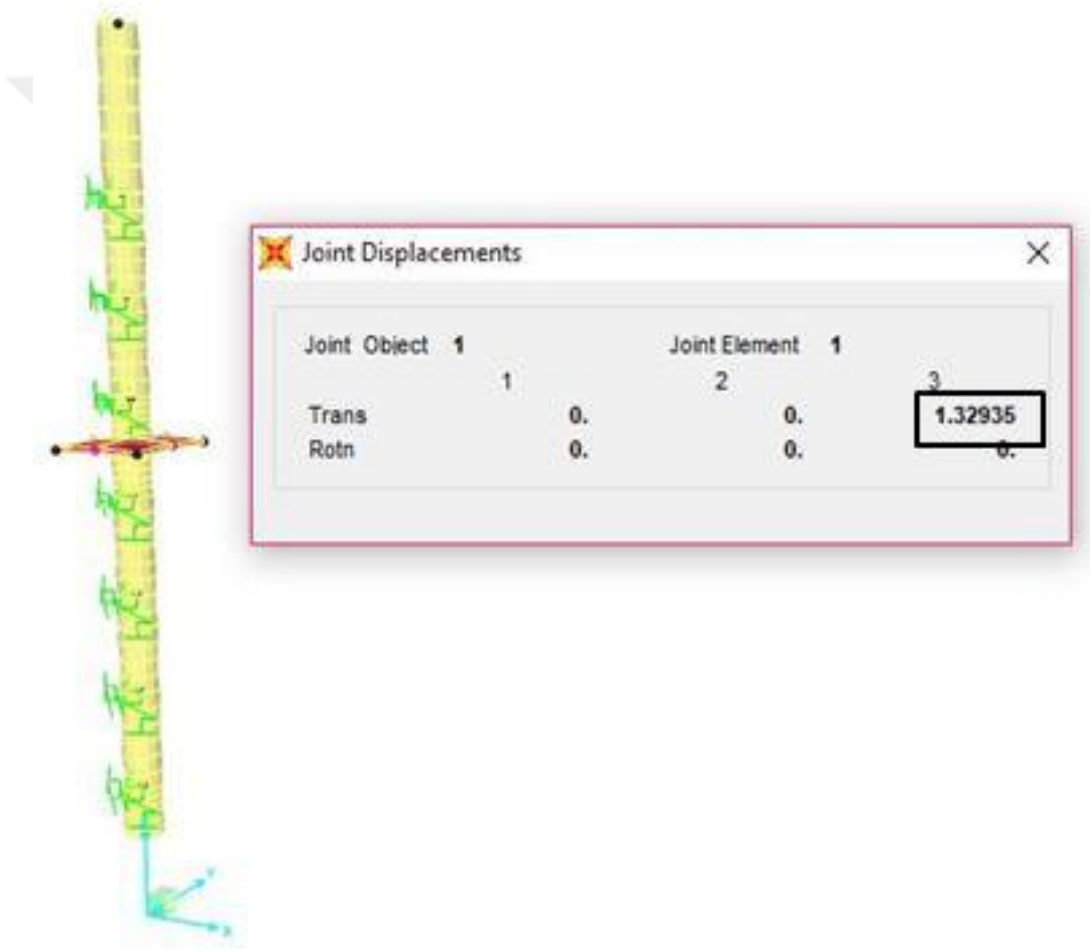


Şekil 4.13: SAP2000’de çekme yükü uygulanmış plakalı kazıkta meydana gelen deplasman.

Kazıklar sadece çekmeye çalıştığı için bir önceki bölümde olduğu gibi kazık tabanına yay ataması yapılmamıştır.

SAP2000’de gerçekleştirilen yüklemelerin sonucunda bulunan deplasmanlar Şekil 4.13’teki gibidir. Yatak modülü 20000kN/m^3 olan zemin için sürtünme davranışı yaylarla tanımlandığı takdirde yaklaşık olarak 24 kN yükleme koşuluna kadar Lutenegeger (2016) deneyleriyle yakın deplasman değerleri elde edildiği görülmüştür.

35 kN çekme yükü uygulanan plakalı kazıkta meydana gelen düşey deplasman Şekil 4.14’ te verilmiştir. Görüldüğü gibi kazık yükleme altında koordinat sisteminin başlangıç noktasından 1,33 mm kadar yukarı yönde hareket etmiştir.



Şekil 4.14: 35 kN çekme yüküne maruz kalan kazıkta düşey yönde meydana gelen deplasman.

4.2.3. Lutenegeger (2016), Plakalı Kazıklarda Çekme Altında Taşıma Gücü Tahkiki

Bölüm 2.9.1’de belirtildiği üzere plakalı kazıkların toplam çekme taşıma gücü düz kazıklar gibi brüt çekme dayanımı ile kazığın toplam ağırlığının toplamıdır.

Killi zeminlerde drenajsız koşullarda plakalı kazıkların brüt çekme dayanımı Bölüm 2.9.1 Denklem 2.3'te verildiği üzere $q_0 = S_u F_c + \gamma H$ bağıntısından hesaplanır. Denklemden yer alan kırılma faktörünün (F_c) tayininde birim hacim ağırlığı sıfıra eşit ve homojen olduğu kabul edilen killi zeminler için Merifield, (2011) tarafından kare plakalı dairesel ankrajlar için verilmiş eğrilerden faydalanıldı (Tablo 2.25). Plaka gömme deriliği ve plaka boyutu oranı $\left(\frac{H}{B}\right) = \frac{1,2}{0,27} = 4,44$ olan plakalı kazık için F_{co} değeri eğriden 8 olarak alındı. Bu durumda drenajsız koşullarda birim hacim ağırlığı sıfıra eşit ve homojen olduğu kabul edilen killi zemine imal edilmiş tek plakalı kazık için F_c değeri Denklem 2.3'ten aşağıdaki gibi hesaplanmıştır.

$$F_c = F_{co} = 8$$

Buradan plakalı kazığın net çekme dayanımı:

$$T_{up} = 200 \times 8 = 1600 \text{ kPa} \text{ olarak bulunur.}$$

Kazığın toplam ağırlığı plaka ağırlığı ile shaft ağırlığının toplamıdır. Birim hacim ağırlığı $\gamma_p = 76.97 \text{ kN/m}^3$ ve boyutları $270 \times 270 \times 9,5$ mm olan plakanın ağırlığı $W_p = 0,05 \text{ kN}$ olarak hesaplanmıştır. Bu durumda toplam plakalı kazık ağırlığı aşağıdaki gibi hesaplanmıştır.

$$W_f = W_p + W_s$$

$$W_f = 0,05 + 0,193 = 0,243 \text{ kN}$$

Bu durumda plakalı kazık toplam çekme yükü:

$$T_u = 1600 \times (0,27 \times 0,27) + 0,243 = 116,88 \text{ kN} \text{ olarak hesaplanır.}$$

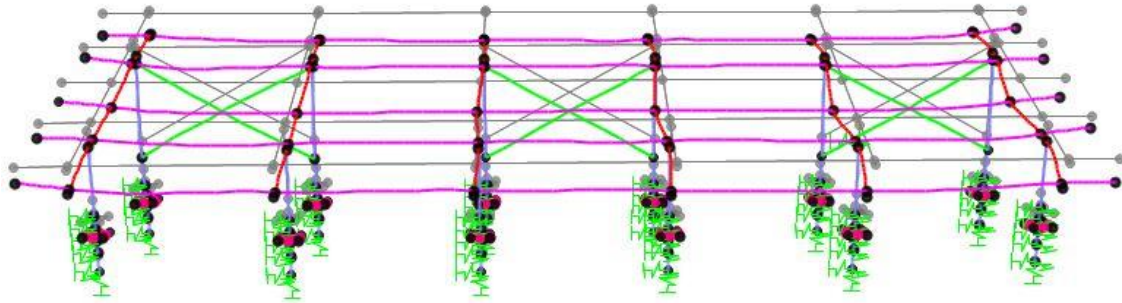
Lutenegger (2016), plakalı ankrajlarda gerçekleştirdiği çekme deneylerini 80kN'da sonlandırmış ve bu yükleme koşulunda yenilmenin gerçekleşmediğini çekme yükü altında sistemin yenilmeden yük almaya devam ettiğini belirtmiştir. Dolayısıyla bulunan toplam çekme taşıma gücü değeri deney sonuçlarını sağladığı söylenebilir.

4.3. GÜNEŞ PANELİ SİSTEMİNİN PLAKALI KAZIKLARLA ANALİZİ

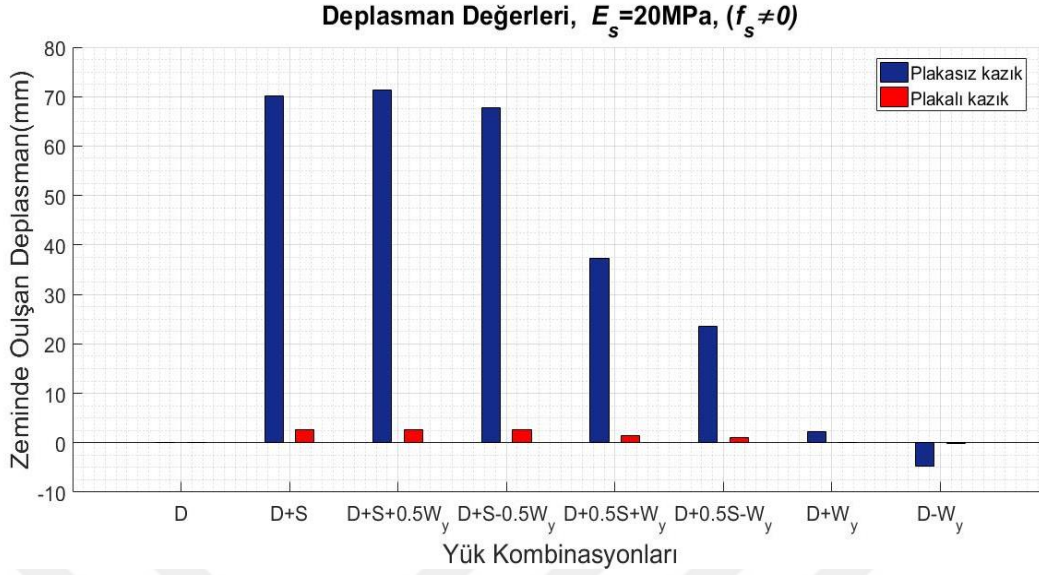
4.3.1. C Tipi Plakalı Kazıklar

Gerçeğe uygun yatak katsayısı seçimiyle modellenen plakalı kazık sistemine çekme yükleri uygulandığında belirli yükleme değerine kadar gerçeğe yakın deplasmanlar elde edildiği Lutenegeer (2016) deneyleri ile yapılan kıyaslamalarda görülmüştür. Bu noktadan sonra daha önceki bölümlerde plakasız olarak SAP2000’de analizi yapılan güneş paneli sistemi kazıklara zemin yüzeyinin 0,6 m altında yerleştirilen kare plakalarla aynı yükler altında analiz edilmiştir.

Plakalı kazıklar modellenirken Elastisite Modülü 20 MPa olan zemin için Vesic (1961)’e göre taban basıncının modellendiği sürtünmesiz analizler Çıkıllı (2017) ile benzer sonuçlar verdiği için kazık ve zemin ara yüzünde meydana gelen sürtünme yayları tanımlanmamıştır. Kazıkların orta noktalarına yerleştirilen plakalara üzerinde bulunan zeminin gerilmesi etkiltilmiş ve plaka tabanındaki düğüm noktalarına Vesic (1961)’e göre plakalar için hesaplanan yay modülü atanmıştır.



Şekil 4.15: Plakalı kazıklarla modellenen güneş paneli sisteminde meydana gelen deformasyon.



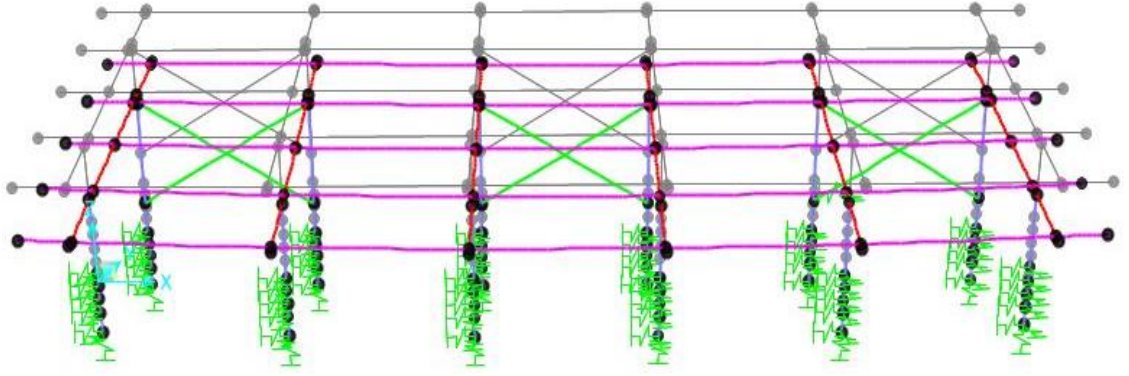
Şekil 4.16: Plakalı/Plakasız kazıklarla modellenen güneş paneli sistemlerinde elde deplasman.

Şekil 4.16’da meydana gelen deplasmanlarda her iki durum için de sistemin zati yükü ve panel ağırlığı ihmal edilmiştir. Güneş panelinde maksimum oturmanın gerçekleştiği $D+S+0.5W_y$ yüklemesi altında plakasız durumdaki deplasman 7,1 cm iken plakalar eklendiği durumda yaklaşık olarak 3 mm deplasman gerçekleştiği gözlemlenmiştir.

4.2. GÜNEŞ PANELİ SİSTEMİNDE YÜKLERİN ETKİSİ

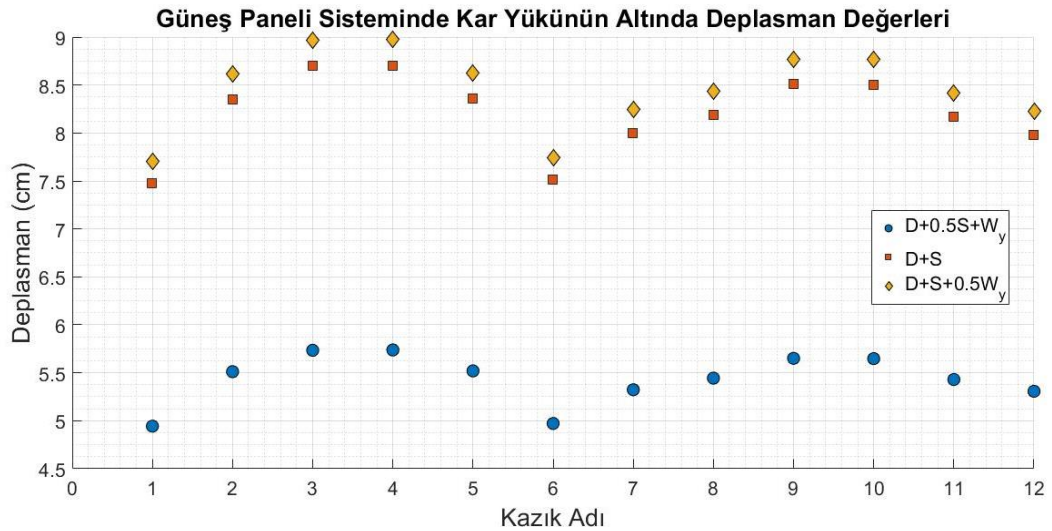
4.2.1. Kar Yüğü

Bölüm 4.1.1’de yapılan analizlerden çıkarılan bir diğer önemli sonuç panel sistemlerin meydana gelen oturmayı belirleyen yüklemenin kar yükü olduğudur. Çünkü sistemde meydana gelen maksimum deplasmanlar kar yükünün etkili olduğu yüklemelerde meydana gelmiştir. Dolayısıyla kar yüküne maruz kalan güneş paneli sisteminde oturmanın doğru tahkiki önemlidir. Kar yüklerine maruz kalan güneş paneli sistemlerinde kazıklarda meydana gelecek farklı oturmalar sistemin servis ömrünü kısaltabilir. Yapılan analizlerde sitem üzerinde kar yükünün etkili olduğu yük birleşimleri $D+S$, $D+S+0.5W_y$ ve $D+0.5S+W_y$ ’dir. En yüksek basınç gerilmeleri $D+S+0.5W_y$ yüklemesi altında meydana geldiği için bu yüklemeye altında sistem modelinde meydana gelen deformasyonlar Şekil 4.5’te verildiği gibidir. Şeklide gri renkle gösterilen sistem modelin deformasyona uğramamış halidir.



Şekil 4.17: D+S+0.5W_y yüklemesi altında panel sisteminde meydana gelen oturma.

Düşey yükler altında kazıklarda meydana gelen oturmalar kazık uç direncine, kazık zemin arasında mobilize olan sürtünmeye, kazık malzemesinde meydana gelen elastik şekil değiştirmeye, kazık altında bulunan zeminde meydana gelen sıkışmaya ya da zeminde meydana gelen konsolidasyona bağlıdır. Kazık tabanında taşınabilecek maksimum yük değerine diğer bir ifadeyle göçmeye yol açacak yüke erişilebilmesi için pratikte kazık çapının ya da boyutunun %10'u kadar kazık tabanında hareket gerçekleşmesi gerekmektedir. Analizlerin bu aşamasında basınç gerilmeleri (D+S+0.5W_y) altında meydana gelen maksimum deplasman zati yükler ihmal edilmediği takdirde 8,6 cm'dir. Bir boyutu 10 cm olan C profilli kazıklar için bu deplasman değeri, sistemde basınç gerilemeleri altında göçmenin gerçekleştiğini göstermektedir.



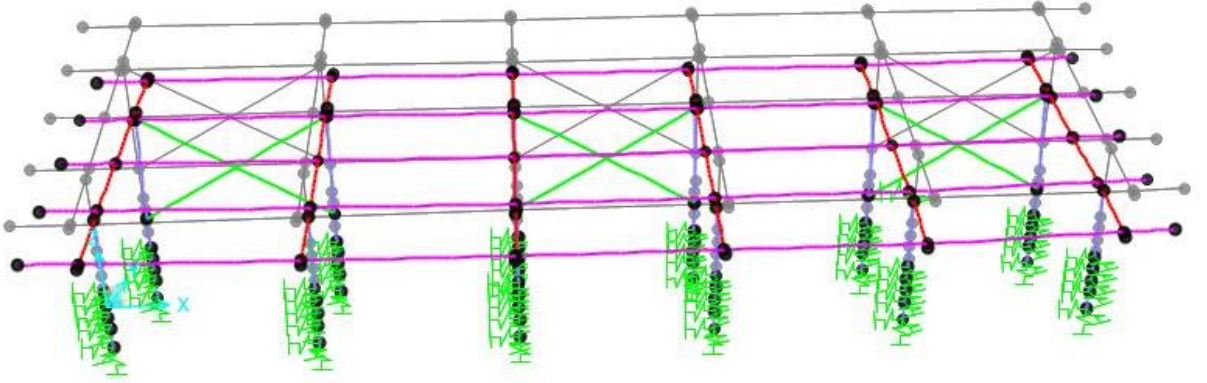
Şekil 4.18: Kar yükü altında kazıklarda meydana gelen deplasmanlar.

4.2.2. Rüzgâr Yüğü

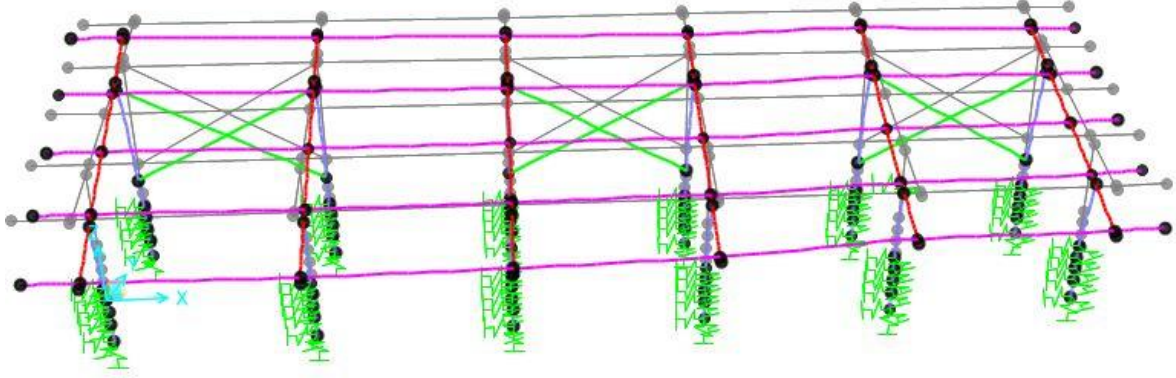
Bu çalışmada incelenen güneş paneli sistemindeki kazıkların boyları 0-8 m arasında olduğu için bölgenin emme yükü $0,5 \text{ kN/m}^2$ olarak belirlenmişti. Ayrıca yapıya etkiyen rüzgâr yüklerinin x eksenı boyunca sönümleneceğı varsayımıyla, yükler sadece y doğrultusunda emme ve basınç olarak hesaplanmıştır. Bu doğrultuda panellere basınç olarak etkiyen rüzgâr yükü ($+W_y$) dış aşıklarda $44,52 \text{ N/m}$, iç aşıklarda ise $89,02 \text{ N/m}$ olarak hesaplanmıştır. Kazıklarda çekme kuvvetleri oluşmasına neden olan rüzgâr yükü ise ($-W_y$) dış aşıklarda $99,05 \text{ N/m}$ ve iç aşıklarda $198,09 \text{ N/m}$ olarak hesaplanmıştır.

Şekil 4.19'da verilen yükleme koşulu altında 4 numaralı kazık altında yaklaşık olarak $1,9 \text{ cm}$ 'lik oturma meydana geldiğı kaydedilmiştir. Bu kazığa komşu 10 numaralı uzun kazıkta meydana gelen oturma ise $2,25 \text{ cm}$ 'dir.

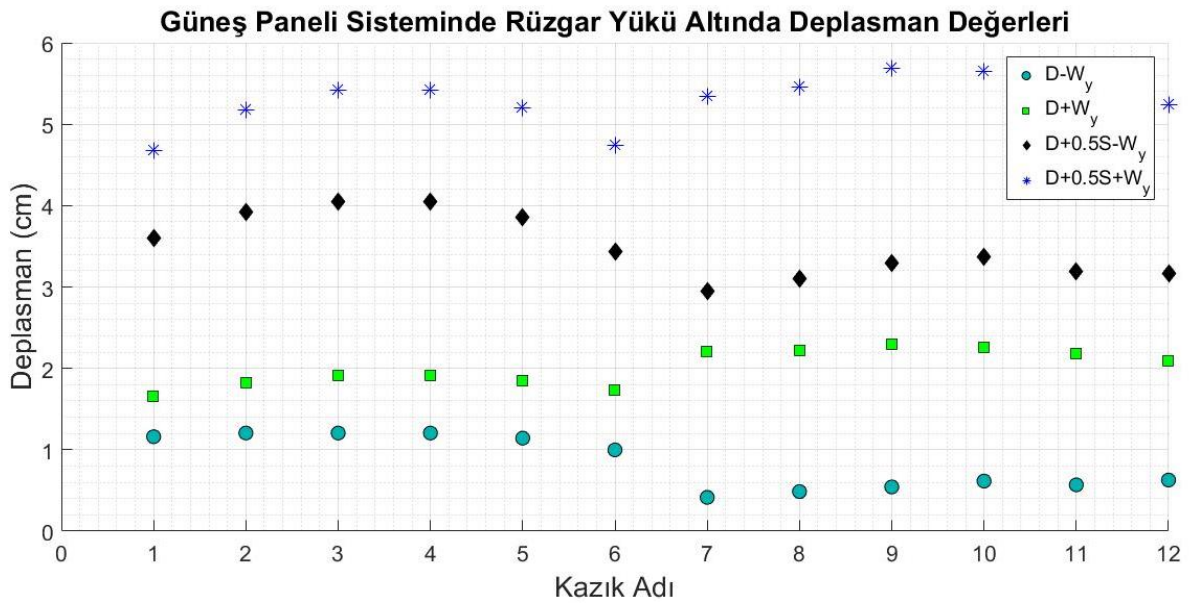
D- W_y yüklemesi altında ise 10 numaralı kısa kazıkta $0,6 \text{ cm}$ 'lik bir deplasman söz konusu iken, bu kazığa komşu olan 4 numaralı kazıkta $1,2 \text{ cm}$ 'lik deplasman meydana gelmiştir (Şekil 4.21).



Şekil 4.19: D+ W_y yüklemesi altında panel sisteminde meydana gelen deformasyonlar.



Şekil 4.20: D-Wy yüklemesi altında panel sisteminde meydana gelen deformasyonlar.



Şekil 4.21: Rüzgâr yükü altında kazıklarda meydana gelen deplasmanlar.

5. TARTIŞMA VE SONUÇ

Güneş'ten enerji üretimi tarihteki kullanılan ilk enerji üretim yöntemidir. Gezegenimizin tek sınırsız enerji kaynağı olan Güneş, bu özelliği sayesinde diğer doğal enerji kaynaklarından bir adım önde yer almaktadır. Bugün birçok ülkede güneşten enerji üretimi hem doğanın korunması hususunda artan toplumsal bilinç hem de güneş enerjisi tesislerinin kurulum ve işletme maliyetlerinin diğer yenilenebilir enerji kaynaklarına kıyasla daha düşük olması sebebiyle her geçen gün önem kazanmaktadır. Ülkemiz, güneş ışınımı ve güneşlenme süreleri bakımından bu enerjinin etkin olarak kullanılabileceği avantajlı bir coğrafyaya sahiptir. Ayrıca gelişen teknoloji ve yenilenebilir enerji ihtiyaçlarına karşı hızla artan talep sayesinde ülkemizde de güneş enerjisi tesislerinin kapasite ve sayısı gün geçtikçe artmaya devam etmektedir.

Bu çalışmada bir güneş enerji üretim santrali projesinde kullanılan paneli ve taşıyıcı sistemine ait tasarım, sonlu elemanlar yöntemine göre hesap yapabilen SAP2000 programında yeniden modellenmiştir. Güneş paneli taşıyıcı sistemi prensip olarak çelik elemanlardan oluşan üstyapı ile bu üst yapıdan aktarılan yükleri zemine soketlenerek aktaran çelik profil ayaklardan oluşmaktadır. Proje detayları önceki bölümlerde detaylı olarak açıklanan güneş panel sistemine etkiyen yükler, panel sisteminin inşa edileceği bölgenin coğrafi ve topografik özelliklerine bağlı olarak (rüzgâr ve kar yükleri) hesaplanmış ve sistemin taşıyıcı elemanlarına etkitilmiştir.

Yapısal analiz programı olan SAP2000'de zemin davranışını tanımlayabilmek için gerekli tek parametre zeminin yatak katsayısıdır. Panel sisteminin inşa edildiği zeminin lineer elastik olduğu kabulüyle hesaplanmış yay rijitlikleri kazık gömme derinliğince düğüm noktalarında zemin davranışını temsil etmek üzere tanımlanmıştır.

Çalışmanın ilk aşamasında güneş paneli sisteminin temelleri C tipi düz çelik kazıklarla modellenmiştir. Zemin davranışını temsil edecek yaylar, zeminin Elastisite Modülünün 20 MPa ve 40 MPa ve Poisson oranının her iki durum için de sabit ve $\nu_s=0,3$ olduğu kabulüyle Vesic (1961)'in tarafından önerilen yatak modülü denklemiyle hesaplanmıştır. Çelik ayaklara aktarılan yatay yüklere karşı çalışacak yatay zemin yayları ile modellenmiştir. Sürtünme davranışını temsil edecek düşey yaylar ile kazık ucundaki taban basıncını temsil edecek düşey

yay da modelde dikkate alınmıştır. Güneş paneli sistemindeki kazıklara 4 adet düğüm noktası atanmıştır. Tabandaki düğüm noktası hariç sürtünme durumunun tanımlanmadığı analizlerde her bir düğüm noktasına 2 adet yatay yüklere karşı çalışacak yay rijitlikleri, kazık tabanına ise bir adet taban basıncına karşı çalışacak yay rijitliği atanmıştır. Sürtünme durumunun tanımlandığı analizlerde ise taban dışındaki tüm noktalara yatay yayların haricinde sürtünmeye çalışacak bir adet düşey yay da modellenmiştir. Sürtünmenin yaylarla temsil edildiği güneş paneli sisteminin uç direncini temsil eden yay sürtünmesiz durumla aynıdır.

Güneş paneli sistemi öncelikle sürtünme davranışı modellenmeden sadece yatay yaylar ve kazık tabanında bir tane uç yayıyla analiz edilmiştir. Sonuçlar Çıkıllı (2017) tarafından aynı Elastisite Modülüne ve Poisson oranına sahip analiz sonuçlarıyla kıyaslanmıştır. Kıyaslamalarda, sürtünme davranışının Vesic (1961)'e göre hesaplanan yatak modülüyle temsil edilmediği analizlerin her iki Elastisite Modülü değeri için de Çıkıllı (2017)'nin deplasman değerleri ile çok yakın olduğu gözlemlenmiştir. Kazık zemin ara yüzünde meydana gelen sürtünmenin Vesic (1961)'e göre hesaplandığı yaylarla tanımlanan analizlerde ise deplasmanların %90 mertebesinde az çıktığı görülmüştür.

Güneş panellerinin temel sistemlerinin tasarımında birçok tasarımcının göz önünde bulundurduğu ilk kıstas basınç ve eğilme davranışı olsa da çok hafif malzemeler kullanılarak imal edilen bu yapılarda rüzgâr yükünün kaldırma etkisi de incelenmesi gereken önemli bir husustur. Bu nedenle, bu tür yapılarda rüzgâr kaldırma kuvvetine direnebilecek plakalı veya helisel kazık sistemleri tercih edilmektedir. Bu amaçla çalışmanın ikinci aşamasında rüzgâr yükü etkisiyle oluşan deplasmanları azaltmak amacıyla kullanılan plakalı sistemlerin davranışını kavrayabilmek için Lutenegeger (2016) tarafından plakalı ve plakasız çelik borular üzerinde gerçekleştirilen çekme deneyleri SAP2000'de modellenmiştir. Lutenegeger (2016) çalışmasında zemin parametreleri ve özellikleri ile ilgili detaylı bilgi vermemekle birlikte zeminin bir sert kil yapay dolgusu olduğunu belirtmiştir. Bu doğrultuda öncelikle kazıklara atanacak yay rijitlikleri Vesic (1961)' e göre katı killer için tipik elastisite modülü değerleri için (20 MPa, 30 MPa, 40 MPa ve 50 MPa seçilerek) düşey ve yatay doğrultuda hesaplanmıştır. Sistem yatay yüklere maruz kalmasa da yatay yükler kazıklara etkitilmediği takdirde sistemin çöktüğü gözlemlenmiştir. Bu koşullarda elde edilen yüklemeler altında düz kazıklar için bulunan deplasman değerlerinin Lutenegeger (2016)'in deney sonuçlarından oldukça küçük çıktığı görülmüştür. Vesic (1961)'e göre tanımlanan sürtünme davranışı

gerçekle uyuşmadığı düşüncesiyle katı killer için yatak modülü, Das (1990)'a göre 20000 kN/m³, 25000 kN/m³, 30000 kN/m³, 35000 kN/m³ ve 40000 kN/m³ olarak seçilerek analizler tekrarlanmıştır. Düz kazıkda $k_s=20000$ kN/m³ için 18 kN yüklemeye kadar Lutenegeer (2016) ile aynı deplasman değerleri elde edilmiştir. Bu çalışmada zeminin elastik olduğu kabulüyle yaylar lineer elastik tanımlandığı için yük deformasyon davranışı doğrusaldır. Düz kazıklar için yapılan analizlerde deney sonuçlarını sağlayan yatak modülü elde edildikten sonra SAP2000'de aynı yatak modülüyle plakalı kazıklar modellenerek aynı yükler altında deformasyon değerleri elde edilmiştir. Beklendiği üzere artan yükler altında plakalı kazıklarda deplasman değerleri düz kazıklara göre azalmış yaklaşık olarak 24 kN yüklemeye kadar (Lutenegeer (2016)'in doğrusala yakın yük-deformasyon davranışı sergileyen yaklaşık olarak son yük değeri) deney sonuçlarıyla benzer deformasyonlar elde edilmiştir.

Lutenegeer (2016)'in deneyleri ile plaka davranışının SAP2000'de modellenenebildiği tespit edildikten sonra aynı geometriye sahip plakalar çalışmanın ilk aşamasında analizi yapılan güneş sistemindeki kazıkların orta noktalarına eklenerek sistem analiz edilmiştir. Yapılan analizler sonunda plakalı sistemlerde deplasmanların çok azaldığı, plakasız durumda basınç altında 8,6 cm'lik deplasmanla göçme beklenen 4 numaralı kazıkta, plakalı durumda 0,3 cm değeri elde edilmiştir. Rüzgârın kaldırma kuvveti altında da plakalı kazıklarda beklediği üzere yukarı yönlü deplasmanlar azalmış, plakasız durumda 1,2 cm deplasman bulunurken, plakalar sisteme eklendikten sonra deplasman 0,01 cm gibi çok küçük bir değer olarak hesaplanmıştır.

Sonuç olarak güneş paneli taşıyıcı sistemlerinin yapısal analizinde sıklıkla kullanılan SAP2000 vb. yazılımlarda, diğer tüm Geoteknik işlerinde olduğu gibi, zemin davranışının ve geoteknik parametrelerin gerçeğe en yakın şekilde tahmin edilmesi gerekir. Vesic (1961)'e göre bulunan yatak modülü değeri, kazık zemin arasındaki sürtünme davranışı ihmal edildiği takdirde, panel sisteminin yatay yay rititliklerini ve taban basıncını tanımlama da gerçeğe yakın sonuçlar verse de, sürtünme yayları bu yöntemle dayanarak analizler yapıldığında elde edilen deplasmanlar gerçekçi değildir. Vesic (1961) bu bağıntıyı basınç altında elastik zeminde oturan uzun kirişler için önermiştir, dolayısıyla bu yaklaşım küçük çaplı çelik kazıklar için uygulandığında gerçek davranışı temsil etmeyen çok büyük yatak modülü değerleri hesaplanmaktadır.

KAYNAKLAR

- Adams, J.I., Hayes, D.C., 1967, The uplift capacity of shallow foundations, *Ontario Hydro Research Quarterly*, 19, 1–13.
- Adams, J.I., Klym, T.W., 1972, A study of anchorages for transmission tower foundations, *Canadian Geotechnical Journal*, 9, 89–104.
- Altaş, İ.H., 1998, Fotovoltaik Güneş Pilleri: Yapısal Özellikleri ve Karakteristikleri, *Enerji, Elektrik, Elektromekanik-3e*, 47, 66–71.
- Biot, M.A., 1937, Bending of an infinite beam on an elastic foundation, *Zeitschrift für Angewandte Mathematik und Mechanik*, 2(3), 165–184.
- Birand, A.A., 2001, *Kazıklı temeller*, Teknik yayınevi, Ankara.
- Bowles, L.E., 1996, *Foundation analysis and design.*, 5. ed, McGraw-hill.
- Çıkılı, E.B., 2017, *Güneş panellerinin temel tasarımında mevcut yöntemlerin değerlendirilmesi*, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Das, B.M., 1980, A procedure for estimation of ultimate capacity of foundations in clay, *Soils and Foundations*, 20, 77–82.
- Das, B.M., 1978, Model tests for uplift capacity of foundations in clay, *Soils and Foundations*, 18, 77–82.
- Das, B.M., Seeley, G.R., 1982, Uplift capacity of pipe piles in saturated clay, *The Japanese Society of Soil Mechanics and Foundation Engineering*, 22(1), 91–94.
- Davisson, M.T., 1970, Lateral load capacity of piles, *Highway Research Record*, 333.
- Elson, W.K., 1984, *Design of laterally-loaded piles*.
- Girgin, M.H., 2011, *Bir fotovoltaik güneş enerjisi santralinin fizibilitesi, karaman bölgesinde 5 mw'lık güneş enerjisi santrali için enerji üretim değerlendirmesi ve ekonomik analizi*, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Enerji Enstitüsü.
- IEA, 2013, *World Energy Outlook 2013*, International Energy Agency.
- Kahia, M., Aïssa, M.S. Ben, Lanouar, C., 2017, Renewable and non-renewable energy use - economic growth nexus: The case of mena net oil importing countries, *Renewable and sustainable energy reviews*.
- Kalogirou, S.A., 2013, *Solar energy engineering: processes and systems*, Academic P. ed.
- Kanıt, R., 2003, *Temel İnşaatı*, Gazi kitapevi, Ankara.

- Karaca, Z., Kas, A.A., Ak, M., 2001, *Zemin fiziksel parametreleri ile zemin yatak katsayıları arasındaki bağlantı ve zemin yapı etkileşiminde uygulama*, 213–218.
- Keleşoğlu, M.K., 1999, *Yatay yüklü kazıkların sonlu elemanlar yöntemi ile 3 boyutlu nonlinear analizi*, Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İTÜ.
- Kın, S., A., Yasa, B., Ansal, A., M., 1991, Yatay yükler etkisindeki kazıkların hesabında kullanılan yatay yatak katsayılarının belirlenmesi, *İnşaat Mühendisliğinde Zemin Sempozyumu*, İzmir, s. 1.
- Lutenegger, A.J., 2016, Foundation alternatives for ground mount solar panel installations, *Geotechnical and Structural Engineering Congress*, 1873–1885.
- Lutenegger, A.J., 2012, Tension tests on driven fin piles for support of solar panel arrays, *GeoCongress 2012*, ss. 305–314.
- Lutenegger, A.J., 2009, Cylindrical Shear or plate bearing? uplift behavior of multi-helix screw anchors in clay, *Contemporary Topics in Deep Foundations*, 456–463.
- McVeigh, J.C., 2013, *Sun power: an introduction to the applications of solar energy*, 2. ed, Elsevier.
- Merifield, R.S., 2011, Ultimate uplift capacity of multiplate helical type anchors in clay, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 137, 704–716.
- Merifield, R.S., Lyamin, A. V, Sloan, S.W., Yu, H.S., 2003, Three-dimensional lower bound solutions for stability of plate anchors in clay, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 129, 243–253.
- Meyerhof, G.G., Adams, J.I., 1968, Ultimate uplift capacity of foundations, *Canadian geotechnical journal*, 5, 225–244.
- Mitsch, M.P., Clemence, S.P., 1985, The uplift capacity of helix anchors in sand, *ASCE*, ss. 26–47.
- Mooney, J.S., Adamczak, S., Clemence, S.P., 1985, Uplift capacity of helical anchors in clay and silt, *Proceedings of ASCE*, ss. 48–72.
- NASA, 2017, *Global Energy Budget*, <https://mynasadata.larc.nasa.gov/what-is-the-earths-radiation-budget/>, [Ziyaret Tarihi: 4.20.18].
- NASA, 2008, *Global solar energy distribution*.
- Önalp, A., 2013, *Geoteknik Bilgisi I Zeminler ve Mekaniği Çözümlü Problemlerle*, Birsen Yayınevi.
- Pender, M.J., 1994, A note about units, *Aseismic pile foundation design analysis*, University of Auckland, ss. 50–51.
- Poulos, H.G., Davis, E.H., 1980, *Pile foundation analysis and design*.

- Ramjack, 2015, *Model Specifications: Helical Pile Specifications*.
- Rao, N., Prasad, Y.V.S.N., 1993, Estimation of uplift capacity of helical anchors in clays, *Journal of Geotechnical Engineering* 119, 352–357.
- Rao, S.N., Prasad, Y.V.S.N., Shetty, M.D., 1991, The behaviour of model screw piles in cohesive soils, *Soils and Foundations* 31, 35–50.
- Robinson, K.E., 1979, Horizontal subgrade reaction estimated from lateral loading tests on timber piles, *ASTM International*.
- Rowe, R.K., Davis, E.H., 1982, Behaviour of Anchor Plates in Clay, *Geotechnique* 32, 9–23.
- Selvadurai, A.P.S., 1984, The flexure of an infinite strip of finite width embedded in an isotropic elastic medium of infinite extent, *International journal for numerical and analytical methods in geomechanics* 8, 157–166.
- Terzaghi, K., 1955, Evaluation of coefficients of subgrade reaction, *Geotechnique*, 5(4), 297–326.
- Terzaghi, K., 1943, *Theoretical soil mechanics*, Wiley, New York.
- Toğrol, E., Tan, O., 2009, *Kazıklı temeller*, İstanbul.
- TS498, 1997, *TS 498-Yapı Elemanlarının Boyutlandırılmasında Alınacak Yüklerin Hesap Değerleri*, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara,Türkiye.
- TSE, 1980, *TS- 648 Çelik Yapıların Hesap ve Yapım Kuralları*, Ankara,Türkiye.
- Türk Standartları Enstitüsü, 2000, *TS 500-Betonarme Yapıların Tasarım ve Yapım Kuralları.*, Ankara, Türkiye.
- USACE, 1990, *Engineering and Design: Settlement Analysis*, CECW-EG Engineer Manual, Department of the Army U.S. Army Corps of Engineers, Washington.
- Varınca, K.B., Gönüllü, M.T., 2006, Türkiye’de güneş enerjisi potansiyeli ve bu potansiyelin kullanım derecesi, yöntemi ve yaygınlığı üzerine bir araştırma, *I. Ulusal Güneş ve Hidrojen Enerjisi Kongresi*, 270–275.
- Vesic, A.B., 1961, Beams on elastic subgrade and the Winkler’s hypothesis, *5th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, ss. 845–850.
- Vesic, A.S., 1971, Breakout resistance of objects embedded in ocean bottom, *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, 97, 1183–1205.
- Winkler, E., 1867, *Theory of elasticity and strength*, Dominicus Prague, Czechoslovakia.
- Yıldırım, S., 2009, *Zemin İncelemesi ve Temel Tasarımı*.

Yılmaz, B., 2016, *Helisel Kazıklar*, Yüksek Lisans, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.

Young, J., 2012, Uplift capacity and displacement of helical anchors in cohesive soil.

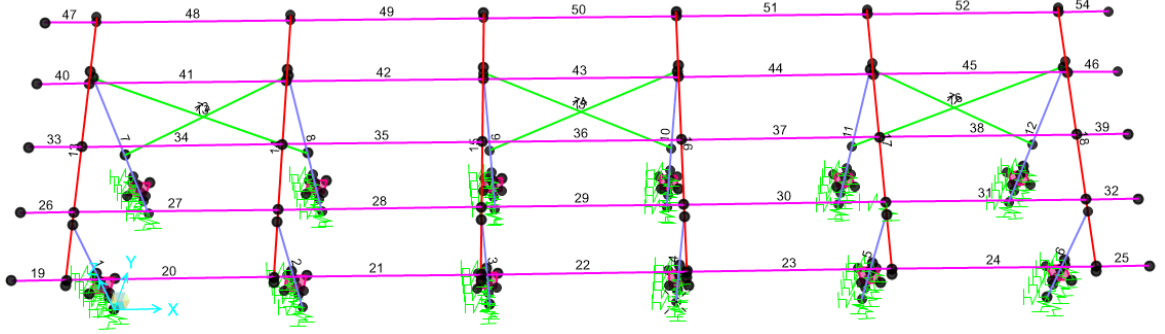
Yüceer, S.N., 2015, *Çevre kirliliğinin oluşumu*, Yapıda çevre ve enerji, In: Aslan, T. (ed.), Nobel, Ankara, ss. 55–59.

Zimmermann, H., 1888, *Die berechnung des eisenbahn-oberbaues*, Ernst & Ko. ed.

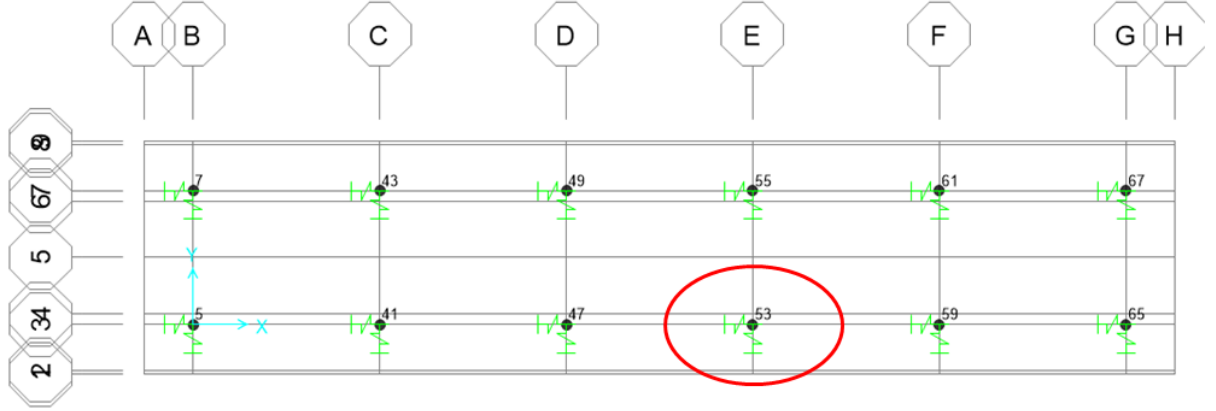


EKLER

EK 1. Üç Boyutlu plakalı sistem modeli ve düğüm noktası numaraları (Kolon tipi: C profil).



EK 2. Kazık tabanındaki düğüm noktaları ve numaraları (Bu çalışmadaki deplasmanlar 53 numaralı düğüm noktası için verilmiştir).



EK 3. C Tipi plakasız kazıklara etkiyen eksenel yükler.

Kolon Numarası	Yük Kombinasyonu	Eksenel Yük (kN)	Kolon Numarası	Yük Kombinasyonu	Eksenel Yük (kN)
1	D	-1.564	3	D+S	-7.741
2	D	-1.565	4	D+S	-7.745
3	D	-1.59	21	D+S	-7.904
4	D	-1.589	22	D+S	-7.893
5	D	-1.626	24	D+S	-8.131
6	D	-1.626	25	D+S	-8.127
7	D	-1.626	27	D+S	-8.131
8	D	-1.626	28	D+S	-8.127
9	D	-1.59	30	D+S	-7.904
10	D	-1.589	31	D+S	-7.893
11	D	-1.564	33	D+S	-7.741
12	D	-1.565	34	D+S	-7.745
1	D+0.5S+WY	-5.133	3	D+S+0.5WY	-7.982
2	D+0.5S+WY	-5.136	4	D+S+0.5WY	-7.986
3	D+0.5S+WY	-5.238	21	D+S+0.5WY	-8.15
4	D+0.5S+WY	-5.231	22	D+S+0.5WY	-8.138
5	D+0.5S+WY	-5.384	24	D+S+0.5WY	-8.384
6	D+0.5S+WY	-5.382	25	D+S+0.5WY	-8.38
7	D+0.5S+WY	-5.384	27	D+S+0.5WY	-8.384
8	D+0.5S+WY	-5.382	28	D+S+0.5WY	-8.38
9	D+0.5S+WY	-5.238	30	D+S+0.5WY	-8.15
10	D+0.5S+WY	-5.231	31	D+S+0.5WY	-8.138
11	D+0.5S+WY	-5.133	33	D+S+0.5WY	-7.982
12	D+0.5S+WY	-5.136	34	D+S+0.5WY	-7.986
1	D+0.5S-WY	-5.131	3	D+S-0.5WY	-8.276
2	D+0.5S-WY	-5.134	4	D+S-0.5WY	-8.28
3	D+0.5S-WY	-5.236	21	D+S-0.5WY	-8.45
4	D+0.5S-WY	-5.229	22	D+S-0.5WY	-8.438
5	D+0.5S-WY	-5.382	24	D+S-0.5WY	-8.693
6	D+0.5S-WY	-5.38	25	D+S-0.5WY	-8.689
7	D+0.5S-WY	-5.382	27	D+S-0.5WY	-8.693
8	D+0.5S-WY	-5.38	28	D+S-0.5WY	-8.689
9	D+0.5S-WY	-5.236	30	D+S-0.5WY	-8.45
10	D+0.5S-WY	-5.229	31	D+S-0.5WY	-8.438
11	D+0.5S-WY	-5.131	33	D+S-0.5WY	-8.276
12	D+0.5S-WY	-5.134	34	D+S-0.5WY	-8.28

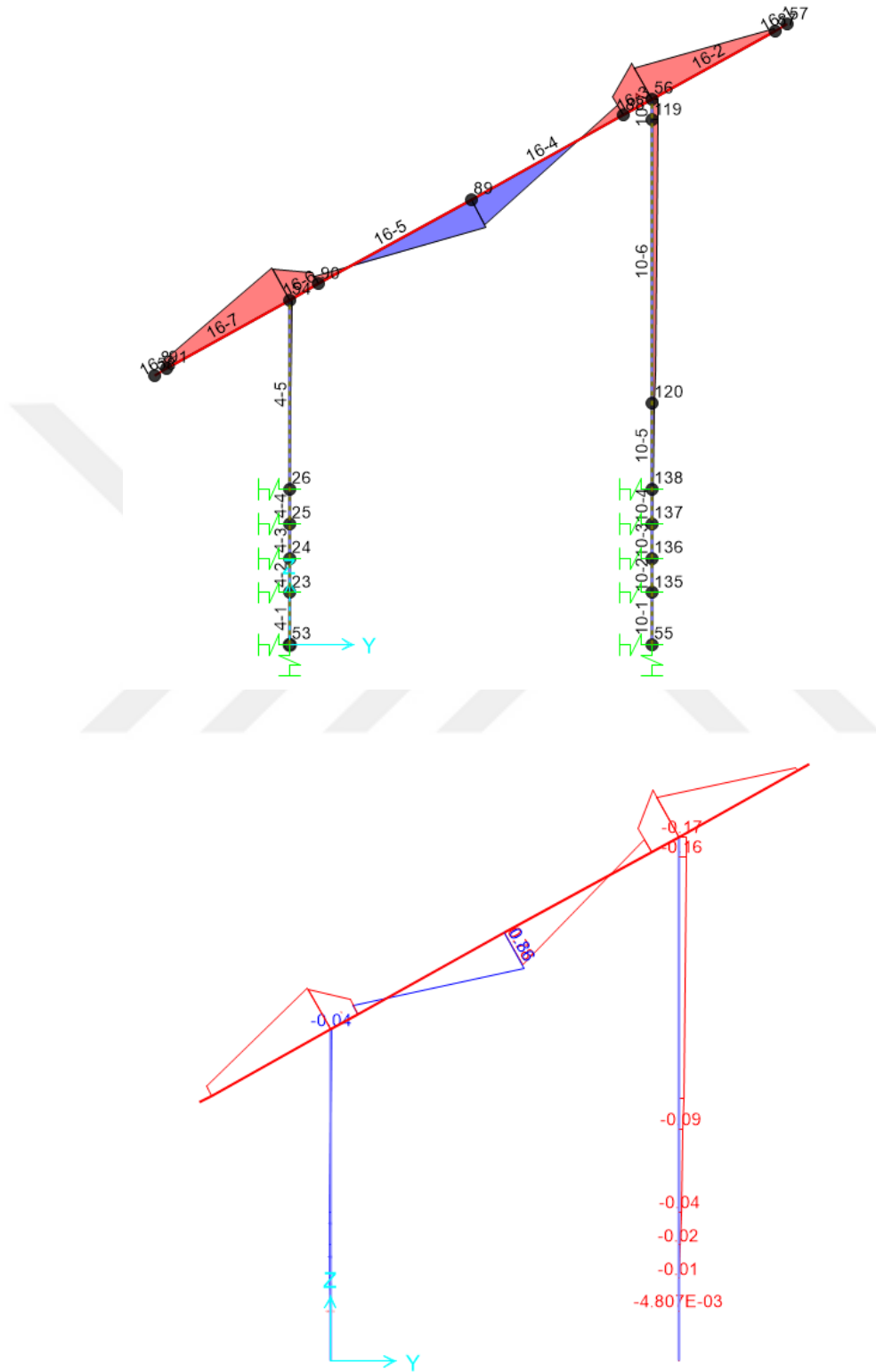
EK 3. C tipi plakasız kazıklara etkiyen eksenel yükler (devam).

Kolon Numarası	Yük Kombinasyonu	Eksenel Yük (kN)	Kolon Numarası	Yük Kombinasyonu	Eksenel Yük (kN)
1	D+S	-7.741	3	D+WY	-2.044
2	D+S	-7.745	4	D+WY	-2.045
3	D+S	-7.904	21	D+WY	-2.081
4	D+S	-7.893	22	D+WY	-2.079
5	D+S	-8.131	24	D+WY	-2.132
6	D+S	-8.127	25	D+WY	-2.131
7	D+S	-8.131	27	D+WY	-2.132
8	D+S	-8.127	28	D+WY	-2.131
9	D+S	-7.904	30	D+WY	-2.081
10	D+S	-7.893	31	D+WY	-2.079
11	D+S	-7.741	33	D+WY	-2.044
12	D+S	-7.745	34	D+WY	-2.045
1	D+S+0.5WY	-7.982	3	DEAD	-0.974
2	D+S+0.5WY	-7.986	4	DEAD	-0.975
3	D+S+0.5WY	-8.15	21	DEAD	-0.987
4	D+S+0.5WY	-8.138	22	DEAD	-0.986
5	D+S+0.5WY	-8.384	24	DEAD	-1.005
6	D+S+0.5WY	-8.38	25	DEAD	-1.005
7	D+S+0.5WY	-8.384	27	DEAD	-1.005
8	D+S+0.5WY	-8.38	28	DEAD	-1.005
9	D+S+0.5WY	-8.15	30	DEAD	-0.987
10	D+S+0.5WY	-8.138	31	DEAD	-0.986
11	D+S+0.5WY	-7.982	33	DEAD	-0.974
12	D+S+0.5WY	-7.986	34	DEAD	-0.975
1	D+S-0.5WY	-8.276	3	D-WY	-2.632
2	D+S-0.5WY	-8.28	4	D-WY	-2.634
3	D+S-0.5WY	-8.45	21	D-WY	-2.682
4	D+S-0.5WY	-8.438	22	D-WY	-2.679
5	D+S-0.5WY	-8.693	24	D-WY	-2.751
6	D+S-0.5WY	-8.689	25	D-WY	-2.75
7	D+S-0.5WY	-8.693	27	D-WY	-2.751
8	D+S-0.5WY	-8.689	28	D-WY	-2.75
9	D+S-0.5WY	-8.45	30	D-WY	-2.682
10	D+S-0.5WY	-8.438	31	D-WY	-2.679
11	D+S-0.5WY	-8.276	33	D-WY	-2.632
12	D+S-0.5WY	-8.28	34	D-WY	-2.634

EK 3. C Tipi plakasız kazıklara etkiyen eksenel yükler (devam).

Kolon Numarası	Yük Kombinasyonu	Eksenel Yük (kN)	Kolon Numarası	Yük Kombinasyonu	Eksenel Yük (kN)
1	PANEL	-0.59	3	WINDY+	-0.48
2	PANEL	-0.59	4	WINDY+	-0.48
3	PANEL	-0.603	21	WINDY+	-0.491
4	PANEL	-0.602	22	WINDY+	-0.49
5	PANEL	-0.621	24	WINDY+	-0.506
6	PANEL	-0.621	25	WINDY+	-0.505
7	PANEL	-0.621	27	WINDY+	-0.506
8	PANEL	-0.621	28	WINDY+	-0.505
9	PANEL	-0.603	30	WINDY+	-0.491
10	PANEL	-0.602	31	WINDY+	-0.49
11	PANEL	-0.59	33	WINDY+	-0.48
12	PANEL	-0.59	34	WINDY+	-0.48
1	SNOW	-6.177	3	WINDY-	1.068
2	SNOW	-6.18	4	WINDY-	1.069
3	SNOW	-6.314	21	WINDY-	1.092
4	SNOW	-6.304	22	WINDY-	1.09
5	SNOW	-6.505	24	WINDY-	1.125
6	SNOW	-6.501	25	WINDY-	1.124
7	SNOW	-6.505	27	WINDY-	1.125
8	SNOW	-6.501	28	WINDY-	1.124
9	SNOW	-6.314	30	WINDY-	1.092
10	SNOW	-6.304	31	WINDY-	1.09
11	SNOW	-6.177	33	WINDY-	1.068
12	SNOW	-6.18	34	WINDY-	1.069

Ek 4. E Aksında meydana gelen momentler (kN.m).



EK 5. $E_s=20$ MPa için C Profil plakasız kazık yay ritijliği atamaları ($f_s=0$).

Düğüm Noktası	K_x kN/mm	K_y kN/mm	K_z kN/mm	Düğüm Noktası	K_x kN/mm	K_y kN/mm	K_z kN/mm	Düğüm Noktası	K_x kN/mm	K_y kN/mm	K_z kN/mm
5	2	3.59	0.0966	25	2	3.59		135	2	3.59	0
7	2	3.59	0.0966	26	2	3.59	0	136	2	3.59	0
41	2	3.59	0.0966	27	2	3.59	0	137	2	3.59	0
43	2	3.59	0.0966	28	2	3.59	0	138	2	3.59	0
47	2	3.59	0.0966	30	2	3.59	0	139	2	3.59	0
49	2	3.59	0.0966	31	2	3.59	0	140	2	3.59	0
53	2	3.59	0.0966	32	2	3.59	0	142	2	3.59	0
55	2	3.59	0.0966	33	2	3.59	0	143	2	3.59	0
59	2	3.59	0.0966	35	2	3.59	0	144	2	3.59	0
61	2	3.59	0.0966	36	2	3.59	0	145	2	3.59	0
65	2	3.59	0.0966	37	2	3.59	0	147	2	3.59	0
67	2	3.59	0.0966	38	2	3.59	0	148	2	3.59	0
2	2	3.59	0	40	2	3.59	0	149	2	3.59	0
4	2	3.59	0	81	2	3.59	0	150	2	3.59	0
11	2	3.59	0	114	2	3.59	0	1	2	3.59	0
12	2	3.59	0	115	2	3.59	0	3	2	3.59	0
14	2	3.59	0	127	2	3.59	0	13	2	3.59	0
15	2	3.59	0	128	2	3.59	0	19	2	3.59	0
16	2	3.59	0	129	2	3.59	0	24	2	3.59	0
17	2	3.59	0	130	2	3.59	0	29	2	3.59	0
20	2	3.59	0	131	2	3.59	0	34	2	3.59	0
21	2	3.59	0	132	2	3.59	0	39	2	3.59	0
22	2	3.59	0	133	2	3.59	0	126	2	3.59	0

EK 6. $E_s=20$ MPa için C Profil plakasız kazıkların tabanında meydana gelen düşey deplasmanlar ($f_s=0$).

Düğüm Noktası	Yük Kombinasyonu	Deplasman (mm)	Düğüm Noktası	Yük Kombinasyonu	Deplasman (mm)	Düğüm Noktası	Yük Kombinasyonu	Deplasman (mm)
5	D	-24.615246	47	D	-27.028551	59	D	-26.077487
5	D+S+0.5WY	-96.483608	47	D+S+0.5WY	-109.8498	59	D+S+0.5WY	-105.655985
5	D+S-0.5WY	-88.951201	47	D+S-0.5WY	-101.08482	59	D+S-0.5WY	-97.240969
5	D+0.5S+WY	-64.053231	47	D+0.5S+WY	-72.516323	59	D+0.5S+WY	-69.781098
5	D+0.5S-WY	-33.811056	47	D+0.5S-WY	-38.132751	59	D+0.5S-WY	-36.706304
5	D+S	-94.147739	47	D+S	-107.1317	59	D+S	-103.046411
5	D+WY	-38.724868	47	D+WY	-42.639681	59	D+WY	-41.129362
5	D-WY	-23.660056	47	D-WY	-25.109731	59	D-WY	-24.299328
7	D	-28.504225	49	D	-28.745663	61	D	-27.617592
7	D+S+0.5WY	-105.904163	49	D+S+0.5WY	-110.01604	61	D+S+0.5WY	-105.736612
7	D+S-0.5WY	-97.918131	49	D+S-0.5WY	-101.5558	61	D+S-0.5WY	-97.603577
7	D+0.5S+WY	-70.919008	49	D+0.5S+WY	-73.31625	61	D+0.5S+WY	-70.460297
7	D+0.5S-WY	-37.652422	49	D+0.5S-WY	-38.79987	61	D+0.5S-WY	-37.287014
7	D+S	-103.42762	49	D+S	-107.39244	61	D+S	-103.214483
7	D+WY	-44.667012	49	D+WY	-45.142628	61	D+WY	-43.372231
7	D-WY	-28.694949	49	D-WY	-28.222145	61	D-WY	-27.10616
41	D	-26.410316	53	D	-26.930067	65	D	-23.992325
41	D+S+0.5WY	-106.185805	53	D+S+0.5WY	-109.69461	65	D+S+0.5WY	-95.464214
41	D+S-0.5WY	-97.766922	53	D+S-0.5WY	-100.93058	65	D+S-0.5WY	-87.942559
41	D+0.5S+WY	-70.214222	53	D+0.5S+WY	-72.38905	65	D+0.5S+WY	-63.227072
41	D+0.5S-WY	-36.963804	53	D+0.5S-WY	-38.056967	65	D+0.5S-WY	-33.32196
41	D+S	-103.575031	53	D+S	-106.9768	65	D+S	-93.131679
41	D+WY	-41.62953	53	D+WY	-42.491729	65	D+WY	-37.787918
41	D-WY	-24.791762	53	D-WY	-24.963666	65	D-WY	-22.744608
43	D	-28.471329	55	D	-28.488463	67	D	-27.029924
43	D+S+0.5WY	-106.975932	55	D+S+0.5WY	-109.63794	67	D+S+0.5WY	-103.627052
43	D+S-0.5WY	-98.848118	55	D+S-0.5WY	-101.17673	67	D+S-0.5WY	-95.649324
43	D+0.5S+WY	-71.504396	55	D+0.5S+WY	-72.999055	67	D+0.5S+WY	-69.03944
43	D+0.5S-WY	-37.916678	55	D+0.5S-WY	-38.608955	67	D+0.5S-WY	-36.529773
43	D+S	-104.455422	55	D+S	-107.01404	67	D+S	-101.153085
43	D+WY	-44.651588	55	D+WY	-44.757061	67	D+WY	-42.453573
43	D-WY	-28.39596	55	D-WY	-27.83463	67	D-WY	-26.498117

EK 7. $E_s=20$ MPa için C Profil plakasız kazıkların tabanında meydana gelen düşey deplasmanlar ($f_s \neq 0$).

Düğüm Noktası	Yük Kombinasyonu	Deplasman (mm)	Düğüm Noktası	Yük Kombinasyonu	Deplasman (mm)	Düğüm Noktası	Yük Kombinasyonu	Deplasman (mm)
5	D	-0.115067	47	D	-0.14567	59	D	-0.15315
5	D+S+0.5WY	-0.448927	47	D+S+0.5WY	-0.60296	59	D+S+0.5WY	-0.64181
5	D+S-0.5WY	-0.413981	47	D+S-0.5WY	-0.55434	59	D+S-0.5WY	-0.5897
5	D+0.5S+WY	-0.298252	47	D+0.5S+WY	-0.39693	59	D+0.5S+WY	-0.42172
5	D+0.5S-WY	-0.157513	47	D+0.5S-WY	-0.20833	59	D+0.5S-WY	-0.22106
5	D+S	-0.43809	47	D+S	-0.58788	59	D+S	-0.62565
5	D+WY	-0.18096	47	D+WY	-0.23013	59	D+WY	-0.24219
5	D-WY	-0.111068	47	D-WY	-0.13289	59	D-WY	-0.13796
7	D	-0.151772	49	D	-0.16384	61	D	-0.16942
7	D+S+0.5WY	-0.510995	49	D+S+0.5WY	-0.62766	61	D+S+0.5WY	-0.65631
7	D+S-0.5WY	-0.475163	49	D+S-0.5WY	-0.57936	61	D+S-0.5WY	-0.60545
7	D+0.5S+WY	-0.348051	49	D+0.5S+WY	-0.41822	61	D+0.5S+WY	-0.43653
7	D+0.5S-WY	-0.18685	49	D+0.5S-WY	-0.2213	61	D+0.5S-WY	-0.23072
7	D+S	-0.499883	49	D+S	-0.61268	61	D+S	-0.64054
7	D+WY	-0.236231	49	D+WY	-0.25731	61	D+WY	-0.26631
7	D-WY	-0.164566	49	D-WY	-0.16072	61	D-WY	-0.16458
41	D	-0.153089	53	D	-0.14568	65	D	-0.11511
41	D+S+0.5WY	-0.64177	53	D+S+0.5WY	-0.60297	65	D+S+0.5WY	-0.449
41	D+S-0.5WY	-0.589649	53	D+S-0.5WY	-0.55435	65	D+S-0.5WY	-0.41405
41	D+0.5S+WY	-0.421674	53	D+0.5S+WY	-0.39694	65	D+0.5S+WY	-0.29831
41	D+0.5S-WY	-0.221029	53	D+0.5S-WY	-0.20834	65	D+0.5S-WY	-0.15755
41	D+S	-0.625607	53	D+S	-0.58789	65	D+S	-0.43816
41	D+WY	-0.242102	53	D+WY	-0.23015	65	D+WY	-0.18102
41	D-WY	-0.137859	53	D-WY	-0.13291	65	D-WY	-0.11113
43	D	-0.169779	55	D	-0.16361	67	D	-0.13375
43	D+S+0.5WY	-0.655738	55	D+S+0.5WY	-0.62813	67	D+S+0.5WY	-0.48151
43	D+S-0.5WY	-0.605017	55	D+S-0.5WY	-0.57973	67	D+S-0.5WY	-0.44599
43	D+0.5S+WY	-0.436352	55	D+0.5S+WY	-0.41838	67	D+0.5S+WY	-0.32416
43	D+0.5S-WY	-0.230697	55	D+0.5S-WY	-0.22134	67	D+0.5S-WY	-0.1727
43	D+S	-0.640009	55	D+S	-0.61312	67	D+S	-0.4705
43	D+WY	-0.266803	55	D+WY	-0.25699	67	D+WY	-0.20913
43	D-WY	-0.16536	55	D-WY	-0.16019	67	D-WY	-0.13809

EK 8. $E_s=20$ MPa için C Profil plakalı kazıkların tabanında meydana gelen düşey deplasmanlar ($f_s=0$).

Düğüm Noktası	Yük Kombinasyonu	Deplasman (mm)	Düğüm Noktası	Yük Kombinasyonu	Deplasman (mm)	Düğüm Noktası	Yük Kombinasyonu	Deplasman (mm)
5	D	-1.259281	47	D	-1.463727	59	D	-1.490341
5	D+S+0.5WY	-4.013093	47	D+S+0.5WY	-5.049279	59	D+S+0.5WY	-5.188612
5	D+S-0.5WY	-3.769011	47	D+S-0.5WY	-4.712938	59	D+S-0.5WY	-4.839698
5	D+0.5S+WY	-2.749725	47	D+0.5S+WY	-3.412957	59	D+0.5S+WY	-3.501778
5	D+0.5S-WY	-1.344778	47	D+0.5S-WY	-1.686117	59	D+0.5S-WY	-1.731696
5	D+S	-3.937401	47	D+S	-4.944977	59	D+S	-5.08041
5	D+WY	-2.141464	47	D+WY	-2.470203	59	D+WY	-2.513131
5	D-WY	-1.6533	47	D-WY	-1.79752	59	D-WY	-1.815304
7	D	-1.52115	49	D	-1.584213	61	D	-1.570965
7	D+S+0.5WY	-4.574471	49	D+S+0.5WY	-5.192266	61	D+S+0.5WY	-5.135901
7	D+S-0.5WY	-4.309074	49	D+S-0.5WY	-4.860699	61	D+S-0.5WY	-4.808949
7	D+0.5S+WY	-3.171263	49	D+0.5S+WY	-3.542473	61	D+0.5S+WY	-3.505519
7	D+0.5S-WY	-1.584612	49	D+0.5S-WY	-1.766768	61	D+0.5S-WY	-1.747425
7	D+S	-4.492169	49	D+S	-5.089444	61	D+S	-5.03451
7	D+WY	-2.5394	49	D+WY	-2.6498	61	D+WY	-2.628823
7	D-WY	-2.008607	49	D-WY	-1.986666	61	D-WY	-1.974919
41	D	-1.489749	53	D	-1.463715	65	D	-1.257136
41	D+S+0.5WY	-5.1876	53	D+S+0.5WY	-5.049373	65	D+S+0.5WY	-4.009958
41	D+S-0.5WY	-4.838702	53	D+S-0.5WY	-4.713017	65	D+S-0.5WY	-3.765865
41	D+0.5S+WY	-3.500969	53	D+0.5S+WY	-3.413004	65	D+0.5S+WY	-2.74709
41	D+0.5S-WY	-1.73122	53	D+0.5S-WY	-1.686137	65	D+0.5S-WY	-1.343191
41	D+S	-5.079404	53	D+S	-4.945066	65	D+S	-3.934263
41	D+WY	-2.51224	53	D+WY	-2.470189	65	D+WY	-2.13825
41	D-WY	-1.814444	53	D-WY	-1.797478	65	D-WY	-1.650065
43	D	-1.587302	55	D	-1.575777	67	D	-1.415803
43	D+S+0.5WY	-5.149285	55	D+S+0.5WY	-5.186296	67	D+S+0.5WY	-4.405288
43	D+S-0.5WY	-4.82374	55	D+S-0.5WY	-4.853884	67	D+S-0.5WY	-4.141299
43	D+0.5S+WY	-3.519726	55	D+0.5S+WY	-3.535663	67	D+0.5S+WY	-3.033343
43	D+0.5S-WY	-1.756812	55	D+0.5S-WY	-1.762163	67	D+0.5S-WY	-1.502745
43	D+S	-5.048331	55	D+S	-5.083212	67	D+S	-4.323423
43	D+WY	-2.652991	55	D+WY	-2.637348	67	D+WY	-2.381016
43	D-WY	-2.0019	55	D-WY	-1.972524	67	D-WY	-1.853039

EK 9. $E_s=20$ MPa için C Profil plakalı kazıkların tabanında meydana gelen düşey deplasmanlar ($f_s \neq 0$).

Düğüm Noktası	Yük Kombinasyonu	Deplasman (mm)	Düğüm Noktası	Yük Kombinasyonu	Deplasman (mm)	Düğüm Noktası	Yük Kombinasyonu	Deplasman (mm)
5	D	-0.114283	47	D	-0.132459	59	D	-0.114951
5	D+S+0.5WY	-0.369381	47	D+S+0.5WY	-0.488533	59	D+S+0.5WY	-0.409218
5	D+S-0.5WY	-0.338603	47	D+S-0.5WY	-0.445572	59	D+S-0.5WY	-0.373714
5	D+0.5S+WY	-0.256149	47	D+0.5S+WY	-0.33048	59	D+0.5S+WY	-0.2786
5	D+0.5S-WY	-0.123601	47	D+0.5S-WY	-0.164235	59	D+0.5S-WY	-0.140048
5	D+S	-0.359837	47	D+S	-0.47521	59	D+S	-0.398208
5	D+WY	-0.133373	47	D+WY	-0.159104	59	D+WY	-0.136971
5	D-WY	-0.071816	47	D-WY	-0.073182	59	D-WY	-0.065963
7	D	-0.122609	49	D	-0.140258	61	D	-0.142531
7	D+S+0.5WY	-0.380772	49	D+S+0.5WY	-0.493201	61	D+S+0.5WY	-0.509076
7	D+S-0.5WY	-0.349624	49	D+S-0.5WY	-0.450617	61	D+S-0.5WY	-0.464852
7	D+0.5S+WY	-0.266179	49	D+0.5S+WY	-0.336538	61	D+0.5S+WY	-0.346375
7	D+0.5S-WY	-0.132618	49	D+0.5S-WY	-0.171378	61	D+0.5S-WY	-0.177089
7	D+S	-0.371113	49	D+S	-0.479995	61	D+S	-0.495362
7	D+WY	-0.141928	49	D+WY	-0.166669	61	D+WY	-0.16996
7	D-WY	-0.079632	49	D-WY	-0.081502	61	D-WY	-0.08151
41	D	-0.136817	53	D	-0.131806	65	D	-0.11392
41	D+S+0.5WY	-0.517529	53	D+S+0.5WY	-0.486484	65	D+S+0.5WY	-0.370111
41	D+S-0.5WY	-0.471595	53	D+S-0.5WY	-0.443691	65	D+S-0.5WY	-0.339201
41	D+0.5S+WY	-0.34854	53	D+0.5S+WY	-0.329051	65	D+0.5S+WY	-0.256393
41	D+0.5S-WY	-0.174145	53	D+0.5S-WY	-0.163461	65	D+0.5S-WY	-0.123554
41	D+S	-0.503284	53	D+S	-0.473214	65	D+S	-0.360525
41	D+WY	-0.165306	53	D+WY	-0.158347	65	D+WY	-0.133091
41	D-WY	-0.073438	53	D-WY	-0.072761	65	D-WY	-0.07127
43	D	-0.143673	55	D	-0.14026	67	D	-0.122635
43	D+S+0.5WY	-0.516426	55	D+S+0.5WY	-0.49232	67	D+S+0.5WY	-0.379891
43	D+S-0.5WY	-0.471452	55	D+S-0.5WY	-0.449843	67	D+S-0.5WY	-0.348853
43	D+0.5S+WY	-0.35097	55	D+0.5S+WY	-0.336049	67	D+0.5S+WY	-0.265701
43	D+0.5S-WY	-0.179218	55	D+0.5S-WY	-0.171198	67	D+0.5S-WY	-0.13245
43	D+S	-0.502479	55	D+S	-0.479147	67	D+S	-0.370266
43	D+WY	-0.171567	55	D+WY	-0.166605	67	D+WY	-0.141886
43	D-WY	-0.081619	55	D-WY	-0.081651	67	D-WY	-0.079808

EK 10. $E_s=40$ MPa için C Profil plakasız kazık yay ritijliği atamaları ($f_s=0$).

Düğüm Noktası	K_x	K_y	K_z	Düğüm Noktası	K_x	K_y	K_z
	KN/mm	KN/mm	KN/mm		KN/mm	KN/mm	KN/mm
11	5	8.38915	0	2	5	8.38915	0
115	5	8.38915	0	20	5	8.38915	0
126	5	8.38915	0	21	5	8.38915	0
127	5	8.38915	0	23	5	8.38915	0
128	5	8.38915	0	24	5	8.38915	0
13	5	8.38915	0	25	5	8.38915	0
130	5	8.38915	0	26	5	8.38915	0
131	5	8.38915	0	28	5	8.38915	0
132	5	8.38915	0	29	5	8.38915	0
133	5	8.38915	0	3	5	8.38915	0
135	5	8.38915	0	30	5	8.38915	0
136	5	8.38915	0	31	5	8.38915	0
137	5	8.38915	0	33	5	8.38915	0
138	5	8.38915	0	34	5	8.38915	0
14	5	8.38915	0	35	5	8.38915	0
140	5	8.38915	0	36	5	8.38915	0
141	5	8.38915	0	38	5	8.38915	0
142	5	8.38915	0	39	5	8.38915	0
143	5	8.38915	0	4	5	8.38915	0
145	5	8.38915	0	40	5	8.38915	0
146	5	8.38915	0	41	5	8.38915	0.2047
147	5	8.38915	0	43	5	8.38915	0.2047
148	5	8.38915	0	47	5	8.38915	0.2047
15	5	8.38915	0	49	5	8.38915	0.2047
16	5	8.38915	0	5	5	8.38915	0.2047
18	5	8.38915	0	53	5	8.38915	0.2047
19	5	8.38915	0	55	5	8.38915	0.2047
67	5	8.38915	0.2047	59	5	8.38915	0.2047
7	5	8.38915	0.2047	61	5	8.38915	0.2047
81	5	8.38915	0	65	5	8.38915	0.2047
95	5	8.38915	0				

EK 11. $E_s=40$ MPa için C Profil plakasız kazıkların tabanında meydana gelen düşey deplasmanlar ($f_s=0$).

Düğüm Noktası	Yük Kombinasyonu	Deplasman (mm)	Düğüm Noktası	Yük Kombinasyonu	Deplasman (mm)	Düğüm Noktası	Yük Kombinasyonu	Deplasman (mm)
5	D	-0.753905	47	D	-7.738736	59	D	-7.820732
5	D+S+0.5WY	-3.762633	47	D+S+0.5WY	-41.664067	59	D+S+0.5WY	-41.746662
5	D+S-0.5WY	-3.399622	47	D+S-0.5WY	-37.570883	59	D+S-0.5WY	-37.653407
5	D+0.5S+WY	-2.427129	47	D+0.5S+WY	-26.605402	59	D+0.5S+WY	-26.687732
5	D+0.5S-WY	-1.424502	47	D+0.5S-WY	-15.3001	59	D+0.5S-WY	-15.382226
5	D+S	-3.65006	47	D+S	-40.394732	59	D+S	-40.477306
5	D+WY	-0.979051	47	D+WY	-10.277404	59	D+WY	-10.359445
5	D-WY	-0.253028	47	D-WY	-2.091038	59	D-WY	-2.172934
7	D	-7.065883	49	D	-8.212642	61	D	-8.005723
7	D+S+0.5WY	-34.548896	49	D+S+0.5WY	-41.148091	61	D+S+0.5WY	-39.708211
7	D+S-0.5WY	-31.232996	49	D+S-0.5WY	-37.17434	61	D+S-0.5WY	-35.88322
7	D+0.5S+WY	-22.349826	49	D+0.5S+WY	-26.528812	61	D+0.5S+WY	-25.636215
7	D+0.5S-WY	-13.191561	49	D+0.5S-WY	-15.553615	61	D+0.5S-WY	-15.071891
7	D+S	-33.520604	49	D+S	-39.915794	61	D+S	-38.522046
7	D+WY	-9.122466	49	D+WY	-10.677236	61	D+WY	-10.378053
7	D-WY	-2.490666	49	D-WY	-2.729733	61	D-WY	-2.728071
41	D	-5.845023	53	D	-8.062253	65	D	-7.039546
41	D+S+0.5WY	-31.493364	53	D+S+0.5WY	-43.338299	65	D+S+0.5WY	-36.369454
41	D+S-0.5WY	-28.398822	53	D+S-0.5WY	-39.082148	65	D+S-0.5WY	-32.830721
41	D+0.5S+WY	-20.108662	53	D+0.5S+WY	-27.680084	65	D+0.5S+WY	-23.350591
41	D+0.5S-WY	-11.561588	53	D+0.5S-WY	-15.924662	65	D+0.5S-WY	-13.576654
41	D+S	-30.533717	53	D+S	-42.018427	65	D+S	-35.27206
41	D+WY	-7.764315	53	D+WY	-10.701997	65	D+WY	-9.234334
41	D-WY	-1.575231	53	D-WY	-2.189696	65	D-WY	-2.156868
43	D	-7.665619	55	D	-8.454458	67	D	-8.069919
43	D+S+0.5WY	-37.91668	55	D+S+0.5WY	-42.408959	67	D+S+0.5WY	-39.791166
43	D+S-0.5WY	-34.266807	55	D+S-0.5WY	-38.312257	67	D+S-0.5WY	-35.963912
43	D+0.5S+WY	-24.488938	55	D+0.5S+WY	-27.337347	67	D+0.5S+WY	-25.710843
43	D+0.5S-WY	-14.408255	55	D+0.5S-WY	-16.022568	67	D+0.5S-WY	-15.140265
43	D+S	-36.78482	55	D+S	-41.138534	67	D+S	-38.604299
43	D+WY	-9.929338	55	D+WY	-10.995309	67	D+WY	-10.443654

EK 11. $E_s=20$ MPa için C Profil plakalı kazıkların tabanında meydana gelen düşey deplasmanlar ($f_s=0$).

Düğüm Noktası	Yük Kombinasyonu	Deplasman (mm)	Düğüm Noktası	Yük Kombinasyonu	Deplasman (mm)	Düğüm Noktası	Yük Kombinasyonu	Deplasman (mm)
5	D	-0.536448	47	D	-0.664553	59	D	-0.675281
5	D+S+0.5WY	-2.533048	47	D+S+0.5WY	-3.376368	59	D+S+0.5WY	-3.441351
5	D+S-0.5WY	-2.545836	47	D+S-0.5WY	-3.31611	59	D+S-0.5WY	-3.385576
5	D+0.5S+WY	-1.528799	47	D+0.5S+WY	-2.04849	59	D+0.5S+WY	-2.08426
5	D+0.5S-WY	-1.363303	47	D+0.5S-WY	-1.670749	59	D+0.5S-WY	-1.710171
5	D+S	-2.537013	47	D+S	-3.357681	59	D+S	-3.424055
5	D+WY	-0.528517	47	D+WY	-0.701925	59	D+WY	-0.709873
5	D-WY	-0.554093	47	D-WY	-0.581411	59	D-WY	-0.598323
7	D	-0.610297	49	D	-0.727964	61	D	-0.716029
7	D+S+0.5WY	-2.78871	49	D+S+0.5WY	-3.528349	61	D+S+0.5WY	-3.463109
7	D+S-0.5WY	-2.410952	49	D+S-0.5WY	-3.087364	61	D+S-0.5WY	-3.023722
7	D+0.5S+WY	-1.875223	49	D+0.5S+WY	-2.333287	61	D+0.5S+WY	-2.293956
7	D+0.5S-WY	-0.922856	49	D+0.5S-WY	-1.196943	61	D+0.5S-WY	-1.165848
7	D+S	-2.671564	49	D+S	-3.391596	61	D+S	-3.326851
7	D+WY	-0.84459	49	D+WY	-1.001471	61	D+WY	-0.988544
7	D-WY	-0.089073	49	D-WY	-0.119501	61	D-WY	-0.109771
41	D	-0.675974	53	D	-0.664528	65	D	-0.535296
41	D+S+0.5WY	-3.442139	53	D+S+0.5WY	-3.376146	65	D+S+0.5WY	-2.568046
41	D+S-0.5WY	-3.394613	53	D+S-0.5WY	-3.315566	65	D+S-0.5WY	-2.49793
41	D+0.5S+WY	-2.081164	53	D+0.5S+WY	-2.048517	65	D+0.5S+WY	-1.584286
41	D+0.5S-WY	-1.723321	53	D+0.5S-WY	-1.67016	65	D+0.5S-WY	-1.251976
41	D+S	-3.427401	53	D+S	-3.357359	65	D+S	-2.546302
41	D+WY	-0.705451	53	D+WY	-0.702101	65	D+WY	-0.578783
41	D-WY	-0.6104	53	D-WY	-0.580942	65	D-WY	-0.438551
43	D	-0.715781	55	D	-0.727425	67	D	-0.611818
43	D+S+0.5WY	-3.458575	55	D+S+0.5WY	-3.492739	67	D+S+0.5WY	-2.760231
43	D+S-0.5WY	-3.031999	55	D+S-0.5WY	-3.130642	67	D+S-0.5WY	-2.469017
43	D+0.5S+WY	-2.285605	55	D+0.5S+WY	-2.278517	67	D+0.5S+WY	-1.821487
43	D+0.5S-WY	-1.18315	55	D+0.5S-WY	-1.300968	67	D+0.5S-WY	-1.042517
43	D+S	-3.32629	55	D+S	-3.38045	67	D+S	-2.669923
43	D+WY	-0.980351	55	D+WY	-0.952005	67	D+WY	-0.792435
43	D-WY	-0.1272	55	D-WY	-0.22781	67	D-WY	-0.210007

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler	
Adı Soyadı	Burcu ÖZBAŞARAN
Doğum Yeri	Kırklareli
Doğum Tarihi	23.07.1990
Uyruğu	☒ T.C. ☐ Diğer:
Telefon	05372060661
E-Posta Adresi	burcuozbasaran@ gmail.com
Web Adresi	-



Eğitim Bilgileri	
Lisans	
Üniversite	İstanbul Kültür Üniversitesi
Fakülte	Mühendislik Fakültesi
Bölümü	İnşaat Mühendisliği
Mezuniyet Yılı	24.06.2014

Yüksek Lisans	
Üniversite	İstanbul Üniversitesi
Enstitü Adı	Fen Bilimleri Enstitüsü
Anabilim Dalı	İnşaat Mühendisliği
Programı	İnşaat Mühendisliği

Makale ve Bildiriler	
Dışkaya, B., Karademir, T., Geoteknik altyapı projelerinde tasarlanan kum-bentonit dolguların konsolidasyon özellikleri, 7. Uluslararası Katılımlı Geoteknik Sempozyumu, 22-23-24 Kasım 2017, İstanbul	