



**T.C.
BURDUR MEHMET AKİF ERSOY ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
YÜKSEK LİSANS TEZİ**

KARASAL RÜZGÂR TÜRBİNLERİNİN ZEMİNİNDE OLUŞABİLECEK DEFORMASYONLARIN SONLU ELEMENLAR YÖNTEMİ İLE İNCELENMESİ

Halit DEĞER

BURDUR, 2020

**T.C.
BURDUR MEHMET AKİF ERSOY ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**KARASAL RÜZGÂR TÜRBİNLERİNİN ZEMİNİNDE
OLUŞABİLECEK DEFORMASYONLARIN SONLU
ELEMENLAR YÖNTEMİ İLE İNCELENMESİ**

Halit DEĞER

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi İ. İskender SOYASLAN

BURDUR, 2020

ETİK KURALLARA UYGUNLUK BEYANI

Burdur Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliğinin ilgili hükümleri uyarınca Yüksek Lisans Tezi / Doktora Tezi olarak sunduğum **“Karasal Rüzgâr Türbinlerinin Zemininde Oluşabilecek Deformasyonların Sonlu Elemanlar Yöntemi ile İncelenmesi”** başlıklı bu tezin;

- Kendi çalışmam olduğunu,
- Sunduğum tüm sonuç, doküman, bilgi ve belgeleri bizzat ve bu tez çalışması kapsamında elde ettiğimi,
- Bu tez çalışmasıyla elde edilmeyen bütün bilgi ve yorumlara atıf yaptığımı ve bunları kaynaklar listesinde usulüne uygun olarak verdiğimi,
- Kullandığım verilerde değişiklik yapmadığımı,
- Tez çalışması ve yazımı sırasında patent ve telif haklarını ihlal edici bir davranışımın olmadığını,
- Bu tezin herhangi bir bölümünü bu üniversite veya diğer bir üniversitede başka bir tez çalışması içinde sunmadığımı,
- Bu tezin planlanmasından yazımına kadar bütün safhalarda bilimsel etik kurallarına uygun olarak davrandığımı,

bildirir, aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul edeceğimi beyan ederim.

21 / 08 / 2020

(İmza)

Halit DEĞER

TEŞEKKÜR

Bu araştırma için beni yönlendiren, karşılaştığım zorlukları bilgi ve tecrübesi ile aşmamda yardımcı olan değerli danışman hocam Dr. Öğr. Üyesi İ. İskender SOYASLAN'a teşekkürlerimi sunarım.

Araştırmalarım sırasında yardımlarını gördüğüm bu alanda çalışan meslektaşlarım ve çalışma arkadaşlarıma teşekkür ederim.

Zorlu ve sıkıntılı araştırma sürecinde beni her anlamda destekleyen eşime, aileme ve kızım Defne'ye anlayışları için sonsuz sevgi ve saygılarımı sunarım.

Ağustos 2020

Halit DEĞER

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
TEŞEKKÜR	i
İÇİNDEKİLER	ii
ŞEKİL DİZİNİ.....	iii
ÇİZELGE DİZİNİ	v
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	vi
ÖZET	vii
SUMMARY	viii
1. GİRİŞ	1
1.1. Önceki Çalışmalar.....	2
2. GENEL BİLGİLER	7
2.1. Rüzgar Kavramı	7
2.1.1. Rüzgardan Enerji Üretimi	7
2.1.2. Rüzgar Türbini	8
2.1.3. Dünyada ve Ülkemizde Rüzgar Enerjisi	11
2.2. Rüzgar Türbini Temelleri	13
2.2.1. Yüzeysel Temeller	14
2.2.2. Derin Temeller	15
2.3. Zeminlerin Taşıma Gücü	15
3. MATERYAL VE YÖNTEM.....	18
3.1. Sonlu Elemanlar Yöntemi.....	18
3.2. Plaxis Programı.....	21
3.2.1. Program Sürümleri ve Ek Paketleri.....	22
3.2.2. Program Özelliklerinin Değerlendirilmesi	23
3.3. Senaryoların Oluşturulması	27
3.3.1. Senaryo 1.....	30
3.3.2. Senaryo 2.....	36
3.3.3. Senaryo 3.....	37
3.3.4. Senaryo 4.....	40
4. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA	42
4.1. Senaryo 1 Analiz Sonuçları	42
4.2. Senaryo 2 Analiz Sonuçları	44
4.3. Senaryo 3 Analiz Sonuçları	46
4.4. Senaryo 4 Analiz Sonuçları	48
4.5. Analiz Sonuçlarının Karşılaştırılması	51
5. SONUÇ	52
KAYNAKLAR	54
ÖZGEÇMİŞ	Hata! Yer işareti tanımlanmamış.

ŞEKİL DİZİNİ

	Sayfa
Şekil 2.1. Rüzgar Türbini Sınıflandırılması	8
Şekil 2.2. Yatay eksenli rüzgar türbini yapı bileşenleri	9
Şekil 2.3. Rotorun kule üzerinde konumlandırılması.....	10
Şekil 2.4. Ülkelerin 2019 yılı rüzgâr enerjisi üretim oranları	11
Şekil 2.5. Avrupa’da 2008-2018 yılları arasında toplam enerji üretim kapasitesi.....	11
Şekil 2.6. Türkiye’de rüzgar enerji santrallerinin kümülatif kurulumu	12
Şekil 2.7. Türkiye’de rüzgardan elektrik üretiminin toplam üretimdeki payı.....	13
Şekil 2.8. Tipik karasal rüzgar türbini yüzeysel temelleri.....	14
Şekil 2.9. Kazıklı bir türbin temeli	15
Şekil 2.10. Temelin göçme durumu ve zemin hareketi.....	16
Şekil 2.11. Niigata Depremi 1964	16
Şekil 2.12. Almanya’da aşırı rüzgar sebebiyle devrilen bir rüzgar türbini	17
Şekil 3.1. Bir dairenin 8 dilime bölünerek çevresinin hesaplanması	19
Şekil 3.2. (a) 1 boyutlu çizgisel eleman, (b) 2 boyutlu düzlemsel eleman, (c) 3 boyutlu katı eleman.....	20
Şekil 3.3. Temel ölçüleri ve üstten genel görünümü.....	28
Şekil 3.4. Senaryo 1 temel ölçüleri	30
Şekil 3.5. Senaryo 1 genel proje özellikleri.....	31
Şekil 3.6. Senaryo 1 zemin parametrelerinin tanımlanması.....	31
Şekil 3.7. Senaryo 1 temel malzemesinin parametreleri	32
Şekil 3.8. Senaryo 1 modelleme aşaması	33
Şekil 3.9. Senaryo 1 ağ yapısı oluşturma işlemi başlangıcı	34
Şekil 3.10. Senaryo 1 ağ oluşturma işlemi sonrası görüntü	34
Şekil 3.11. Senaryo 1 analiz aşamalarının belirlenmesi.....	35
Şekil 3.12. Senaryo 1 yüklerin temel üstündeki konumları	35
Şekil 3.13. Senaryo 2 temel ölçüleri.....	36
Şekil 3.14. Temel ve zemininin modelleme sonrası genel görünümü.....	36
Şekil 3.15. Senaryo 2 genel ağ yapısı.....	37
Şekil 3.16. Senaryo 3 temel ölçüleri.....	38
Şekil 3.17. Senaryo 3 temel modelleme görüntüsü	39
Şekil 3.18. Senaryo 3 temel ve zeminin ağ yapısı görüntüsü.....	39

Şekil 3.19. Senaryo 4 temel ölçüleri.....	40
Şekil 3.20. Senaryo 4 temel modelleme görüntüsü	40
Şekil 3.21. Senaryo 4 ağ işlemi yapıldıktan sonra yapı zemini.....	41
Şekil 4.1. Senaryo 1 deformasyon durumu genel görünümü	42
Şekil 4.2. Senaryo 1 analiz sonrası deformasyon görünümü	43
Şekil 4.3. Senaryo 1 temel sağ alt köşesinde oluşan toplam deformasyon	43
Şekil 4.4. Senaryo 1 temel alt kısmında ölçülen deformasyonlar	44
Şekil 4.5. Senaryo 2 analiz sonrası deformasyon görünümü	44
Şekil 4.6. Senaryo 2 deformasyon durumu genel görünümü	45
Şekil 4.7. Senaryo 2 temel sağ alt köşesinde oluşan toplam deformasyon	45
Şekil 4.8. Senaryo 2 temel alt kısmında ölçümlenen deformasyon bilgileri.....	46
Şekil 4.9. Senaryo 3 temel ve zeminde oluşan yer değiştirme miktarları	47
Şekil 4.10. Senaryo 3 temel sağ alt köşesinde oluşan toplam deformasyon	47
Şekil 4.11. Senaryo 3 temel alt kısmında ölçümlen deformasyon bilgileri.....	48
Şekil 4.12. Senaryo 4 temelin deformasyona uğramış hali	49
Şekil 4.13. Senaryo 4 temel ve zeminde oluşan yer değiştirme miktarları	49
Şekil 4.14. Senaryo 4 temel sağ alt köşesinde oluşan toplam deformasyon	50
Şekil 4.15. Senaryo 4 temel alt kısmında ölçülen deformasyon bilgileri.....	50

ÇİZELGE DİZİNİ

	Sayfa
Tablo 2.1. Nümerik yöntem ve analitik yöntem ile hesaplama	19
Tablo 3.1. Analizlerde kullanılacak zeminin özellikleri	29
Tablo 3.2. Analizlerde kullanılacak betonun özellikleri	29
Tablo 3.3. Türbinden kaynaklanan yük değerleri	29
Tablo 4.1. Kare radye temelin 2 ve 3 boyutlu analiz sonuçları	51
Tablo 4.2. Dairesel radye temelin 2 ve 3 boyutlu analiz sonuçları	51
Tablo 4.3. Temellerin 2 ve 3 boyutlu analiz farkları	51

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

c	: Kohezyon
ETKB	: Enerji ve Tabi Kaynaklar Bakanlığı,
E_c	: Beton elastisite modülü
E_s	: Zemin elastisite modülü
GWEC	: Dünya Rüzgar Enerjisi Kurulu
MGM	: Meteoroloji Genel Müdürlüğü
TUREB	: Türkiye Rüzgar Enerjisi Birliği
WindEurope	: Avrupa Rüzgar Enerjisi Birliği
γ_c	: Beton kuru birim hacim ağırlığı
γ_s	: Zemin kuru birim hacim ağırlığı
ψ	: Dilatasyon açısı
ϕ	: İçsel sürtünme açısı
ν	: Poisson oranı

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

Karasal Rüzgâr Türbinlerinin Zeminde Oluşabilecek Deformasyonların Sonlu Elemanlar Yöntemi ile İncelenmesi

Halit DEĞER

Burdur Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi İskender SOYASLAN

Ağustos, 2020

Son yıllarda ülkemizde rüzgar enerjisi alanında yapılan yatırımlar, gerekli yasal düzenlemelerin yapılmasıyla birlikte artmıştır. Kurulum maliyetleri yüksek olan bu yatırımların, işletme ömrü boyunca zarar görmemesi için temelin ve yapı zemininin dikkatlice incelenmesi önemlidir. Günümüzde zemin-temel etkileşimleri analiz edilirken bilgisayar paket programlarından faydalanılmaktadır. Sonlu elemanlar yöntemiyle analiz yapan paket programları, analitik ve deneysel çözümlemelere göre daha hızlı ve ekonomik bir şekilde sonuç verdiği için araştırmacı ve sektör çalışanları tarafından sıklıkla tercih edilmektedir. Bu nedenle, analiz sonucu elde edilen değerlerin gerçeği ne kadar iyi yansıttığının bilinmesi, bu alanda çalışan kişilerde oluşacak öngörü açısından önemlidir. Sonlu elemanlar yöntemiyle zemin deformasyon analizlerinin yapıldığı bilgisayar paket programların iki boyutlu ve üç boyutlu analizlerinde farklı sonuçlar elde edilebilmektedir. Bu çalışmada; karasal rüzgar türbinlerinin zeminde oluşabilecek deformasyonların iki boyutlu ve üç boyutlu analizleri bilgisayar programı kullanılarak yapılmıştır. Kare ve dairesel şekildeki yüzeysel temellerin, iki boyutlu ve üç boyutlu analiz sonuçları karşılaştırılmıştır. Kare temelin iki boyutlu analizinde oluşan deformasyon değerlerinin, üç boyutlu analize göre %60 daha fazla olduğu görülmüştür. Bu durum üç boyutlu programın, iki boyutlu programa göre daha detaylı ve gerçekçi bir analiz yapması ile açıklanabilir. Çalışmanın diğer karşılaştırması ise üç boyutta modellenmesi mümkün olan fakat iki boyutlu çözümlemelerde dönüşüm işlemi yapılmasını gerektiren dairesel radye temel olmuştur. Dairesel temelin iki boyutta modellenirken eşdeğer alan metoduyla dönüştürülerek çözümlenmesi gerekmiştir. Bu durumda üç boyutlu programın deformasyon sonuçları iki boyutlu programa göre %5 daha fazla çıkmıştır. Bu durumun, deneysel olarak araştırılması ve üzerine çalışılması gereken bir konu olduğu sonucuna varılmıştır.

Anahtar Kelimeler: rüzgar türbini, sonlu elemanlar, oturma, zemin deformasyonu

SUMMARY

M. Sc. Thesis

**Onshore Wind Turbines
Investigation with Finite Element Method**

Halit DEĞER

**Burdur Mehmet Akif Ersoy University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Civil Engineering Department**

Supervisor: Assist. Prof. Dr. İskender SOYASLAN

August, 2020

The investments made in our country in the field of wind energy has increased along with the necessary regulations. It is important to carefully examine the foundation and the building ground so that these investments with high installation costs are not damaged during the operational life. Today, computer package programs are used when analyzing ground-foundation interactions. Package programs that perform analysis with the finite element method are frequently preferred by researchers and sector employees because they give results faster and more economically than analytical and experimental analysis. For this reason, it is important to know how well the values obtained as a result of the analysis reflect the reality in terms of foresight that will occur in people working in this field. Different results can be obtained in the two-dimensional and three-dimensional analysis of the computer package programs in which soil deformation analysis is performed with the finite element method. In this study; two-dimensional and three-dimensional analysis of deformations that may occur on the ground of terrestrial wind turbines were made using a computer program. Two-dimensional and three-dimensional analysis results of the shallow foundations in square and circular shapes were compared. It was seen that the deformation values formed in the two-dimensional analysis of the square foundation were 60% higher than the three-dimensional analysis. This situation can be explained by the fact that the three-dimensional program makes a more detailed and realistic analysis than the two-dimensional program. Another comparison of the study is the circular raft basis, which can be modeled in three dimensions, but requires transformation in two-dimensional analysis. While the circular foundation is modeled in two dimensions, it must be solved by transforming it with the equivalent area method. In this case, the deformation results of the three-dimensional program were 5% more than the two-dimensional program. It was concluded that this situation is a subject that should be investigated experimentally.

Keywords: wind turbine, finite elements, settlement, soil deformation

1. GİRİŞ

Ülkemizde gerekli yasal düzenlemelerin yapılması ile son yıllarda rüzgâr enerji santrallerine yönelik bir talep artışı yaşanmaktadır. Türkiye gibi gelişmekte olan bir ülkenin enerji bakımından %70'leri aşan bir oranda dışa bağımlı olması da bu gelişmeleri tetiklemektedir. Yenilenebilir ve çevreci bir kaynak olan rüzgâr enerjisi bu bakımdan ülkemiz için büyük önem arz etmektedir. Buna rağmen rüzgâr enerji santrallerinin kurulum maliyetleri yüksektir. Bu maliyetlerin en önemli kısmını ise temeller üzerinde yükselmekte olan kule ve buna bağlı enerji üretim ekipmanları oluşturmaktadır. Bu nedenle rüzgâr enerjisi yatırımlarının olası bir zarara uğramaması için üstyapı kadar temel ve altındaki yapı zemininin de incelenmesi gerekmektedir. Bu bağlamda kısa ve uzun süreçte zemin ortamında oluşabilecek durumların ayrıntılı olarak tetkik edilmesi önemlidir.

Küresel ısınmanın artmasıyla birlikte rüzgâr enerjisine yönelik çalışmalar ve yatırımlar son yıllarda hızlı bir artış göstermiştir. Deprem kuşağında yer alan ülkemizde, maliyetli bir yatırım olan rüzgâr enerji türbinlerinin geoteknik çözümlemelerinde, ülkemizde ve dünyada yaygın kullanılan bir sonlu elemanlar analizi programının farklı versiyonlarında oluşabilecek durumların gözlenmesi önemlidir.

Geoteknik ülkemizde önemi tam olarak anlaşılamamış, yönetmelikler de dahi kendine yeni yer bulabilmiş inşaat mühendisliği çalışma alanlarından birisidir. Her yapının kendine özgü olan yapı zemininin anlaşılması ve yorumlanması zor bir süreçtir. Literatür kısmında bu alanla ilgili yapılan yerli çalışmaların büyük bir kısmının güncel olduğu görülmektedir. Bu alanda yerli kaynak oluşturulması ve bu doğrultuda yetiştirilmiş insan gücünün varlığı, ülkemiz açısından önemli bir gerekliliktir.

Türkiye üç tarafı denizlerle çevrili bir ülke olması nedeniyle rüzgar enerjisi potansiyeli yüksektir. Hesaplanan rüzgar enerjisi potansiyelinin büyük çoğunluğu Ege, Doğu Akdeniz ve Marmara bölgelerinde bulunmaktadır (URL-2, 2017). Rüzgar açısından verimli olan bölgelerde her zaman iyi zemin koşullarını sağlamak mümkün olmayabilir. Bunun yanında Ege, Doğu Akdeniz ve Marmara bölgeleri başta olmak üzere ülkemizin tamamı deprem açısından risk barındırmaktadır. Bu nedenle sağlam zemini olmayan ve deprem açısından sıkıntılı bu bölgelere yapılacak bu özel yapıların temelleri dikkatle incelenmelidir.

Bu çalışmada; ülkemizde kurulmuş birçok rüzgar enerji santralinde de kullanılan modelde bir rüzgâr türbini için yüzeysel temeller oluşturulmuştur. Oluşturulan yüzeysel temellerin boyutları ve şekli değiştirilerek üstyapıdan gelen ve ortam kaynaklı statik yükler, önceden tanımlanmış bir zemin profiline aktarılıp, zeminde oluşan deformasyon ve gerilmeler iki boyutlu ve üç boyutlu sonlu elemanlar programı aracılığıyla değerlendirilmiştir. İki farklı çözümleme yapan programın farklı temel tiplerinin zemininde oluşan deformasyon dağılımları karşılaştırılmıştır.

Çalışmanın ilk bölümünde tezin amacı ve bu alanda daha önce yapılmış araştırmalar sunulmuştur. Genel bilgiler kısmında ise rüzgâr santralleri kavramı, dünya ve ülkemizin rüzgâr ve rüzgâr türbini istatistikleri verilmiştir. Daha sonra zemin ile ilgili taşıma gücü ve oturma hesaplamaları gibi konular üzerinde durulmuştur. Temel boyutları, zemin türü ve yükleme koşulları gibi parametrelerin oturma miktarı ve taşıma gücüne olabilecek etkileri incelenmiştir. Oluşturulan senaryolar üzerinden analizler yapılmış, aynı temellerin farklı programlar aracılığıyla yapılan çözümlemelerinde ortaya çıkabilecek farklılıklar karşılaştırılarak değerlendirilmiştir.

1.1. Önceki Çalışmalar

Keskin (2009), donatısız, geogrid donatılı ve lastik parçacıklarıyla karıştırılmış (donatısız-donatılı) kumlu şevlere oturan şerit temellerin taşıma kapasitelerini ve oturma davranışlarını, laboratuvar model deneyleri ile araştırmıştır. Model deneylerde, donatısız durumda temelin sev tepesine olan uzaklığı, sev açısı, sıklık derecesi ve temel boyutu parametrelerinin taşıma kapasitesi davranışına olan etkisini incelemiştir. Donatılı durumda ise, geogrid donatı tabakalarının yerleşim düzeni, miktarı ve boyutuyla ilgili parametrelerin taşıma kapasitesi ile oturma davranışına etkisi ve davranışın, sev açısı, sıklık derecesi, temel boyutu ve farklı donatı tiplerinden nasıl etkilendiği araştırılmıştır. Deneysel çalışmanın son kısmında, atık lastik parçacıkları kum karışımı şevlere oturan şerit temellerin taşıma kapasitesi donatısız ve donatılı durumlar için model deneyler ile incelenmiş ve en büyük taşıma kapasitesi değerini veren karışım oranı belirlenmiştir. Çalışmada, donatısız ve donatılı kum şevlere oturan temellerin, PLAXIS bilgisayar yazılımı kullanılarak, 2 boyutlu ve düzlem-şekil değiştirme koşullarında sonlu elemanlar yöntemi ile sayısal çözümü yapılmıştır. Elde edilen deneysel ve teorik sonuçlar karşılaştırılarak temel mühendisliği uygulamalarında kullanılmak üzere tasarım parametreleri önerilmiştir.

Svensson (2010), kazıklı ve radye temellerin rüzgar türbinlerinde kullanımını sonlu elemanlar analizi programı ile iki boyutlu olarak incelemiştir. Farklı zeminlere oturan radye

temel, uç kazık ve yüzen kazıkları modelleyerek üç vaka üzerinden yaptığı çalışmalarda elde ettiği sonuçları karşılaştırmıştır. Radye temelin en hesaplı ve uygulaması en kolay temel tipi olduğunu belirtmiştir. Tasarımının el ile yapılabilmesine rağmen temelde dönme hareketini oluşturan yüklerin yüksek bir eksantisite durumu ortaya çıkarmasından ötürü nümerik analiz ile hesaplamaların gerçekleştirilmesinin daha uygun olacağını belirtmiştir. Uç kazıklı temelerde kazıkların hareketsiz olduğu varsayıldığı için ortaya çıkan oturma değerleri çok küçük seviyelerde olmuştur. Yüzen kazıklı temel çeşidi için iki boyutlu ortamda modellemenin mümkün olmamasından ötürü değerlerin üç boyutlu analiz ile karşılaştırılması gerekliliğinden ve bu şekilde daha güvenli bir tasarımın ortaya çıkacağından bahsetmiştir. Çıkan genel sonuçlara bakarak iki boyutlu ortamda modellemenin hesaplamalar olumsuz bir etki oluşturabileceğinden ve üç boyutlu ortamda gerçekleştirilecek analiz sonuçlarını görmenin ilginç olabileceğinden bahsetmiştir.

Kaçar (2011) çalışmasında proje sürecindeki iş kalemlerine göre yatırım tutarları ve yatırımın toplam tutardaki payını listelemiştir. Türbinin ve üzerinde yükseldiği temellerin toplam yatırım tutarındaki payı %84,2 gibi yüksek bir orana tekabül etmektedir.

Kutlu (2011), yaptığı çalışmasında deniz üstü rüzgar türbinlerinin temel tasarımını incelemiştir. Deniz üstü rüzgar türbini geotekniği ile ilgili prensiplere değinmiş ve Türkiye’de gerçekleştirilebilecek tekil ve grup kazık temele sahip rüzgar türbinlerinin SAP 2000 programı ile sayısal analizi ve temel tasarımı yapmıştır. Deprem durumunu da göze alarak yaptığı çalışma ile Avrupa’da kullanılan kesitlerin benzer boyutlarda Türkiye’de de kullanılabileceğini belirtmiştir. Ayrıca deniz üstü türbin temellerinde görülebilen oyulma ve yorulma etkilerinden bahsetmiştir.

Erdem vd. (2015); Bozcaada’da, her biri 2 MW kapasitesi olan 7 adet rüzgâr türbini bulunan bir rüzgâr santrali kurulması projesinin ekonomik analizini yapmıştır. Yapılan çalışmada inşaat ve türbin maliyetleri toplam maliyet üzerinde yekün tutmaktadır ve belirtilen kapasitede çalışılması durumunda yatırımın 11,6 yıl içerisinde geri dönüş yapabileceği belirtilmiştir.

Turgut (2015), çalışmasında 120 metre kule yüksekliğine sahip bir rüzgar türbinini prefabrike olarak tasarlamıştır. Yaptığı çalışmanın sadece fizibiliteye konu olabilecek düzeyde bir ön tasarım niteliği taşıdığını belirtmiştir. Çözümlerde ve analizlerde MATLAB, Sap2000 ve Excel programlarından faydalanmıştır. Tasarım sonrası maliyet hesabı yapmış ve sektör firmaları ile görüşerek konu ile ilgili uzman görüşleri almıştır. Bu doğrultuda bir rüzgar türbini yatırımı için kW başına 1196,62 Amerikan Doları bir yatırım maliyeti ve 5 yıllık bir amortisman süresinin olduğunu belirlemiştir.

Shretsha (2015), çalışmasında rüzgar türbini kulelerinin enerji üretim kapasitelerinin türbin yüksekliği ile bağlantılı olduğunu ve yıllar içinde kule yüksekliklerinin arttığını, bunun temel üzerindeki yükleri ve temel büyüklüklerini etkilediğini aktarmıştır. Group ve Plaxis yazılımları ile radye ve kazıklı temel kullanımı arasındaki farkları ve tasarım sonuçlarını aktarmıştır. Yaptığı çalışma ile kazıklı radye temellerin analitik çözümlemesinin gerçek durumu birebir yansıtmadığı, sayısal ve simülasyon tabanlı çözümlemelerin daha doğru sonuçlar verdiğini belirtmiştir. Kazık yerleşimi ile ilgili birtakım bilgiler ortaya koymuştur. Değişen rüzgar yönü sebebiyle sekizgen şekilli kazık temel kullanımının yükleri karşılamak için daha akıllıca olacağına değinmiştir.

Zhussupbekov vd. (2016), Kazakistan Ereymentau’da yapılması planlanan bir rüzgar enerji santralinin verilerini Scad ve Plaxis 2D programlarını kullanarak analiz etmiştir. Türbinler için 11m yarıçaplı bir temel seçilmiştir. Seçilen temelde 8,74 mm farklı oturma bulunmuş, oluşan yer değiştirmenin kabul edilebilir değerler aralığında olduğu ve kazık temel uygulamasının gerekmediği ortaya koyulmuştur.

Genç (2017) çalışmasında rüzgar enerji santrali kurulum maliyetlerinin toplamda önemli bir yer tuttuğunu, kule ve temel inşaatlarında yapılacak olan hataların geri dönüşünün zor olacağından bahsetmiştir. Özellikle teknolojinin gelişmesi ile kule yükseklikleri ve kanat çaplarının 120 metrelere ulaşabiliyor olması, ve kanatların dinamik yükleme-boşaltma karakteristiği, kule ve temel yapılarını, yapı mühendisliği açısından kritik ve özel yapılar sınıfına sokmaktadır. Türbin temelleri, üst yapıdan kaynaklanan hareketli ve ölü yükleri yapı zeminine emniyetli bir şekilde aktarması gereken özel yapılardır. Türbin temelleri olağan bir yapı temeli olmayıp, kulenin işletme ömrü (ortalama 25 yıl) boyunca birçok kez dış zorlama ve yorulma etkilerine maruz kalacak temellerdir. Rüzgar türbini temellerine etkiyen yüklerin dinamik karakteristikte olması, eksantrisme durumu ve ortalama 25 yıl boyunca temelden beklenen üst düzey yorulma dayanımının sağlanması, bu yapıyı standart temel yapılarından ayırmaktadır. Temelin dizaynında veya inşa aşamasında yapılabilecek hatalar, işletme aşamasında giderilmesi oldukça maliyetli yapısal çatlak ve dayanım yetersizliklerine neden olacak, daha ileri durumlarda ise göçme düzeyinde stabilite kaybı ile karşılaşılabilecektir.

Karakaş (2017), yaptığı çalışmada yapı ile zemin arası etkileşimin yapısal davranış üzerindeki etkilerini incelemek amacıyla elastik zemin üzerinde konumlanmış bir soğutma kulesi ve 1,5 MW’lık bir rüzgar türbinini statik ve deprem yükleri altında analiz etmiştir. Yapı zemin etkileşiminin daha düzgün bir şekilde yorumlanabilmesi için farklı zemin modellerinden bahsettiği çalışmasında Geliştirilmiş Vlasov zemin modeliyle diğer iki parametrelili zemin modellerine göre daha gerçekçi sonuçlar alınabileceğini belirtmiştir.

Sap2000 programının açık uygulama programlama arayüzünden kule tipi yapılar gibi analizi karmaşık yapıların yapısal analizleri haricinde yapı-zemin etkileşimlerinin de bu program arayüzüne eklenmesiyle yapılabileceğini aktarmıştır.

Cengizhan (2018), yaptığı çalışmada farklı zemin profilleri üzerinde laboratuvar deneyleri gerçekleştirmiştir. Deneyler sonucunda elde ettiği verileri kullanarak farklı temel türleri için klasik yöntemler ile taşıma gücü ve oturma hesabı yapmıştır. Daha sonra aynı verileri Plaxis 3D programı yardımıyla sayısal olarak tekrar etmiş ve sonuçlar arasında %1'den daha az fark bulunduğunu ortaya koymuştur. Sonlu elemanlar yöntemini kullanan bilgisayar programının bu tür geoteknik hesaplamalarda kullanılabilir olduğunu ve çok daha hızlı sonuçlar verdiğini belirtmiştir.

Turhan (2018), yaptığı çalışmasında yüksek yapılar sınıfında sayılan betonarme siloları üç farklı zemin ve iki farklı yüzeysel temel tipi için modelleyerek, ortam yüklerini hesaplayıp analizler gerçekleştirmiştir. Aynı temel tiplerinin farklı zemin türlerindeki gerilme – deformasyon dağılımlarını incelemiştir. Kum ve kilden oluşan tabakalı zeminlerde ve kaya zeminlerde minimum 1,5 cm, maksimum 7,5 cm dikey deformasyon değerlerine ulaştığı görülmüştür. Sadece kil zeminde ise deformasyon değerleri 30 cm'ye kadar ulaşmıştır. Ayrıca silo yapılarında ring temellerin altında oluşan deformasyonların daha düşük olduğu ve ekonomik açıdan da bu temel türünün uygulanmasının değerlendirilebileceğini belirtmiştir.

Bayazıt (2019), çalışmasında rüzgar ve rüzgar enerji santralleri ile ilgili genel bilgiler vermiş, rüzgar türbini temellerini tanıtmıştır. Bir rüzgar türbini temelini geoteknik tasarımının nasıl yapılacağını ve yerli-yabancı standartlarda verilen tasarım yükleme durumlarını aktarmıştır. Numerik analiz (Plaxis2D) ve analitik çözümleme ile üç farklı sıklıktaki kum zemin üzerine yapılmış türbin temelini davranışını incelemiştir. Gevşek kum zeminde analitik ve numerik çözümleme ile 5,2 cm toplam yer değiştirme bulmuştur. Orta sıkı kum zeminde numerik yöntem ile 2,5 cm; analitik çözümleme ile 2,8 cm yer değiştirme değerlerine ulaşmıştır. Yine sıkı kumlar üzerine yaptığı numerik analizde 1,6 cm; analitik analizde 1,8 cm deformasyon değerlerini bulmuştur. Yaptığı çözümlemelerde elde ettiği sonuçları birbiri ile kıyaslayıp, aralarında maliyet durumunu etkileyecek büyük farklar bulunmadığını belirtmiştir. Ayrıca gevşek kum zemin üzerinde herhangi bir iyileştirme yapmadan kurulacak türbinin oturma miktarı açısından güvenli görülmediğini; ön tasarımda oturma miktarının, taşıma gücü ve dönme rijitliklerinden önce kontrol edilmesini tavsiye etmiştir.

Qazizada (2019), çalışmasında Kahramanmaraş ili Andırın ilçesinde yapılan rüzgar enerji santralinin zemin etüt parametrelerini kullanarak türbin temelleri ile ilgili farklı kazık çapları, aralıkları ve boyları ile iyileştirilmesi durumundaki statik ve pesudostatik sismik davranışı Plaxis ve SAP2000 programları yardımıyla analiz etmiştir. Yaptığı çalışmada kazık çapı ve boyunun artmasının oturma miktarını azalttığını göstermiştir. Kazık boyunun 10 m ile 20 m olması arasındaki deplasman oranının 2,20, 20 m ile 30 m olması durumunda deplasman oranının 1,83 olduğunu tespit etmiştir. Bu durum ise kazık boylarının artması ile oturmalarda ki azalmanın lineer olmadığını göstermiştir. Statik yükler altında güvenli sonuçlar almasına rağmen, sismik yüklemelerde güvensiz sonuçlar aldığını belirtmiştir.



2. GENEL BİLGİLER

2.1. Rüzgar Kavramı

Havanın yer değiştirmesiyle oluşan esinti, yel şeklinde tanımlanan rüzgâr; daha detaylı bir tanımlama ile yatay ya da yataya yakın yönde yer değiştiren bir hava kütesinin hareketi olarak adlandırılmaktadır. Dünyamızı çevreleyen atmosferde oluşan basınç farkları nedeniyle yer değiştiren hava akımları rüzgarı meydana getirir. Basınç farkları ne kadar büyürse rüzgar hızı da o kadar artmaktadır. Rüzgar hızı ölçümü anemometre adı verilen cihaz ile yapılmaktadır.

Rüzgarlar bölgelere ve meydana geliş nedenlerine göre farklı isimler alır. Atmosferdeki genel hava dolaşımına bağlı olarak meydana gelen sürekli rüzgarlar, mevsimsel farklılıklar nedeniyle atmosfer basıncında değişiklik olmasından meydana gelen muson rüzgârları ve bulundukları bölgeye göre adlandırılan birçok rüzgar türü (meltem, fön, bora vb.) bulunmaktadır (MGM, 2020).

2.1.1. Rüzgardan Enerji Üretimi

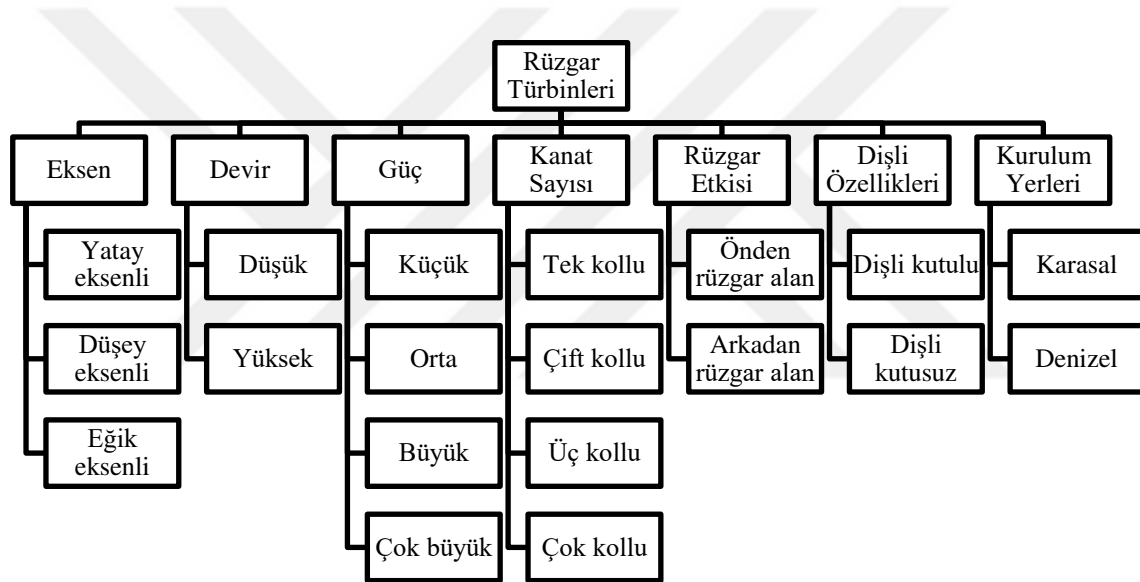
Rüzgar olarak tanımladığımız hava hareketleri potansiyelinde bir enerji barındırmaktadır. Tarihçesine baktığımızda insanların yaklaşık 4500 yıldır sulama, tahılları öğütme gibi birtakım farklı işlerde bu enerjiyi kullandıklarını görüyoruz. Günümüzde ise teknolojik gelişmelere bağlı olarak rüzgar kaynaklı hareket enerjisi elektrik enerjisine çevrilmektedir. Bu yenilenebilir ve yeşil enerji kaynağının verimli bir şekilde kullanılması durumunda, enerji üretimi ile çevreye verilen tahribat çok aza indirgenecektir. Birincil enerji kaynağımız olan fosil yakıtların tükenmeye başladığı bu dönemde; oluşacak enerji açlığı rüzgar enerjisi ve diğer yeşil enerjilerin akıllı kullanımı ile karşılanabilecektir.

Dünyanın sahip olduğu rüzgar enerjisi potansiyelinin, 50° kuzey ve güney enlemleri arasında kalan bölgede toplam 26.000 TWh/yıl olduğu tahmin edilmektedir. Bu miktarın ortalama 9.000 TWh/yıl kapasitenin ekonomik açıdan değerlendirilebilecek durumda olduğu düşünülmektedir. Bu alanda yapılan çalışmalar, Dünya karasal alanları toplamının %27'sinin yıllık ortalama 5.1 m/s'den yüksek rüzgar hızının etkisi altında kaldığını ortaya koymaktadır. Bu durum 8 MW/km² üretim kapasitesi ile toplam 240.000 GW kurulu güce sahip olunabileceğini ortaya koymaktadır (MGM, 2020).

2.1.2. Rüzgar Türbini

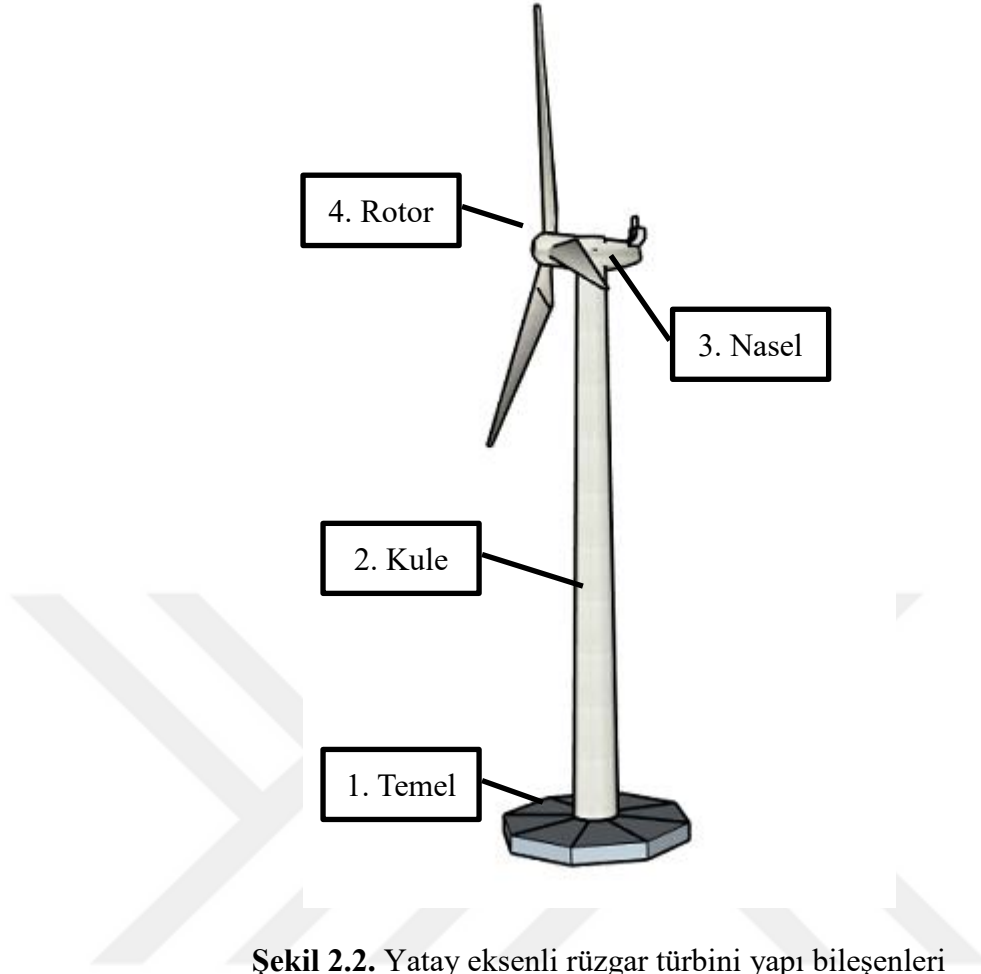
Rüzgâr türbinleri, rüzgar enerji santrallerinin üretim açısından ana yapı elemanlarıdır. Sahip oldukları kanatlar ile hareket halindeki havadan kinetik enerjiyi yakalayıp mekanik enerjiye çevirirler (ETKB, 2020). Kanat mili ucundaki mıknatıslar ve jeneratör sayesinde bu mekanik hareket alternatif akım oluşturur ve elektrik üretilmiş olur. Orta gerilimli bu akım aküler yardımıyla toplanarak transformatörlere iletilir. Transformatörler vasıtasıyla orta gerilim yüksek gerilime dönüştürülüp şebekeye iletilir (Turgut, 2015).

Türbinler Şekil 2.1’ den de görüleceği üzere sahip oldukları birtakım özelliklerden, kurulum yerlerine kadar birçok farklı yönden sınıflandırmaya tabi tutulabilirler.



Şekil 2.1. Rüzgar Türbini Sınıflandırılması (Elibüyük ve Üçgül, 2014)

Günümüzde inşa edilen modern rüzgar türbinlerine baktığımızda yatay eksenli, üç kolu, önden rüzgar alan türbinler verimlilikleri nedeniyle tercih edilmektedir. Bu çalışmada, ülkemizde daha önce farklı projelerde kullanılmış, çelik bir kuleye sahip, üç kanatlı ve karasal bir rüzgar türbini incelenecektir (Şekil 2.2).



Şekil 2.2. Yatay eksenli rüzgar türbini yapı bileşenleri

Yatay eksenli bir rüzgar türbini yapısı temel altyapısı üzerinde yükselen kule, nasel, hub ve kanat gibi bileşenlerden oluşmaktadır. Şekil 2.2’de görülen bu bileşenlere bakacak olursak;

1) Temel

Rüzgar türbini temelleri üstyapı kaynaklı yükleri zemine aktaran ve yüksek miktarlarda dönme, devrilme, kesme etkilerine maruz kalan yapı elemanıdır. Karasal türbin temelleri betonarme olarak imal edilirler. Ticari türbinlerde tercih edilen silindirik çelik kulelerin temel ile bağlantısı temel içinde kalan bir ankraj sepeti ile sağlanır. Temel tipi olarak yüzeysel ve derin temeller veya ikisinin de bir arada kullanıldığı kombine temeller kullanılmaktadır

2) Kule

Kule türbin kanatları ile naselin ağırlıklarını taşıırken, üzerine etkiyen rüzgar yükleri ve pervanelerin dönmesinden kaynaklanan yükleri de güvenli bir şekilde karşılamalı ve bu yükleri aktarmalıdır. Günümüzde kule yapımında çelik malzeme tercih edilmektedir. Çelik

plaka sacların işlenmesiyle ortaya çıkan kule gövde parçaları birbirine kaynaklanarak segmentler oluşturulur. Oluşturulan segmentler flanş aracılığıyla birbirlerine bağlanır. Kuleler betonarme, hibrit veya çelik makas şekilde de yapılabilir (Kanbur, 2014).

3) Nasel

Nasel, rüzgarın kanatları çevirmesi ile elde edilen mekanik enerjinin elektrik enerjisine dönüştürüldüğü bölümdür. Nasel rüzgar yönüne dönmeyi sağlamak için kuleye rulmanlar aracılığıyla bağlanır. İşletme sınırını aşan şiddetli rüzgarlarda veya bakım zamanlarında sistemin hasar görmemesi için kanatları kilitleyen bir fren mekanizmasına da sahiptir. Nasel yüksekte yer alan bir makine dairesi gibi düşünülebilir. Sahip olduğu yüzey alanı ve kütle ile kule tasarımında göz önünde bulundurulmalıdır (Svensson, 2010).

4) Rotor

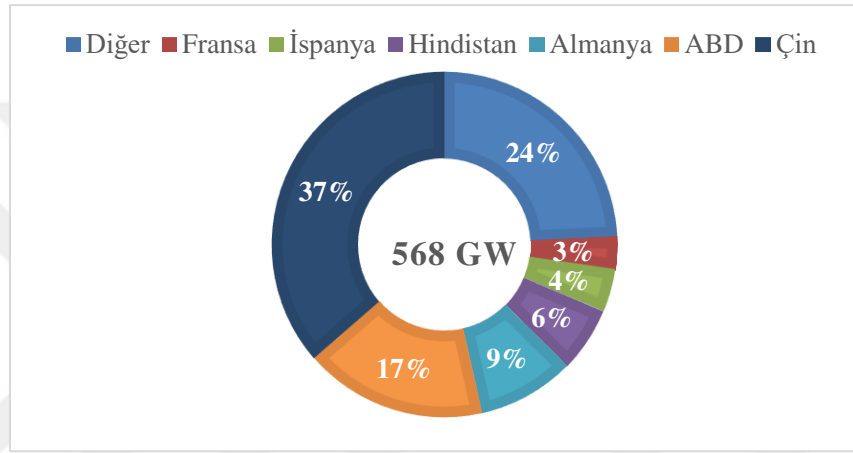
Nasel ile aynı yükseklikte konumlanan rotor; kanatlar ve bunları bir arada tutan göbeğin tamamına verilen yapıdır. Kanatlar fiberglas ve karbon fiber gibi kompozit malzemelerden yapılmaktadır. Kanatlar yapı ve çalışma prensibi itibarıyla uçak kanatlarına benzer (Svensson, 2010).



Şekil 2.3. Rotorun kule üzerinde konumlandırılması (URL-1, 2015)

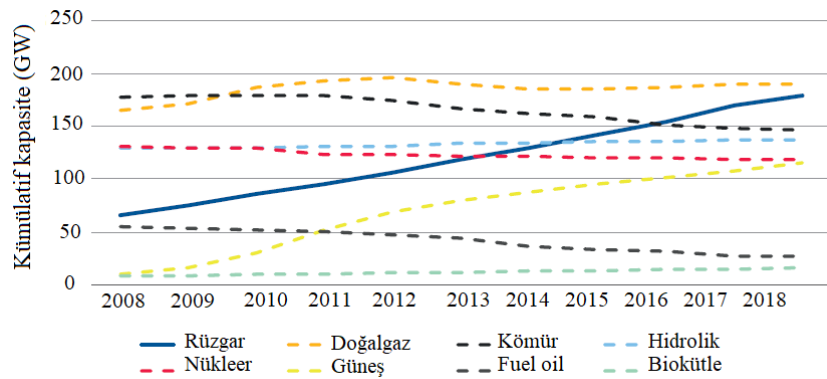
2.1.3. Dünyada ve Ülkemizde Rüzgar Enerjisi

Rüzgâr enerjisi sonsuz ve temiz bir enerji kaynağı olarak Dünyamızın son yüzyılda artan enerji ihtiyacını karşılamak için iyi bir alternatif oluşturmaktadır. Nisan 2019 yılında yayınlanan Dünya Rüzgar Raporuna göre (WindEurope, 2019) ; Dünya’da rüzgârdan enerji üretim kapasitelerine (Şekil 2.4) baktığımızda; gelişmiş olan ülkelerin özellikle Çin ve Amerika Birleşik Devletleri başta olmak üzere bu alanda çok fazla yatırım yaptıkları görülmektedir. Bu iki ülkenin üretim oranı dünyada üretilen rüzgâr enerjisinin yarısından fazlasını oluşturmaktadır.



Şekil 2.4. Ülkelerin 2019 yılı rüzgâr enerjisi üretim oranları (GWEC, 2019)

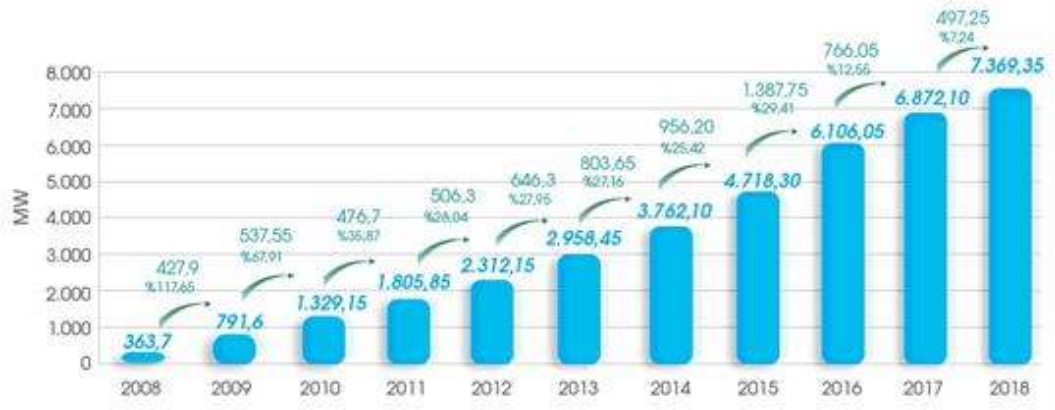
Avrupa’da da son 10 yılda rüzgâr ile üretilen enerji miktarı diğer enerji üretim yöntemlerine göre payını giderek artırmaktadır (Şekil 2.5).



Şekil 2.5. Avrupa’da 2008-2018 yılları arasında toplam enerji üretim kapasitesi (WindEurope, 2019)

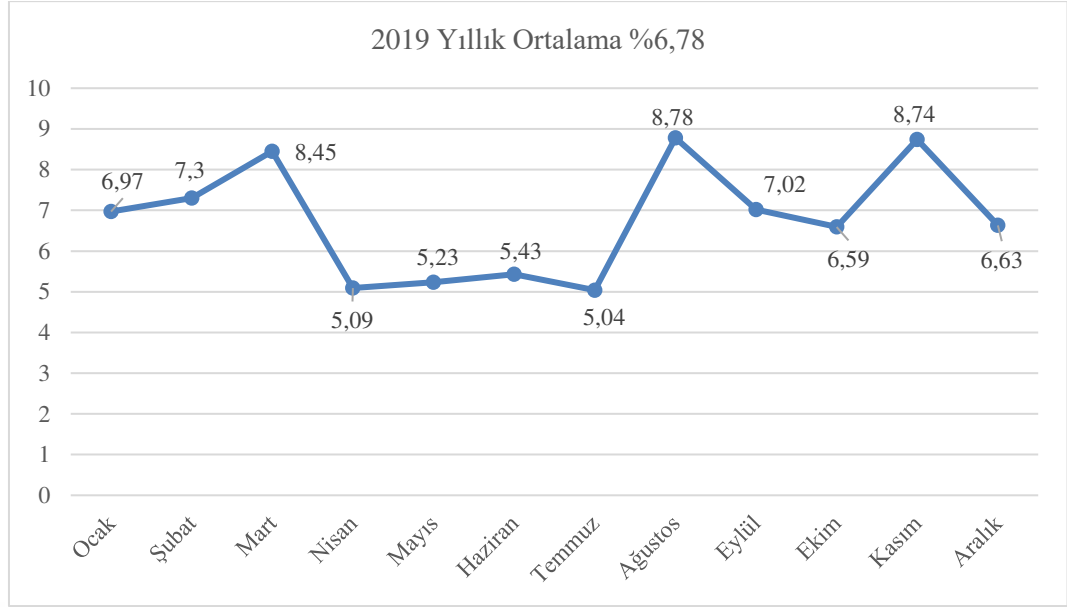
Ülkemizde, rüzgar enerjisi yatırımı ilk olarak 1998 yılında Çeşme’de gerçekleştirilmiştir (8.7 MW). Elektrik İşleri Etüt İdaresi tarafından yapılan çalışmalarda, rüzgâr enerjisi açısından Bandırma, Antakya, Kumköy, Mardin, Sinop, Gökçeada, Çorlu ve Çanakkale zengin bölgeler olarak tespit edilmiştir. Ayrıca, Bandırma, Bozcaada, Çeşme, Gökçeada, Çanakkale, Karadeniz Ereğlisi, Florya ve Siverek gibi yöresel rüzgâr potansiyeli belirleme çalışmaları da yapılmıştır (MGM, 2020).

Özellikle 2005 yılında yürürlüğe giren Yenilenebilir Enerji Kanunu ile birlikte Türkiye’de rüzgâr enerjisi santrallerinin kurulumu her yıl artmaktadır. Son iki yıl dünya ekonomisindeki olumsuzluklar bu sektörü etkilemiş olsa bile ülkemizdeki santrallerin sayısı ve üretim kapasitesi Türkiye Rüzgar Enerjisi Birliği’nin (TUREB) 2019 Ocak ayında yayınladığı raporda görüldüğü gibi (Şekil 2.6) artmaya devam etmektedir.



Şekil 2.6. Türkiye’de rüzgar enerji santrallerinin kümülatif kurulumu (TUREB, 2019)

Yine aynı rapora göre ülkemizde 2018 yılı için rüzgâr santrallerinin elektrik üretimindeki payı farklı aylar için ve yıllık bazda toplam olarak Şekil 2.7’de görülmektedir.



Şekil 2.7. Türkiye’de rüzgardan elektrik üretiminin toplam üretimdeki payı (TUREB, 2019)

2.2. Rüzgar Türbini Temelleri

Karasal alanda yapılan yapılarımızın temelleri genel itibariyle yüzeysel ve derin temeller olmak üzere iki ana gruba ayrılmaktadır. Yüzeysel temeller yapıya etkiyen yükleri yüzeye yakın zeminlere ileten temellerdir. Bunlar, tekil temelleri ve radye temelleri kapsar. Bir tekil temel, uygulanan yapısal yükleri bir kolon veya taşıyıcı duvar altında yeteri kadar geniş bir zemin alanı üzerine yaymak üzere yapılan genişletmedir. Her kolon ve her taşıyıcı duvarın tipik olarak kendi tekil temeli bulunmaktadır. Orta ve iyi sayılabilecek zemin koşullarında, küçük ve orta boyutlardaki yapılar altında tekil temeller tercih edilebilir. Bu tür temellerin imalatı kolay ve ekonomik açıdan uygundur (Celep ve Kumbasar, 2005).

Üst yapı yüklerinin fazlaca etkidiği yumuşak veya yumuşağa yakın kohezyonlu zeminlerde ve gevşek veya gevşeğe yakın kohezyonsuz zeminlerde yüzeysel temeller yetersiz kalabilir. Bu tür ağır yapılarda zemin ıslahı veya derin temel yapımı tercih edilebilir. Bu tür temeller yapı yüklerini, derindeki daha sağlam zemin tabakalarına aktaracak ya da yan yüzlerindeki sürtünme gerilmeleri ile yapıyı taşıyabilecek şekilde tasarlanabilir (Uzuner, 2016).

Rüzgar türbini temelleri yüksek sayılabilecek üst yapı yüklerini uygun bir şekilde zemine iletmelidir. Türbinin yapılacağı bölgenin zemin türüne göre yüzeysel veya kazıklı temel türleri tercih edilebilir. Betondan imal edilen bu temellerin yerinde dökme veya

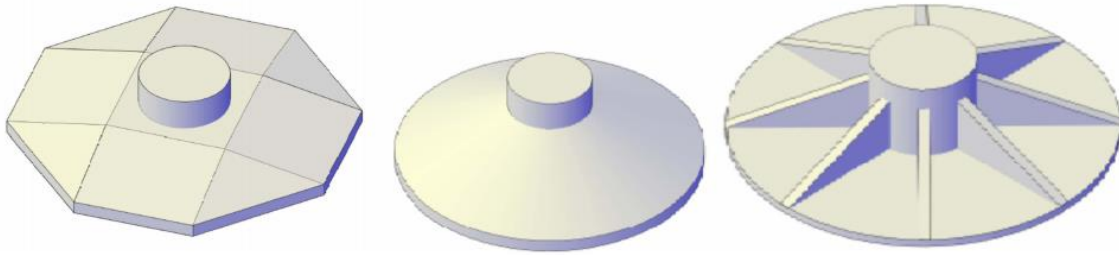
prekast şeklinde olanları mevcuttur. Temeller inşa edilirken kule ile bağlantılarını sağlayacak arabirim elemanları temel içerisinde yer alır.

2.2.1. Yüzeysel Temeller

Rüzgar türbinlerinde kullanılabilecek yüzeysel temeller türbin kulesinin dar kesiti üzerinden gelen yükleri zeminde büyük bir alana yayan plaka şeklindeki temellerdir. Temel alanı ne kadar geniş olursa, zemindeki basınç durumu o kadar azalır. Böylece izin verilen sınır durumlar içinde kalınmış olunur.

Dairesel, kare veya sekizgen şekilde inşa edilen temeller genellikle 15-20 m çaplarındadır. Orta kısımda kulenin yerleştirilmesi için silindirik bir kaide yer almaktadır. Kule ile temelin bağlantısı için bırakılan merkezi kaide genişlikleri ortalama 4,5-5,5 m çaplarındadır.

Temeller orta kısımlarda 2-3 m ve kenarlarda 1-2 m kalınlıklarında olan konik şeklinde inşa edilmektedir. Aşağıda yer alan Şekil 2.8’de yüzeysel temellerin tipik görünüşleri sunulmuştur.



Şekil 2.8. Tipik karasal rüzgar türbini yüzeysel temelleri (Ntambakwa, 2018)

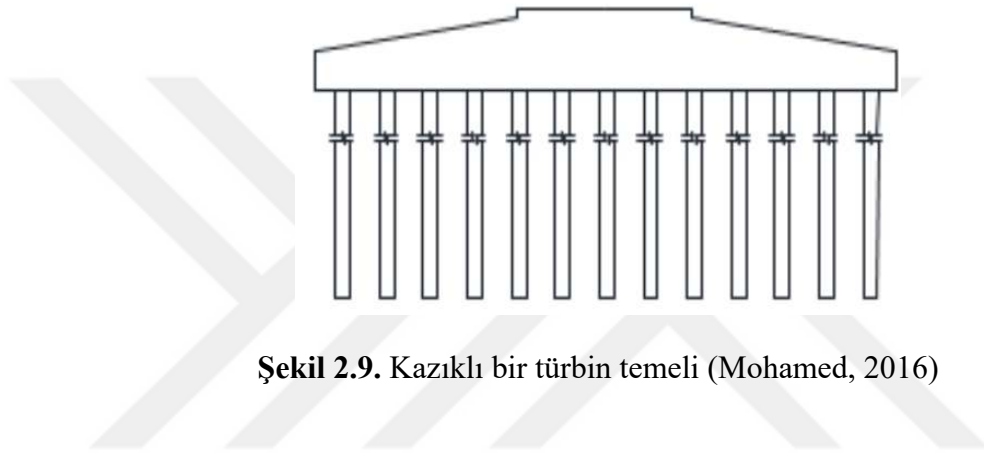
Türbinlerin yapılacağı zeminde sığ derinlikte sağlam bir kayaç tabakasına rastlanırsa kaya ankrajlı temellerde oluşturulabilir. Bu durum boyutların dolayısıyla maliyetlerin azalmasına katkıda bulunabilir.

Temellerin betonlanması genel itibarıyla sahada döküm şeklinde yapılır. Yapılacakları konumun beton imalatına veya nakline uygun olmaması halinde prekast temeller tercih edilebilir. Prekast temellerin sahada hızlı konumlandırılması ve beton kalitesinin çok daha yüksek olması avantaj sağlayabilir (Ntambakwa, 2018).

2.2.2. Derin Temeller

Sığ zemin tabakalarının yeterli taşıma gücünü sağlayamadığı veya zamana bağlı oturmaların tahmin edildiği zemin türlerinde derin temeller tercih edilir (Şekil 2.9). Yapıdan gelen yükler kazıklar vasıtasıyla zemine aktarılır. Kazıklı temeller iki şekilde görev yapabilir;

- Kazıklar sağlam zemin tabakasına yükü iletebilir.
- Kazıklar, sürtünme yoluyla zeminde aşağıya hareketi engelleyerek yük taşıyabilir.



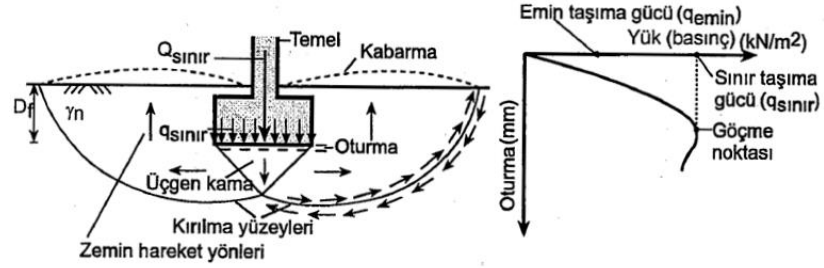
Şekil 2.9. Kazıklı bir türbin temeli (Mohamed, 2016)

2.3. Zeminlerin Taşıma Gücü

İnşaat mühendisliği yapıları kendi mevcut yüklerini ve dış ortam kaynaklı yükleri belli sınırlar içinde taşımak ve bu yapı yüklerini doğrudan veya temeller vasıtasıyla yapı altında yer alan zemin ortamına aktarmak zorundadır. Temeller vasıtasıyla yapılan aktarma durumunda temel zemini ile temel arasında ayrılmaz bir karşılıklı etkileşim söz konusudur.

Zeminin yeterli mukavemete sahip olması durumunda iletilen bu yükleri emniyetle taşıyabilmesi söz konusudur. Yapı yüklerinin zemine taşıttırılmadığı durumlarda ise zemin ıslah edilmeli veya temel tipi değiştirilerek sağlam zemine ulaşmaya çalışılmalıdır (Uzuner, 2016).

Temelden zemine aktarılan yükler altında, zeminde meydana gelebilecek oturmaların müsaade edilebilir sınırlar içerisinde kalması gerekir. Bunun için her yapı temelini oturacağı zemin koşullarının belirlenmesi ve elde edilen sonuçların üst yapı göz önünde bulundurularak temel tasarımlarının yapılması önemlidir.



Şekil 2.10. Temelin göçme durumu ve zemin hareketi (Uzuner, 2016)

Temeller inşa edilecekleri zeminin şartlarına büyük ölçüde bağlıdır. Bazı zeminler sert, bazıları yumuşaktır. Sert zeminler ıslanınca yumuşayabilir, bazıları şişer ve yüzeysel temelleri kaldırabilir, bazıları göçer ve temel içine batar. İyi temel tasarımı tüm olumsuz koşul ve değişimlerde kendisinden beklenen fonksiyonu yerine getirecek şekilde yapılan tasarımıdır. Temel tasarımındaki hatalar beklenmedik bir anda ortaya çıkabilir ve büyük zararlara yol açabilir. Eğer yapı afetlere rağmen servis ömrü boyunca ayakta durabiliyorsa o zaman başarılı bir tasarım yapıldığı düşünülebilir (Çinicioğlu, 2005)

Gevşek kumlu zeminler sismik yüklere maruz kaldığı zaman, özellikle de suya doymun olduklarında özel problemler ortaya çıkar. En etkin problem, aşırı boşluk suyu basınçlarının gelişmesinden dolayı kayma dayanımının ani kaybı olan zemin sıvılaşmasıdır (Coduto, 2011). Dayanımdaki bu kayıp Şekil 2.11’de gösterildiği gibi taşıma gücü yenilmesine neden olabilir. Gevşek kumlar ile bir diğer problem, suya doymun ve sıvılaşmaya eğilimli olmasalar bile, depremden kaynaklanan oturmadır. Bazı durumlarda bu gibi oturmalar çok büyük olabilir.



Şekil 2.11. Niigata Depremi 1964 (University of California, Steinbrugge Collection)

Niigata’da (Japonya) apartman bloklarının altındaki zemin 1964 depremi sırasında sıvılaşmış ve taşıma gücü yenilmelerine neden olmuştur. Yenilmelerin çok yavaş olarak geliştiği rapor edilmiştir. Yapılar çok sağlam ve rijit olduğundan, eğilmeye rağmen yıkılmamıştır. Bina sakinleri deprem sonrası binanın dış duvarından aşağı doğru yürümek suretiyle yapıyı terk etmiştir (Coduto, 2011).

Şekil 2.12’de görüldüğü üzere 1997 yılında Almanya Goldenstedt’ te yapılan (hub yüksekliği 70 m ve pervane çapı 41 m) 600 kW’lık bir rüzgar türbini kurulumundan 5 yıl sonra 27.10.2002’de aşırı rüzgar sebebiyle devrilmiştir.



Şekil 2.12. Almanya’da aşırı rüzgar sebebiyle devrilen bir rüzgar türbini

3. MATERYAL VE YÖNTEM

Geoteknik alanında karşılaşılabileceğimiz problemler iki veya üç boyutlu olabilir. Bazı durumlarda gerekli dönüşümleri gerçekleştirerek farklı boyutlarda çalışmak, hesaplama açısından kolaylıklar sağlayabilir. Özellikle oturma alanında bir boyutu diğer boyutuna göre çok büyük olan temellerde ve istinat duvarı gibi yapılarda, sistem iki boyutlu düşünülerek tek bir boyut ihmal edilebilir. Bu ihmal yapılacak işlemleri sadeleştirecek, sayısal hatalar azalacak ve dolayısıyla çözümleme için harcanacak zamanı kısaltacaktır. Fakat bazı yapılar için önemsenmese bile problem oluşturmayacak olan bu yaklaşım; yapının niteliği ve önem durumuna bağlı olarak bazı yapılarda ciddi sorunlar oluşturabilir. Özellikle yüksek miktarlarda ve dinamik yük alan rüzgar türbini kuleleri gibi yapılarda iki boyutlu çözümleme yaklaşımı ile üç boyutlu çözümlemeler arasında oluşabilecek farkların incelenmesi önemlidir.

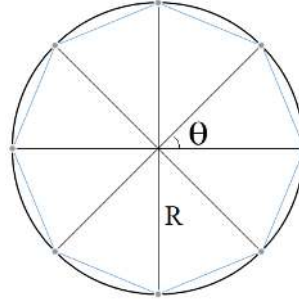
Çalışma konusu olan rüzgar türbini altında yer alan yüzeysel temeller ve yapı zemininin Plaxis 2D ve Plaxis 3D programlarıyla iki boyutlu ve üç boyutlu olarak farklı şekillerde analiz edilecektir. Bu program sonlu elemanlar yöntemini kullanarak kompleks yapıdaki problemleri parçalara ayırarak çözmektedir. Programın adında geçtiği üzere iki ve üç boyutlu ortamda çözümleme yapan iki farklı versiyonu bulunmaktadır.

3.1. Sonlu Elemanlar Yöntemi

Mühendislik problemlerinin çözümlemesinde farklı matematiksel yöntemler kullanılır. Bunlardan ilki analitik hesaplardır. Bu hesaplar çoğu zaman işin temeli ve mantığını oluşturur. Analitik hesaplarda bazen kabuller yapmak ve kararlar almak gerekir. Bu durum gerçek hayattaki tüm sistemleri ve durumları çözmeye yeterli olmayabilir. İkincisi deneysel metotlardır. Genellikle boyutlandırılmış küçük modeller üzerinden analizler yapılarak gerçek hayatta karşılaşılan durumların çözümlemesi yapılmaya çalışılır. Fakat her zaman deney koşullarının birebir gerçek hayat koşullarını sağlaması mümkün olmayabilir. Matematiksel yöntemlerin üçüncüsü ise nümerik hesaplar yapmaktır. Bu konuda günümüzde en çok kullanılan yöntem FEM (Finite Element Method) adı verilen sonlu elemanlar yöntemidir. Bu yöntem yardımıyla iyi bir modelleme yapıldığında gerçeğe çok yakın sonuçların hızlı bir şekilde alınması mümkündür.

Sonlu elemanlar yöntemi birçok mühendislik dalında karşılaşılabilecek problemlerin çözümünde kullanabileceğimiz yaygın sayısal hesaplama yöntemlerindendir. Yöntem

komplike yapıların, hesaplamaların yapılabileceği daha küçük yapılara dönüştürülerek modellenmesi şeklinde işlemektedir. Bir örnek vermek gerekirse; bir dairenin çevresini formül kullanmadan hesaplamak için daire kenarı olan eğriyi, boyunu hesaplayabildiğimiz düz doğrular şeklinde çizerek bunları toplayabiliriz. Bu yöntemle belli doğrulukta eğrinin boyunu hesaplamış oluruz. Hesaplama kullandığımız çizgilerin boyu küçüldükçe, çizgilerin sayısı artar ve gerçek çevreye yaklaşmış oluruz (URL-3, 2019).



Şekil 3.1. Bir dairenin 8 dilime bölünerek çevresinin hesaplanması

Daireyi yukarıda yer alan Şekil 3.1’de ki gibi 8 dilime bölelim. Yarıçapımız 50 cm olursa dairenin çevresi sayısal hesaplama ile ve analitik olarak sonuçlar Tablo 3.1’de görüldüğü şekilde olacaktır. Aynı daire 36 dilime ayrıldığında hata oranı düşecektir.

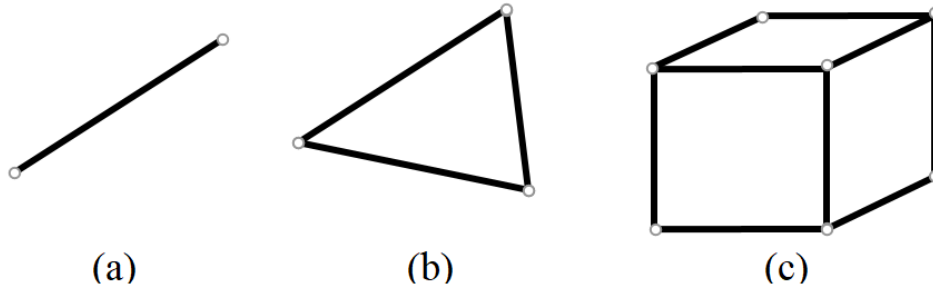
Tablo 3.1. Nümerik yöntem ve analitik yöntem ile hesaplama

Nümerik Yöntem (Sayısal tekrarlı hesaplama yöntemi)	Analitik Yöntem (Formülasyon)
<u>N=8 küçük kenar için</u> Tek kenar uzunluğu = $\frac{50 \cdot \sin(45^\circ)}{\sin(67,5^\circ)} = 38,268 \text{ cm}$ Toplam kenar uzunluğu = $38,268 * 8 = 306,144 \text{ cm}$ (% 2,55 hata) <u>N=36 küçük kenar için</u> Tek kenar uzunluğu = $\frac{50 \cdot \sin(10^\circ)}{\sin(85^\circ)} = 8,715 \text{ cm}$ Toplam kenar uzunluğu = $8,715 * 36 = 313,740 \text{ cm}$ (% 0,14 hata)	$S = 2\pi R = 2 * 3,14 * 50$ $= 314,159 \text{ cm}$

Sonlu elemanlar yönteminde yapılar, davranışı önceden belirlenmiş olan elemanlara bölünür. Daha sonra bu elemanlar node olarak isimlendirilen düğüm noktalarında birleştirilir. Böylece cebrik bir denklem takımı elde edilir. Gerilme analizi için bu denklemler düğüm noktalarındaki denge denklemleridir. Yapının durumuna bağlı olarak çok

fazla sayıda denklem elde edilebilir. Bu denklem takımlarının çözümlenmesi bilgisayar ile mümkün olmaktadır (Ergin, 2000).

Eleman tipi, parça şekline ve model tipine göre de farklı olabilir. Sonlu eleman modeli tek boyutlu (çizgi modeli), iki boyutlu (düzlemsel model) ve üç boyutlu (katı model) olabilir (Şekil 3.2). Modellemenin şekline göre eleman tipi atanır.



Şekil 3.2. (a) 1 boyutlu çizgisel eleman, (b) 2 boyutlu düzlemsel eleman, (c) 3 boyutlu katı eleman

Sonlu elemanlar yönteminin ana fikri, sürekli fonksiyonları bölgesel fonksiyonlar ile ifade etmektir. Bu, eleman içinde hesaplanması gereken değerlerin birleşim noktalarındaki değerlerinin kullanılıp interpolasyon edilmesi ile mümkün olmaktadır. Bu nedenle sonlu elemanlar metodunda bilinmeyen ve hesaplanması istenen değerler birleşim noktalarındaki değerlerdir. Bir varyasyonel prensip kullanılarak büyüklük alanının birleşim noktalarındaki değerleri için bir denklem takımı elde edilir. Bu denklem takımının matris formundaki gösterimi aşağıda gösterildiği şekildedir.

$$[K] \cdot [D] = [R] \quad (3.1)$$

Burada $[D]$ büyüklük alanının düğüm noktalarında bilinmeyen değerleri temsil eden vektör, $[R]$ bilinen yük vektörü ve $[K]$ ise bilinen sabitler matrisidir. Daha basit şekilde ele alacak olursak R sınır şartlarını (dış ortam kaynaklı yükler), K sistemin yapısını temsil eder (malzemenin fiziksel açıdan özellikleri). D ise aranan düğüm noktaları üzerindeki değerlerdir (kuvvet, gerilme benzeri). Bu durumda D matrisinin hesaplanabilmesi için sistemi temsil eden büyüklükler ve dış ortamdan kaynaklanan sınır şartlarının bilinmesi gerekmektedir (URL-3, 2019).

Sonlu elemanlar yöntemi başlangıçta yapı analizi yapmak amacı ile kullanılmıştır. İlk çalışmalar Hreinnikoff ve Mc Henry (1940) tarafından yapılan yarı analitik analiz metotlarıdır. Argyis ve Kelsey (1960) virtüel iş prensibini kullanarak direkt yaklaşım metodu geliştirmiştir. Turner vd. (1956) bir üçgen eleman içindeki rijitlik matrisini oluşturmuşlardır. Sonlu elemanlar terimi ilk olarak Clough'un (1960) yapmış olduğu çalışmasında dile getirilmiştir (Ergin, 2000).

1960'lı yılların başından itibaren araştırmacılar non-lineer problemler üzerine çalışmalar yürütmüştür. Sonlu elemanlar yöntemiyle stabilite analizi ilk kez Martin (1965) tarafından tartışılmıştır ve sonrasında statik problemlerin dışında dinamik problemlerin de sonlu elemanlar yöntemi ile analiz edilmesi incelenmeye çalışılmıştır. Sonlu elemanlar paket programlarının genel amaçlı kullanımı 1970'li yıllarda mümkün olmuş ve 1980'li yılların sonlarında sonlu elemanlar paket programları bugünkü hali ile mikro bilgisayarlarda kullanılmaya başlanmıştır (Ergin, 2000).

Sonlu elemanlar yöntemi, farklı sayısal analiz yöntemleri içerisinde bilgisayar yazılımı oluşturmaya yönelik daha müsait bir formüle sahiptir. Karmaşık sınır koşulları, non-lineer malzeme davranışı ve heterojen yapı malzemeleri gibi zor ve karmaşık problemlerin çözümünde, sistematik bir şekilde programlamaya uygun olması nedeniyle farklı mühendislik alanlarında problem çözmek için kullanılabilmektedir (Berilgen, 1996).

Sonlu elemanlar yöntemiyle gerçekleştirilen analizler sonucunda yapı zemini ve temellerde oluşan gerilme, yatay ve düşey yer değiştirme, boşluk suyu basınçları ve zemin suyu akışı gibi problemler hakkında yorum yapılabilmektedir. Zeminin gerilme-şekil değiştirme davranışı doğrusal olmadığından, geoteknik mühendisliği sonlu elemanlar analizinde uygun bir şekilde modellenmelidir. Bu nedenle, inşaat öncesi fiili duruma yakın olan ilk gerilme durumu, zeminin doğrusal olmayan gerilme ve dayanım özellikleri ve yükleme aşamalarındaki bekleme süreleri analiz öncesinde belirlenmelidir (Kılıç, 2000).

3.2. Plaxis Programı

PLAXIS, geoteknik mühendisliği içerisinde yer alan deformasyon, stabilite ve yeraltı suyu akışı analizleri için geliştirilmiş bir sonlu elemanlar programıdır. İlk olarak 1987 yılında Hollanda Delft Teknoloji Üniversitesi'nde geliştirilmeye başlanmıştır. Hollanda topraklarının yarısı deniz seviyesinin altında veya birkaç metre üstünde yer almaktadır. Ayrıca Avrupa'nın üç büyük nehrinin oluşturduğu delta ovalara sahip bir coğrafya üzerinde bulunuyor. Bu program ile Hollanda'nın sahip olduğu problemler zeminlerde geoteknik

açından çeşitli analizlerin yapılması amaçlanmıştır. Bu kapsamda 2 boyutlu bir sonlu elemanlar analizi gerçekleştirebilecek bir program geliştirilmeye çalışılmıştır.

1993 yılında PLAXİS adı ile bir şirket kurulmuş ve farklı geoteknik problemlere de hizmet edecek şekilde programın içeriği genişletilmiştir. 1998 yılında Windows işletim sistemi üzerinde hizmet verebilecek ilk program Plaxis 2D piyasaya sürülmüştür. 2001 yılında üç boyutlu sonlu eleman analizleri yapabilen 3D Tunnel programı ve 2004 yılında da 3D Foundation programları yayınlanmıştır. Fakat bu iki programa da geometrik sınırlamalar nedeniyle tam anlamıyla bir üçüncü boyut girişi yapılamıyordu. Kullanımı bu programlara göre çok daha kolay olan, geliştirilmiş bir arayüze sahip ve üç boyutlu modelleme yapma imkanı sunan sürüm ise 2010 yılında Plaxis 3D adıyla piyasaya sürülmüştür. 2018 itibarıyla Plaxis firması altyapı projelerinin planlanması, tasarımı ve bakımı için ABD merkezli bir yazılım firması olan Bentley Systems Incorporated' ın bir parçası olmuştur.

Bu program çözümülemesi uzun zaman gerektiren ve hataların yapılabileceği sonlu eleman çözümlemelerini pratik bir şekilde gerçekleştirmek üzerine kurgulanmıştır. Program kullanmayı bilen kimselerin elinde, problemleri hızlı ve kolay bir şekilde doğru sonuçlara ulaştırabilmektedir. Dünya çapında birçok mühendis tarafından kullanılmaktadır. Aynı zamanda programın geliştirme ekibi, programın bilimsel yeniliklere ayak uydurabilmesi ve yüksek teknik standartlarını koruyabilmesi için birçok farklı üniversiteden geniş bir araştırmacı kitlesi ile temas halinde çalışmalarını sürdürmektedir.

3.2.1. Program Sürümleri ve Ek Paketleri

PLAXIS 2D: Bu sürüm ile iki boyutlu düzlemde sonlu eleman ağları kullanmak mümkündür. Çok çeşitli geoteknik problemlere statik yapısal elastoplastik deformasyon analizi, gelişmiş zemin modelleri, kararlılık analizi, konsolidasyon, güncellenmiş ağ analizi ve kararlı durum yeraltı suyu akışı dahil olmak üzere çözüm üretilebilir.

PLAXIS 3D: Bilgisayar destekli çizim ile modellenmiş olan üç boyutlu nesnelerinin bir geoteknik bağlamda içe aktarılmasını ve daha fazla işlenmesini sağlayan tam 3D ön işlemcili bir geoteknik sonlu eleman programıdır. Program içeriğinde statik yapısal elastoplastik deformasyon analizi, gelişmiş zemin modelleri, kararlılık analizi, konsolidasyon, güvenlik analizi, güncellenmiş ağ analizi ve kararlı durum yeraltı suyu akışı dahil olmak üzere genişletilmiş bir paket olarak sunulur.

PLAXIS MoDeTo: PLAXIS MoDeTo, yanal yükleme koşullarında açık deniz rüzgar türbinleri için kazık temellerin analizi ve tasarımı için özelleşmiş bir yazılım

paketidir. PLAXIS MoDeTo, PISA araştırma projesinde tanımlandığı gibi, kural tabanlı tasarım yöntemi için bağımsız bir araç olarak ve sayısal tabanlı tasarım yöntemi için PLAXIS 3D ile bağlantılı olarak kullanılabilir. İkinci durumda, PLAXIS MoDeTo'nun tek boyutlu sonlu eleman çekirdeğinde kullanılan zemin reaksiyon eğrileri, PLAXIS 3D'de gerçekleştirilen bir dizi üç boyutlu sonlu eleman hesaplamasının sonuçlarından türetilir.

Dynamics: PLAXIS 2D ve PLAXIS 3D için oluşturulmuş bir ek modüldür. Bu modül, topraktaki titreşimleri ve bunların yakındaki yapılar üzerindeki etkilerini analiz etmek ve ayrıca geoteknik deprem analizi için kullanılabilir. Boşluk suyu basınçları analiz edilebilir. Sıvılaştırma, mevcut sıvılaştırma modellerinden (UBC3D-PLM veya PM4Sand) biri kullanılarak analiz edilebilir. Ayrıca kullanıcı tanımlı zemin modelleri mevcuttur. Kısa süreli (drenajsız) dinamik analizin yanı sıra, modül aşırı gözenek basınçlarının eşzamanlı konsolidasyonuna sahip dinamik analizleri de içerir.

PlaxFlow: PLAXIS 2D ve PLAXIS 3D için geliştirilmiş bir ek modüldür. Bu modül, tamamen birleştirilmiş akış deformasyon analizi, sabit ve geçici yeraltı suyu akışı analizi için kullanılabilir. Modül, gözenek basıncı, doygunluk ve geçirgenlik arasında bilinen "Van Genuchten" ilişkilerini kullanarak doymuş / doymamış yeraltı suyu akışı için gelişmiş modeller içerir. Doymamış zemin davranışı için Barcelona Basic modeli, kullanıcıların talebi üzerine bir zemin modeli olarak sunulmuştur.

Thermal: PLAXIS 2D için geliştirilmiş bir ek modüldür. Bu modül ile birleştirilmiş termo-mekanik analiz, kararlı durum ve geçici termal akışın analizi için kullanılabilir.

3.2.2. Program Özelliklerinin Değerlendirilmesi

PLAXIS, geoteknik mühendisliğinde karşılaşılan deformasyon, stabilite, dinamik ve yeraltı suyu akışı analizlerinin iki boyutlu veya üç boyutlu olarak gerçekleştirilebilmesi için tasarlanmış bir sonlu eleman paket programıdır.

Geoteknik problemlerin çözümünde, zeminin veya kayaların doğrusal olmayan, zamana bağlı ve anizotropik davranışlarının simülasyonu için gelişmiş yapısal modeller oluşturulmalıdır. Ayrıca zeminin heterojen bir malzeme olması, zemindeki gözenek basınçları ve doygunluk ile iş yapabilmek için özel yöntemler gereklidir.

Geoteknik problemlerde zeminin modellenmesi önemli bir konu olmasına rağmen, birçok proje, yapıların modellenmesini ve yapılar ile zemin arasındaki etkileşimi kapsamaktadır. PLAXIS, karmaşık geoteknik yapıların çeşitli yönlerini ele alabilecek şekilde özelleşmiş bir sonlu elemanlar paket programıdır.

Programın genel itibariyle kullanım adımları veya içeriğinde karşılaşılabileceğimiz seçenekler aşağıda gösterilen adımları içermektedir.

3.2.2.1. Model Geometrisinin Tanımlanması:

Zemin verilerinin, yapıların, inşaat aşamalarının, yüklerin ve sınır koşullarının girişi, geometrinin ayrıntılı bir modellemesine izin veren uygun CAD çizim aşamalarına dayanmaktadır. Geometri tanımlaması yapıldıktan sonra program tarafından sonlu eleman ağları kolayca üretilir. Model geometrisi tanımlaması yaparken, sondaj kuyularından, yüklerin girilmesine kadar geniş bir çalışma alanı aşağıda tanımlanmıştır.

Sondaj kuyuları: Zemin tabakalarının tanımlanması için zemine kullanıcı tarafından belirlenen aralıklarda ve yüksekliklerde sondaj kuyuları atanması ile mümkün olmaktadır. Bu kuyulara tanımlanan zemin verilerini program otomatik olarak enterpolasyon yöntemiyle çalışma alanındaki tüm zemine uygun şekilde yaymaktadır. Böylece kuyu sayısı artırılarak tabakalar arası geçişler gerçeğe daha yakın şekilde tanımlanabilmektedir. Zemin yüzeyini daha iyi karakterize etmek için sondaj deliklerinde üç boyutlu program vasıtasıyla üçgen düzensiz ağ yüzeyleri atanabilmektedir.

Plaklar: Bu seçenek duvarlar, tünel kaplamaları gibi davranışları elastik veya doğrusal olmayan elastoplastik yapı elemanlarını modellemek için kullanılabilir. Bu kabuk elemanlar zemindeki ince yapıları eğilme ve eksenel rijitliği ile modellemek için kullanılabilir.

Kirişler: Kiriş elemanları, önemli bir eğilme rijitliğine sahip ince tek boyutlu nesneleri modellemek için kullanılabilir. Davranışları elastik veya elastoplastik olabilir. Tipik uygulamalar duvarlar, kirişler ve kolonlardır.

Geogridler: Geogridler (veya geotekstiller) genellikle pratikte takviyeli setlerin veya zemin istinat yapılarının inşasında kullanılır. Tercih edeceğimiz analiz yöntemine bağlı olarak 6 düğümlü zemin elemanlarında geogridler 3 düğüm, 15 düğümlü zemin elemanında ise 5 düğümlü olarak program vasıtasıyla atanırlar. Eksenel rijitliği kullanıcı tarafından tanımlanabilir (Keskin, 2009).

Gömülü kirişler ve Zemin Ankrajları: Bu özel yapı elemanları zemin ya da kaya tabakasına yapılacak olan, bulonlama işinin etkileşimini anlatmak için tercih edilirler. Bu yapı elemanlarının elastoplastik davrandığı varsayılır. Öngermeli ankraj modellemesi yapılabilir.

Tüneller: Kullanıcıya, tünellerin sahip olduğu kavisli sınırların modellenebilmesi için yaylar ve çizgiler kullanarak dairesel ve dairesel olmayan tüneller oluşturmaları

kolaylaştıran bir seçenek sunar. Tünel konturunda yükler veya kaya cıvataları gibi ek özellikler tanımlanabilir. Tünel yapımının çeşitli yöntemlerinin bir sonucu olarak ortaya çıkan deformasyonları analiz etmek için çeşitli yöntemler uygulanabilir (örneğin, dekonfinasyon yöntemi).

Yükler: Program, modele uygulanabilecek çeşitli yük türlerini (noktasal yükler, yayılı yükler, momentler gibi) bu seçenek ile sağlamaktadır. Bu yüklerin her biri birbirinden bağımsız olarak inşaat aşamalarının farklı zamanlarında aktif ya da pasif hale getirilebilir. Seçilecek olan analiz yöntemine bağlı olarak devamlı ya da belirlenen aralıklarla modele etki edebilirler.

3.2.2.2. Malzeme Özelliklerinin Tanımlanması:

Mohr-Coulomb modeli: Bu model elastoplastik bir zemin modelidir ve en pratik durumlarda bilinen kohezyon, elastisite modülü, poisson oranı, içsel sürtünme açısı ve dilastasyon açısı gibi zemin parametrelerine dayanmaktadır. Mohr-Coulomb modeli, gerçekçi taşıma kapasiteleri ve temel yüklerinin çöküşünün yanı sıra zeminin başarısız davranışının baskın bir rol oynadığı diğer uygulamaları hesaplamak için kullanılabilecek kısa süreli bir analiz yöntemidir. Bir 'phi-c azaltma' yaklaşımı kullanarak güvenlik faktörünü hesaplamak için de kullanılabilir.

Hoek-Brown modeli: Bu model, sağlam ve yıpranmış kaya oluşumlarının sertliğini ve mukavemetini tanımlamak için kullanılabilir. Beş temel zemin parametresi ile tanımlama gerçekleştirilir.

Gelişmiş zemin modelleri: Bu modellerden birisi olan sertleşen zemin modeli ile zemin üzerinde basınç artışı oldukça zemin rijitliği de artacaktır. Mohr-Coulomb ve Hoek-Brown modellerine göre daha gerçekçi sonuçlar verebilen bir zemin modeli olarak sunulmuştur.

Kumlu zeminlerin dinamik uygulamalarındaki sıvılaşma davranışını değerlendirmek için UBC3D-PLM ve PM4Sand modelleri mevcuttur. Beton ve püskürtme beton yapıların zamana bağlı mukavemetini ve sertliğini, sıkıştırma ve gerilimde gerinim sertleşmesini-yumuşatmanın yanı sıra sünme ve büzülmeyi simüle etmek için de tanımlı beton modeli programda bulunmaktadır. Bu zemin modelleri haricinde tamamen kullanıcı tarafından tanımlanabilecek zemin modeli de sistemde akademik çalışma yapmak isteyenlerin kullanımına sunulmuştur.

Zemin testleri: Zemin testi seçeneği, seçilen zemin malzemesi modelinin davranışını verilen malzeme parametreleriyle kontrol etmek için uygun bir prosedürdür.

Model parametrelerini girdikten sonra, kullanıcı birkaç standart zemin laboratuvarı testini hızlı bir şekilde simüle edebilir ve sonuçları gerçek laboratuvar testlerinden elde edilen sonuçlarla karşılaştırabilir. SoilTest özelliği, model sonuçları ile gerçek zemin laboratuvarı testlerinin sonuçları arasında en iyi uyumu sağlayacak şekilde model parametrelerini optimize etmek için kullanılabilir.

Zemin Suyu: Su basıncı seviyelerinin bir kombinasyonu veya su basınçlarının doğrudan etkimesi temelinde, zemin suyu basıncı dağılımları oluşturulabilir. Program ile yeraltı suyu akışı hesaplaması yapılabilir. Tanımlanan zemin türünün drenajlı ya da drenajsız olması program tarafından yapılan hesaplamalarda göz önünde bulundurulur.

Ağ oluşturma işlemi: Program içerisinde çalışma alanının tamamında veya seçilen bir kısmında, iyileştirme seçenekleriyle sonlu eleman ağlarının otomatik olarak oluşturulması mümkündür. İki boyutlu olan programda zemindeki deformasyon ve gerilmeleri modellemek için ikinci dereceden altı düğümlü ve dördüncü dereceden on beş düğümlü üçgen elemanlar mevcuttur. Üç boyutlu programda ise kuadratik tetrehedral on düğümlü elemanlar bulunmaktadır.

3.2.2.3. Analiz Aşaması:

Kademeli yapı: Eleman kümelerini etkinleştirerek veya devre dışı bırakarak, yüklerin uygulanmasını, su basıncı dağılımlarını değiştirerek, vb. İnşaat ve kazı süreçlerinin gerçekçi bir simülasyonunu sağlanmaya çalışılabilir. Bu prosedür, ortaya çıkan gerilmelerin ve yer değiştirmelerin gerçekçi bir şekilde değerlendirilmesini sağlar.

Konsolidasyon analizi: Konsolidasyon analizi, çeşitli toprak katmanlarına geçirgenlik katsayılarının girilmesini gerektirir. Geometri sınırları konsolidasyon için açık veya kapalı olarak ayarlanabilir. Otomatik zaman adımlama prosedürleri, analizi sağlam ve kullanımı kolay hale getirir.

Güvenlik analizi: Güvenlik faktörü genellikle arıza yükünün çalışma yüküne oranı olarak tanımlanır. Bu tanım temel yapılar için uygun olabilir, ancak kağıt yığın duvarlar veya setler için uygun olmayabilir. Bu son yapı tipi için, mevcut kesme kuvvetinin denge için gereken minimum kesme kuvvetine oranı olan bir güvenlik faktörünün toprak mekaniği tanımını kullanmak daha uygundur.

Dinamik analiz: Dinamik modül zemindeki titreşimlerin ve güçlü hareketlerin analizini sağlar. Deprem yükleme koşulları altında yer tepki analizi, toprak-yapı etkileşimi ve deformasyon / stabilite analizi için özel sınır koşulları ve son işlem tesisleri mevcuttur.

Güncellenmiş Lagrange analizi: Bu seçeneği kullanarak, sonlu elemanlar ağı hesaplama sırasında sürekli olarak güncellenir. Bazı durumlarda, geleneksel bir küçük şekil değiştirme analizi, önemli bir geometri değişikliği gösterebilir.

Ön izleme seçeneği: Grafik 2B veya 3B ortamda model ve hesaplama ayarlarını kontrol etmek için kullanışlı bir ön izleme seçeneği mevcuttur. Hesaplamalar oldukça zaman alabileceğinden, hesaplama işlemine başlamadan önce modeli dikkatlice kontrol etmek önemlidir.

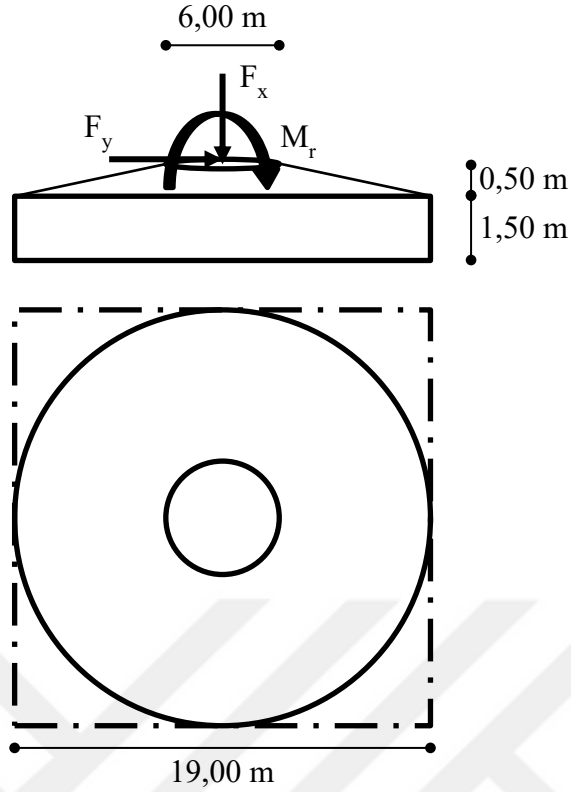
Sonuçların sunumu: Yer değiştirme, gerilme, gerinim ve yapısal kuvvetlerin kesin değerleri çıktı tablolarından elde edilebilir. Grafikler ve tablolar çıktı aygıtlarına veya başka bir yazılıma aktarmak için Windows panosuna gönderilebilir.

Gerilme yolları: Yük-deplasman eğrilerini, gerilme yollarını ve gerilme-şekil değiştirme diyagramlarını çizmek için özel bir yöntem mevcuttur. Özellikle stres yollarının görselleştirilmesi, yerel toprak davranışı hakkında değerli bir fikir verir ve hesaplamaların sonuçlarının ayrıntılı bir analizini sağlar.

3.3. Senaryoların Oluşturulması

Analizlerde kullanılacak rüzgar türbini, ülkemizde daha önce farklı bölgelerde yapılmış ve kullanılmakta olan bir rüzgar türbini modelidir. Karşılıklı gizlilik sözleşmeleri nedeniyle konum ve şirket adı verilmeden birtakım bilgiler tez içeriğine dahil edilmiştir. Türbin 85 m kule yüksekliğine ve 2.75MW elektrik üretim kapasitesine sahip karasal bir rüzgar türbinidir. Bu türbinin temel tasarımı yapılırken üretici firmanın verdiği teknik bilgiler ve türbinin kurulacağı sahada yapılan jeolojik etütler göz önünde bulundurulmuştur. Buna göre hazırlanan geoteknik raporda üretici tarafından verilen teknik bilgilerin yanında, temel tasarımına tasarımı yapılan temelin kendi ağırlığı, deprem yükleri ve rüzgar yükleri dahil edilmiştir. Sahanın birinci deprem bölgesinde bulunduğu esas alınarak deprem etkileri de hesaba katılmıştır.

Yapılan analizler sonucunda sahada uygulanacak temelin genişlik, derinlik gibi birtakım bilgileri Şekil 3.3' te yer aldığı gibi 19 m çap ve 1,50 m yüksekliğe sahip ve ortasında 5,50 m çap ve 0,50 m yüksekliğinde kulenin tabanı olacak şekilde belirlenmiştir. Temelin şekil itibarıyla sekizgen olarak imal edilmesi, derz bırakılmadan döküm işleminin gerçekleştirilmesi gibi birçok farklı koşulda geoteknik rapor ile açıklanmıştır. Elbette boyutlar ve şekil belirlenirken zeminin koşulları göz önünde bulundurulmuştur. Yapılar zemin bakımından kayaç üzerine oturacağı için herhangi bir iyileştirme önerilmemiştir.



Şekil 3.3. Temel ölçüleri ve üstten genel görünümü (F_x : Kule ağırlığı, M_r : Eğilme momenti, F_y : Yatay kuvvet)

Çalışma kapsamında kullanacağımız sonlu elemanlar programı ile analizi yapılacak temellerin üç boyutlu ve iki boyutlu modellemesi yapılırken yaşanabilecek problemlerin önüne geçmek amacıyla temel şeklinde değişiklik yapılması öngörülmüştür. Çünkü sekizgen bir temelin iki boyutlu ortamda çalışılması birtakım dönüşümler gerektirecektir. Üç boyutlu ortamda tanımlanması ise programın şu an sahip olduğu modelleme kapasitesinin dairesel kesit ile düz kesitlerin birleştirilmesi açısından programda oluşabilecek hataları artıracığı ve modelleme ve analiz sürelerini artıracığı öngörülmektedir. Bunun için analizler 19 m genişliğinde, 2 m sabit yüksekliğe sahip kare ve dairesel forma sahip olarak tasarlanacaktır. Daire şeklindeki temeller ise iki boyutlu ortamda dairesel formu tanımlanamayacağı için eşdeğer kare olarak tasarımı gerçekleştirilecektir. Bu durumda kule tabanının oturacağı 5,50 m çap ve 0,50 m yüksekliğindeki eğimli kısım göz önünde bulundurulmayacaktır.

Yapılacak olan farklı senaryolarda temel boyutları ve şekli değiştirilmesine rağmen her biri aynı zemin üzerine konumlandırılacaktır. Böylece 2 boyut ve 3 boyutlu analiz için oluşabilecek farklı durumlar hem de temel tipinin farklılaşması ile oluşabilecek durumlar gözlemlenmeye çalışılacaktır. Zeminin kum olarak tanımlanması yapılmış ve program

üzerinde tanımlanmış kum zemin parametreleri otomatik olarak atanmıştır. Malzeme modeli mohr-coulomb ve zemin drenajlı olarak belirtilmiştir. Yapılacak olan tüm senaryolarda bu parametreler aynı olacak şekilde kullanılacaktır. Bu sayede programlar arasında oluşabilecek deformasyon farklılıkları ve temel – zemin etkileşiminde oluşabilecek farklı durumlar gözlemlenebilecektir.

Tablo 3.2. Analizlerde kullanılacak zeminin özellikleri

Zemin parametreleri	Değer
Kuru birim hacim ağırlık, γ (kN/m ³)	17,00
Poisson oranı, ν	0,30
Kohezyon, c (kN/m ²)	1,00
Elastisite modülü, E (kN/m ²)	20000
İçsel sürtünme açısı, ϕ (°)	35,00
Dilatasyon açısı, ψ (°)	5,00

Temelin yapımında kullanılan beton malzeme için aşağıdaki Tablo 3.2’de yer alan parametreler programa tanımlanmıştır. Temelin oluşturulduğu malzeme modeli lineer elastik ve malzeme tipi geçirimsiz olarak belirtilmiştir.

Tablo 3.3. Analizlerde kullanılacak betonun özellikleri

Beton parametreleri	Değer
Beton birim hacim ağırlığı, γ (kN/m ³)	24,00
Poisson oranı, ν	0,20
Elastisite modülü, E (kN/m ²)	26604000

Tüm temelerde aynı model rüzgar türbini kullanılacağı için yük değerlerinde de bir değişim söz konusu olmayacaktır. Yük değerleri saha araştırması sonrasında düzenlenmiş olan geoteknik rapor üzerindeki yükleme değerlerinden alınmıştır ve Tablo 3.3’ de yer alan yükler tüm senaryolara uygun şekilde tanımlanacaktır.

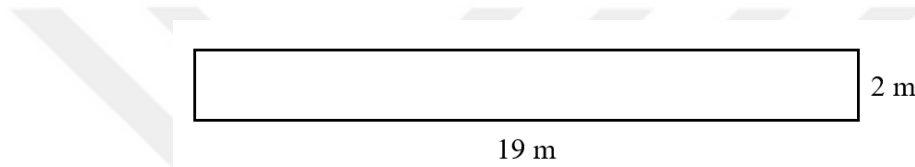
Tablo 3.4. Türbinden kaynaklanan yük değerleri

Kule ağırlığı F_x (kN)	Yatay kuvvet F_y (kN)	Eğilme momenti M_r (kNm)
3073	916	64743

3.3.1. Senaryo 1

Model Geometrisinin Tanımlanması

Bu senaryoda temel 19,00 m genişliğe ve 2,00 m yüksekliğe sahip iki boyutlu bir kare radye temeldir (Şekil 3.4). Sahada yapılan temelin değişken kesitli olmasına rağmen analizde kullanılacak temel kalınlığı 2,00 m sabit olacak şekilde modellenecektir. Bu şekilde temel ağırlığı artacak, zeminimiz deformasyon yönünde olumsuz etkilenecektir. Ayrıca temel zemine sıfır olacak şekilde konumlandırılacak ve üzerinde dolgu kuvvetleri oluşmayacaktır. Bu durumda yapılacak olan analizlerin süresinde azalma gözlemlenecektir. Zeminde oluşacak deformasyonların görülebilmesi için radye temel programa esnek bir temel olarak tanımlanacaktır.



Şekil 3.4. Senaryo 1 temel ölçüleri

Programa giriş yapıldıktan sonra zemin tanımlamaları ve modelleme işlemi gerçekleştirilmiştir. Analiz yapacağımız modelin geometrisi türbin üzerindeki moment etkileri göz önünde bulundurularak düzlemsel şekil değiştirme (plane strain) olarak tercih edilmiştir. Yapılacak modelleme de simetrik bir durum olsa idi işlemleri kısaltmak ve kolaylaştırmak adına modelin yarısının çizilerek aks tanımlamaları yapıldıktan sonra çözümleme işleminin gerçekleşeceği eksenel simetrik modelleme (axisymmetric) tercih edilebilirdi. Modellemenin tamamında 15 düğüm noktalı üçgen modeli tercih edilmiştir. Zemin alanının genişliği Şekil 3.5’ te yer aldığı şekilde tanımlanmıştır. Birimler ve yerçekimi ivmesi, su birim hacim ağırlığı gibi değerler program tarafından otomatik olarak atandığı şekilde bırakılmıştır.

Şekil 3.5. Senaryo 1 genel proje özellikleri

Bölüm 3.3’ te verilen kum ve beton için gerekli sayısal değerler programa tanımlanmıştır. Kum zemin için pratik ve gerçekçi çözümler yapmaya imkan tanıyan elastoplastik bir çözümleme sağlayan Mohr-Coulomb malzeme modeli seçilmiştir. Programın seçilen zemin modeli ile analiz yapabilmesi için şekil 3.6’ da yer alan elastisite modülü, poisson oranı, kohezyon, içsel sürtünme açısı ve dilastasyon açısı gibi zemin parametreleri tanımlanmıştır.

Property	Unit	Value
Stiffness		
E'	kN/m²	20,00E3
ν' (nu)		0,3000
Alternatives		
G	kN/m²	7692
E _{oed}	kN/m²	26,92E3
Strength		
c' (ref)	kN/m²	1,000
φ' (phi)	°	35,00
ψ (psi)	°	5,000

Şekil 3.6. Senaryo 1 zemin parametrelerinin tanımlanması

Plaxis programı bünyesinde yapı elemanlarının tanımlanması program ara yüzünde yer alan “Structures” menüsü altında programın izin verdiği döşeme, duvar, ankraj çubuğu, tünel gibi birçok farklı yapı elemanı seçilerek yapılabilmektedir. Bu elemanlardan herhangi biri gerekli değerler girildikten sonra modellenen zemin içerisinde konumlandırılabilmekte ve hızlı bir şekilde sonuç alınabilmektedir.

Temel modellemesinde ise iki farklı yöntem uygulanabilir. Bunlardan birincisi radye temelin bir zemin modeli gibi oluşturulup beton parametreleri ile tanımlanması, diğeri ise programın bünyesinde barındırdığı yapı başlığı altındaki temel için tercih edilen levha (plate) komutu ile tanımlanması şeklinde gerçekleştirilmektedir. Çalışmada ilk yöntem tercih edilmiştir. Bunun nedeni aşırı kuvvetlere maruz kalan rüzgar türbini gibi yüksek bir yapının temeli genel itibarıyla değişken boyutlu olarak yapılmaktadır. Kenarlarda ince ve merkeze doğru kalınlaşan bu temelin sonlu elemanlar yöntemi ile analizleri gerçekleştirilirken programa tanımlanması kolaylaşmaktadır.

Levha komutu ile tanımlanan temelerde değişken kesitli temel tanımlanması mümkün değildir. Çünkü levha elemanlarda eğilme rijitliği ile eksenel rijitlik değerleri girildikten sonra program levha kalınlığını otomatik olarak kendisi tanımlamaktadır ve atanan bu kalınlık değeri levhanın tamamında geçerli olmaktadır. Modelleme için girilen beton parametreleri aşağıda yer alan Şekil 3.7’ de görülmektedir.

Property	Unit	Value
Stiffness		
E	kN/m ²	26,60E6
ν (nu)		0,2000
Alternatives		
G	kN/m ²	11,09E6
E _{oed}	kN/m ²	29,56E6
Advanced		
Set to default values		☒
Stiffness		
E _{inc}	kN/m ² /m	0,000

Şekil 3.7. Senaryo 1 temel malzemesinin parametreleri

Analiz gerçekleştirilecek zemin alanının genişliği 59 metre ve yüksekliği 50 metre olarak belirlenmiştir. Temelin genişliği 19 metre ve yüksekliği 2 metre olacak şekilde zeminin tam ortasında modellenmiş ve işlem bittikten sonra ulaşılan görüntü, Şekil 3.8’ de görüldüğü gibi olmuştur.



Şekil 3.8. Senaryo 1 modelleme aşaması

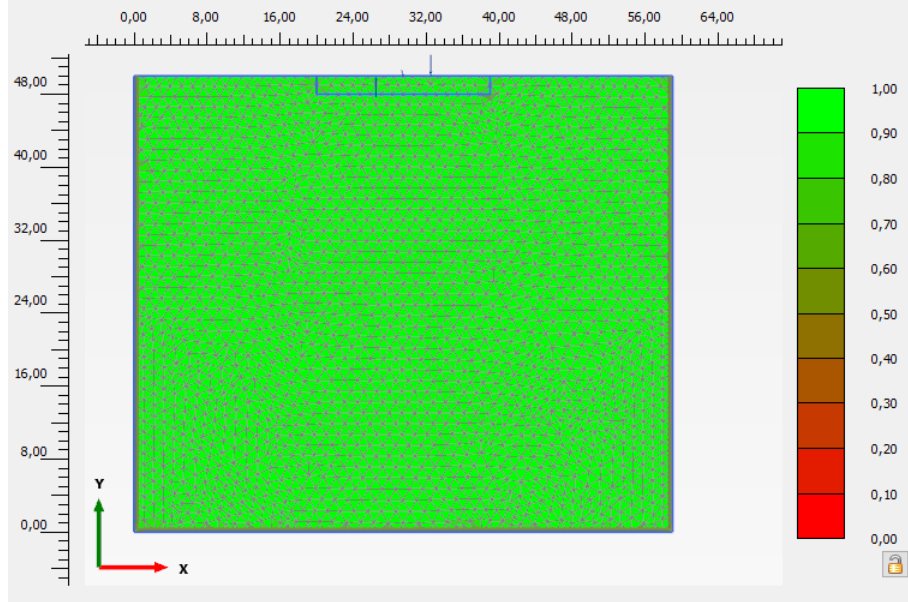
Mesh Oluşturulması

Malzeme özellikleri tanımlandıktan ve yapının modellenmesi işlemi gerçekleştirildikten sonra programın sonlu elemanlar yöntemi ile yapısal analizleri gerçekleştirebilmesi için program içerisinde ikinci bir başlık olan ağ modelinin oluşturulması gerekmektedir. Program bu aşamada istenilen bölgelerde ağ yapısını sıklaştırma veya azaltma şeklinde seçenekler sunmaktadır. Azaltma yapıldığında sonuçlar daha yüzeysel olmaktadır. Bunun için yapının bulunduğu kısımlarda yapı zemin etkileşimini daha iyi görebilmek adına sıklaştırma işlemi yapmak daha iyi sonuçlar almamıza yardımcı olacaktır. Analizde Şekil 3.9’ da görüldüğü gibi temel bölgesinde sıklaştırmaya gidilmiştir. Yapılan sıklaştırma işlemlerinin analiz süresi açısından olumsuz bir etkisi de bulunmaktadır. Çünkü mesh yapı sıklaştıkça program daha fazla eleman ve düğüm noktası oluşturmaktadır.



Şekil 3.9. Senaryo 1 ağ yapısı oluşturma işlemi başlangıcı

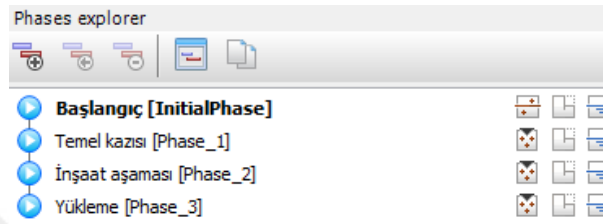
Sıklaştırma yapılacak bölgeler seçildikten sonra ağ yapı oluşturulmuştur. Program modelimize verilen parametreler doğrultusunda 3893 eleman ve 32074 düğüm noktası oluşturmuştur. Oluşturulan mesh yapının kalitesi aşağıdaki Şekil 3.10' da sunulmuştur.



Şekil 3.10. Senaryo 1 ağ oluşturma işlemi sonrası görüntü

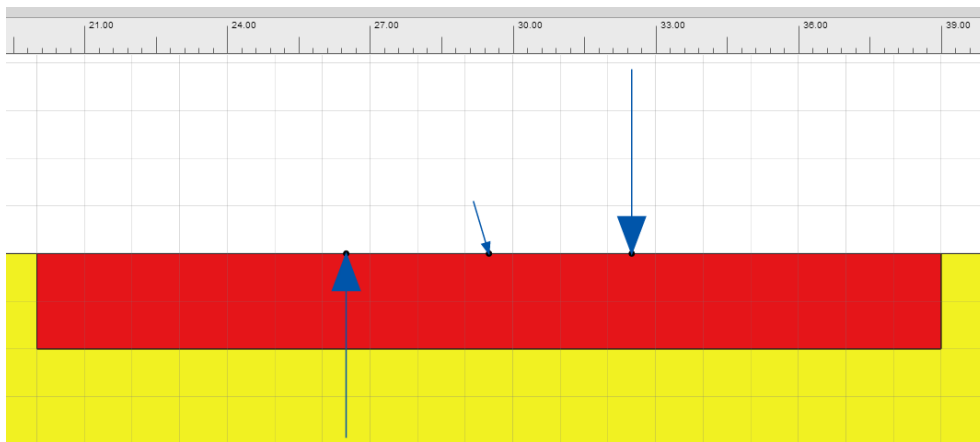
Başlangıç Koşullarının Belirlenmesi

Temel ve zemin modellemesi ve ağ yapısı oluşturulduktan sonra analizin yapılabilmesi için gerçek bir inşaat sürecinin programa tanımlanması gerekmektedir. Bakir durumdaki zeminin sırasıyla kazı işleri, beton dökülmesi, dolgu işlemlerinin yapılması, yapıya harici etkiyen yükler var ise bunların tanımlanması işleri bu aşamada yapılmaktadır. Bu analiz herhangi bir geri dolgu yapılmayacak ve Şekil 3.11’ de görülen işlem adımlarını içerecektir.



Şekil 3.11. Senaryo 1 analiz aşamalarının belirlenmesi

Bu aşamada yüklerin değerleri ve konumları da girilmiştir. Tablo 3.4’ de yer alan kule yükü, yatay rüzgar kuvvetleri Şekil 3.12’ de görüldüğü gibi sisteme merkez noktasından tanımlanmıştır. Eğilme momenti yük değerleri ise programın moment yükü tanımlamasına izin vermesine rağmen gerekli hesaplamalar yapılarak, kulenin temelle birleştiği noktalardan gelecek şekilde tekil yükler olarak tanımlanmıştır. Eğilme momenti değerinin yüksek olmasına bağlı olarak, tanımlanan iki tekil yük merkezde yer alan diğer yüke göre daha büyük olarak görüntülenmektedir.

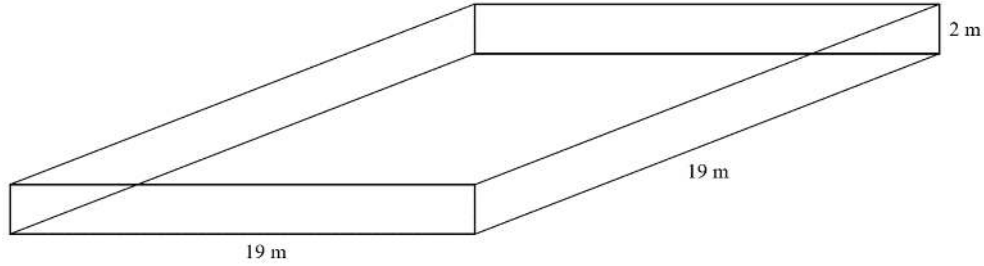


Şekil 3.12. Senaryo 1 yüklerin temel üstündeki konumları

3.3.2. Senaryo 2

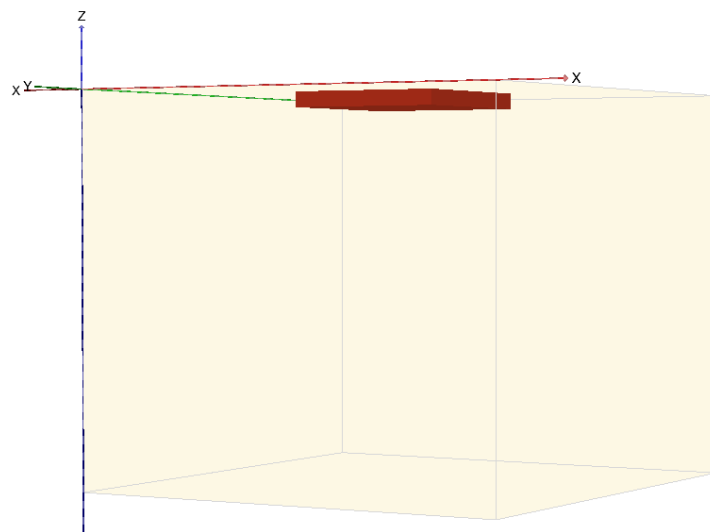
Model Geometrisinin Tanımlanması

Analizi yapılacak olan temel 19,00 m genişliğe, 19,00 m derinliğe ve 2,00 m yüksekliğe sahip kare şeklinde ve modellemesi üç boyutlu olan bir radye temeldir.



Şekil 3.13. Senaryo 2 temel ölçüleri

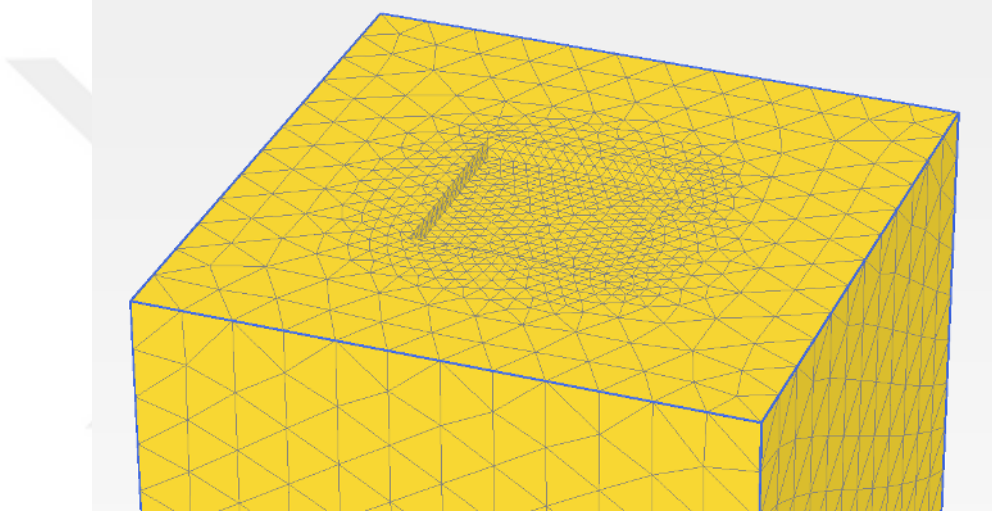
Senaryo 1’de yapıldığı gibi bu temelde düzlemsel şekil değiştirme olarak modellenmiş, 15 düğüm noktalı üçgen modeli tercih edilmiştir. Zemin alanının genişliği 59m, derinliği 59 m ve yüksekliği 50 m olarak tanımlanmıştır. Bu alanı ortalayacak ve zemine sıfır olacak şekilde temel üç boyutlu olarak Şekil 3.14’ te görüldüğü gibi modellenmiştir. Temelin modellemesi zemin modeli oluşturma şeklinde yapılmıştır. Modelleme aşaması bittikten sonra Tablo 3.2. ve Tablo 3.3’ te yer alan zemin ve beton malzeme parametreleri tanımlanmıştır.



Şekil 3.14. Temel ve zeminin modelleme sonrası genel görünümü

Mesh Oluşturulması

Modelleme işlemleri tamamlandıktan sonra yapacağımız analizlerden daha detaylı sonuçlar alabilmek için temel bölgesinde ağ yapısının sıklaştırma işlemi yapılmış ve mesh model oluşturulmuştur. Toplam 23865 eleman ve 34484 düğüm noktası oluşmuştur. Şekil 3.15’ te temelin yer aldığı zeminin orta üst bölümünde yoğunlaşan ağ yapısı görülmektedir. Bu bölgede ağ yapısı zemine göre 4 kat fazla olacak şekilde belirlenmiştir. Bu aşamadan sonra Tablo 3.4’ te yer alan türbin yükleri noktasal olarak temele konumlandırılmıştır. Üç boyutlu ortamda girilen yük değerleri, herhangi bir işlem yapılmadan tablodaki şekliyle girilmiştir. Daha sonra Senaryo 1’deki analiz aşamaları tanımlanmıştır.



Şekil 3.15. Senaryo 2 genel ağ yapısı

3.3.3. Senaryo 3

Senaryo 3 ve 4 birbirleriyle bağlantılı olup, bu senaryo da 19 metre çaplı dairesel rüzgar türbini temelinin iki boyutlu ortamda eşdeğer kare dönüşümü yapılarak çözümlenmesi ele alınacaktır.

Model Geometrisinin Tanımlanması

İki boyutta çalışan Plaxis 2D programı üçüncü boyutu 1 metre olarak kabul edip analizleri gerçekleştirmektedir. Bu durum analitik çözümlemelerde sıkça kullandığımız temelin bir boyutta uzanan çubuk gibi düşünülerek etkiyen yüklerin çizgisel yüke dönüştürülmesi ve işlemlerin daha kolay bir şekilde gerçekleştirilmesi gibi ele alınabilir. Elbette kare, dikdörtgen gibi değişmeyen kesitli temellerde bu yöntem büyük kolaylık

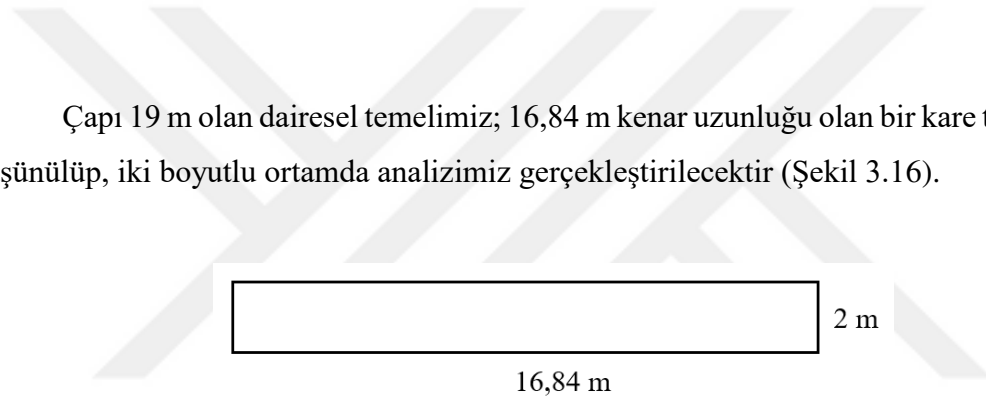
sağlamaktadır. Fakat dairesel kesite sahip bir temelin iki boyutlu bir ortamda modellenebilmesi; eşdeğer alana sahip bir kare temel gibi düşünülerek mümkün olmaktadır.

$$A_{\text{dairesel temel}} = \pi r^2 = \pi * 9.50^2 = 283,53 \text{ m}^2 = A_{\text{eşdeğer kare}} \quad (3.2)$$

$$A_{\text{eşdeğer kare}} = B_{\text{eşdeğer kare}}^2 \quad (3.3)$$

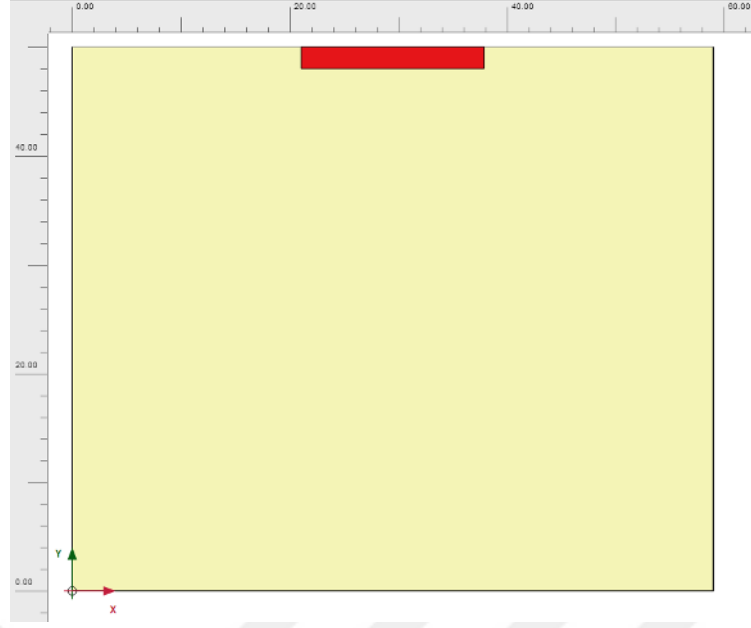
$$B_{\text{eşdeğer kare}} = \sqrt{283,53} = 16,84 \text{ m} \quad (3.4)$$

Çapı 19 m olan dairesel temelimiz; 16,84 m kenar uzunluğu olan bir kare temel olarak düşünülüp, iki boyutlu ortamda analizimiz gerçekleştirilecektir (Şekil 3.16).



Şekil 3.16. Senaryo 3 temel ölçüleri

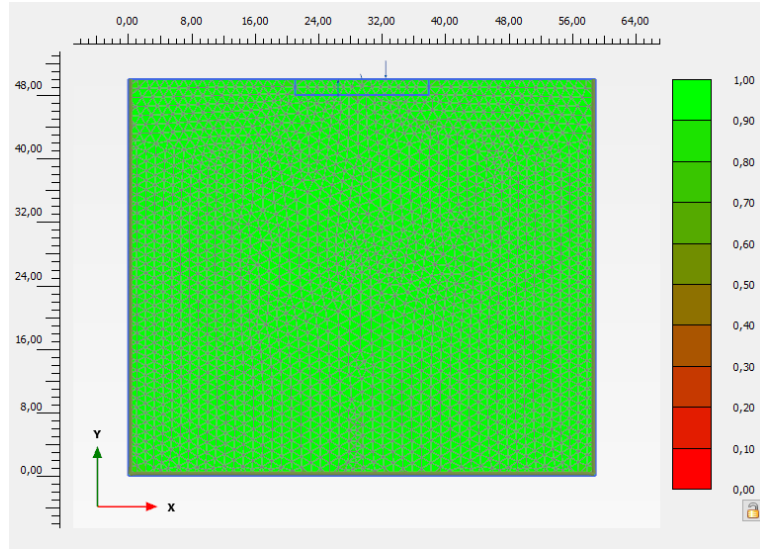
Zemin genişliği 59 metre ve yükseklik 50 metre, temel genişliği 16,84 ve yüksekliği 2 metre olarak programa tanımlandıktan sonra Şekil 3.17’ de görülen bir yapı zemin modeli oluşturulmuştur.



Şekil 3.17. Senaryo 3 temel modelleme görüntüsü

Mesh Oluşturulması

Temel bölgesinde ağ sıklaştırma işlemleri yapıldıktan sonra orta düzeyde ağ yapısı oluşturulmuştur. Program bu model için toplamda 4199 eleman ve 35422 düğüm noktası oluşturmuştur (Şekil 3.18).



Şekil 3.18. Senaryo 3 temel ve zeminin ağ yapısı görüntüsü

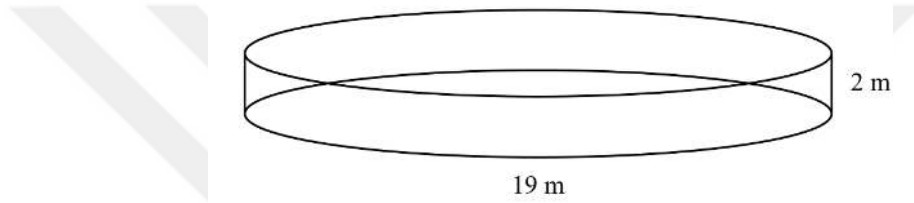
Başlangıç Koşullarının Belirlenmesi

Bu aşamada yapılan işlemler Senaryo 1 başlığı altında gerçekleştirilen işlemler ile aynıdır. Yük miktarları girilmiş ve mesafeleri doğru şekilde yerleştirilerek analiz işlemine geçilmiştir.

3.3.4. Senaryo 4

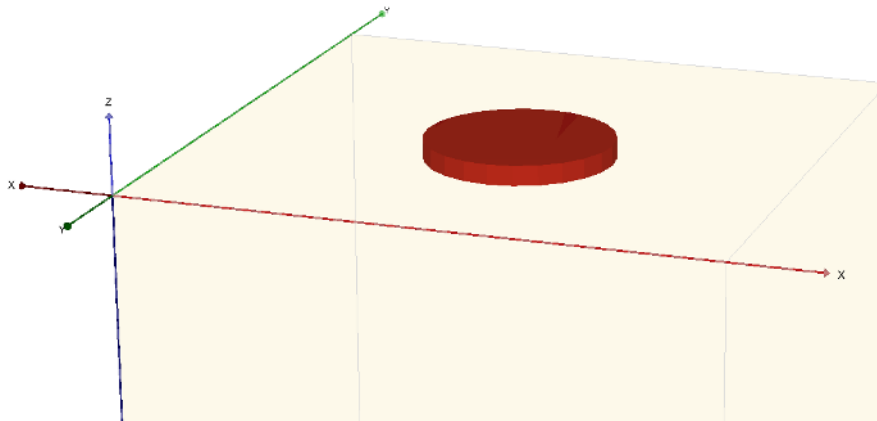
Model Geometrisinin Tanımlanması

Analizi gerçekleştirilecek temel 19,00 m çapında ve 2,00 m yüksekliğinde dairesel forma sahip üç boyutlu bir radye temeldir (Şekil 3.19). Bu analiz Plaxis 3D programı ile gerçekleştirilecek ve Senaryo 3 ile karşılaştırma yapılacaktır.



Şekil 3.19. Senaryo 4 temel ölçüleri

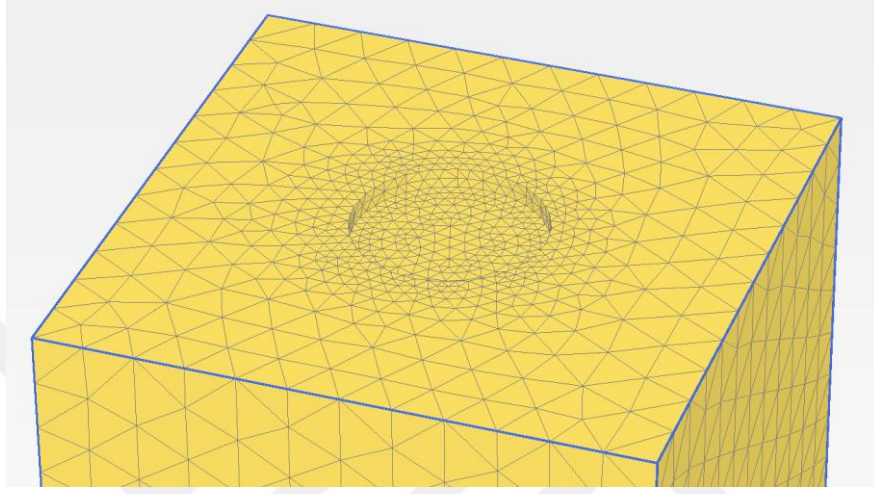
Temel diğer senaryolarda olduğu gibi düzlemsel şekil değiştirme ve 15 düğüm noktalı üçgen model şeklinde modellenmiştir. Yapı zeminini 59 m genişlik, 59 m derinlik ve 50 m yüksekliğe sahiptir. Temel yapı zeminini ortalayacak şekilde konumlanmıştır. Aşağıda yer alan Şekil 3.20'de temel modellemesi görünmektedir.



Şekil 3.20. Senaryo 4 temel modelleme görüntüsü

Mesh Oluşturulması

Temel bölgesinde sıklaştırma işlemi yapıldıktan sonra program model üzerinde toplam 20805 eleman ve 30240 düğüm noktası oluşmuştur. Temel bölgesi ve yakın bölgede yapılan ağı yapısındaki sıklaştırma işlemi şekil 3.21’ de görölmektedir. Bu görselde yapı temeli zemin içerisinden soyutlanmış, aktif olmayan konuma getirilmiştir.



şekil 3.21. Senaryo 4 ağı işlemi yapıldıktan sonra yapı zemini

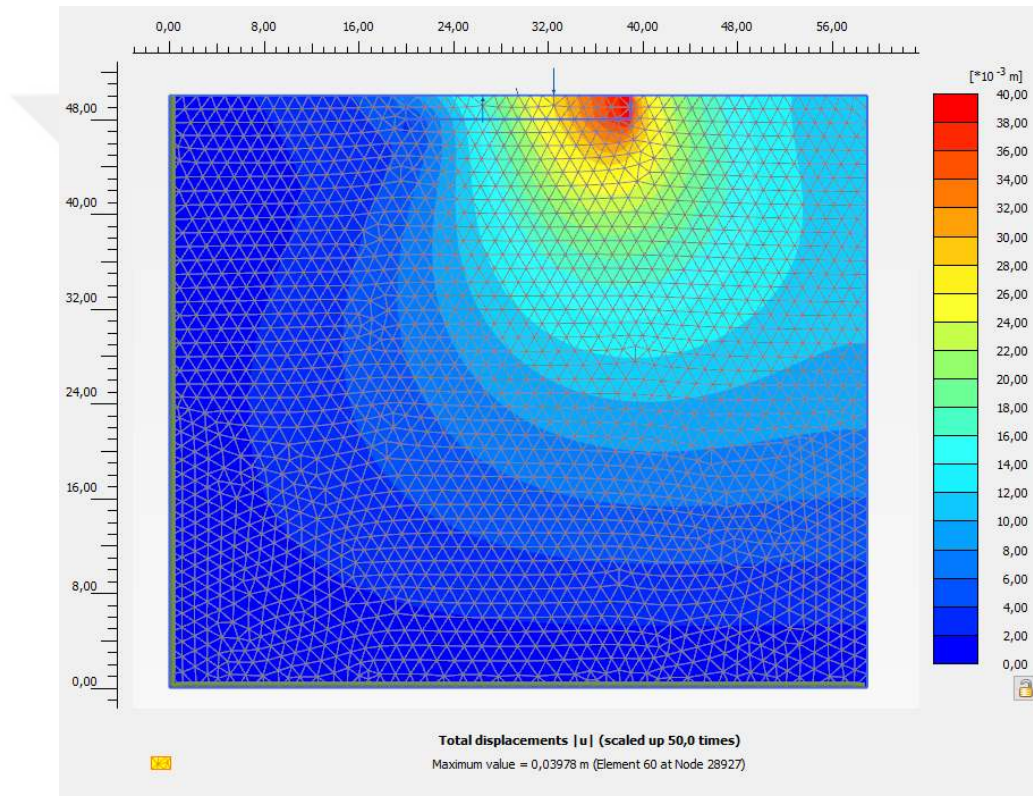
Başlangıç Koşullarının Belirlenmesi

Bu aşamada üç yapıdan temele aktarılan yük miktarları girilmiştir. İlk aşamada zeminin bakir durumu tanımlanmış, ikinci aşamada kazı işlemi gerçekleştirilmiş, üçüncü aşamada temel inşaatı yapılmış ve son aşamada ise yükler doğıru konumda yerleştirilerek analiz işlemine geçilmiştir.

4. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA

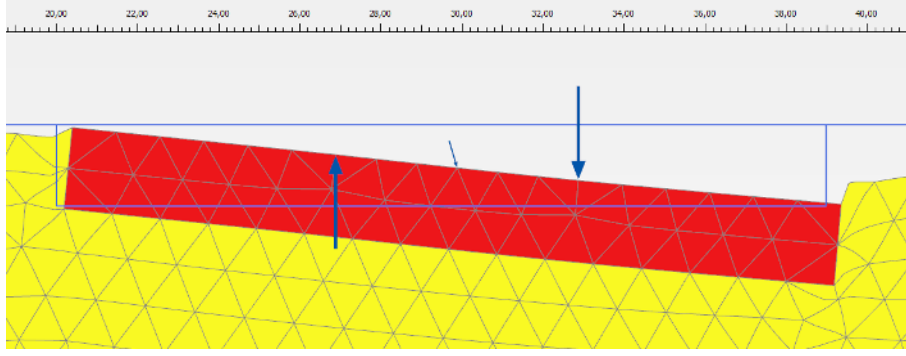
4.1. Senaryo 1 Analiz Sonuçları

Analiz sonucunda Şekil 4.1’ de görüldüğü gibi maksimum 3,978 cm bir oturma gözlenmiştir. Yüklere bağlı olarak temel ve yapı zemini boyunca oluşacak olan deformasyon miktarları minimum olan maviden maksimum şekil değişikliğinin görüldüğü kırmızıya doğru renk skalası ile gösterilmiştir.



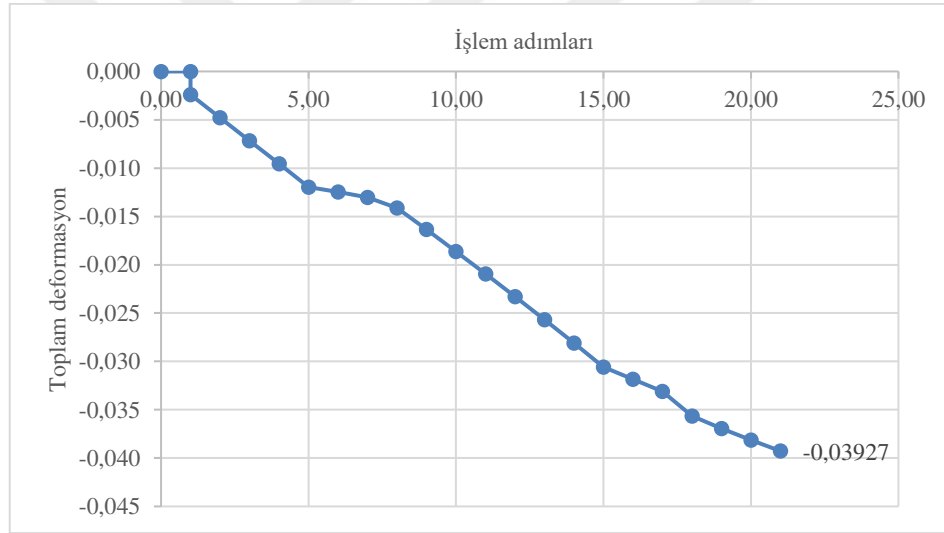
Şekil 4.1. Senaryo 1 deformasyon durumu genel görünümü

Buna göre moment kuvvetleri ve yatay kuvvetlerin etkisiyle temel sağ tarafında kalan bölgede 40 mm’ye kadar varan çökmeler yaşanmıştır. Çökme etkisi programın atadığı 100 kat büyütülmüş ölçekte aşağıdaki Şekil 4.2’ de olduğu gibi görünmektedir.



Şekil 4.2. Senaryo 1 analiz sonrası deformasyon görünümü

Temelde en fazla gerilmenin ve dolayısıyla çökmenin bulunduğu temelin sağ alt noktasında işlem adımlarına bağlı olarak oluşan deformasyon ve ulaşılan toplam deformasyon aşağıda yer alan Şekil 4.3’ te görülmektedir.



Şekil 4.3. Senaryo 1 temel sağ alt köşesinde oluşan toplam deformasyon

Temelde görülen farklı oturma ve dönme durumları da Şekil 4.4’ te verilmiştir. Buna göre temelde $0,114^\circ$ bir dönme durumu oluşmuştur. Ayrıca temelin sağ ve sol köşeleri arasında 0,038 m toplam deformasyon oluşumu söz konusudur.

Distance measurements information

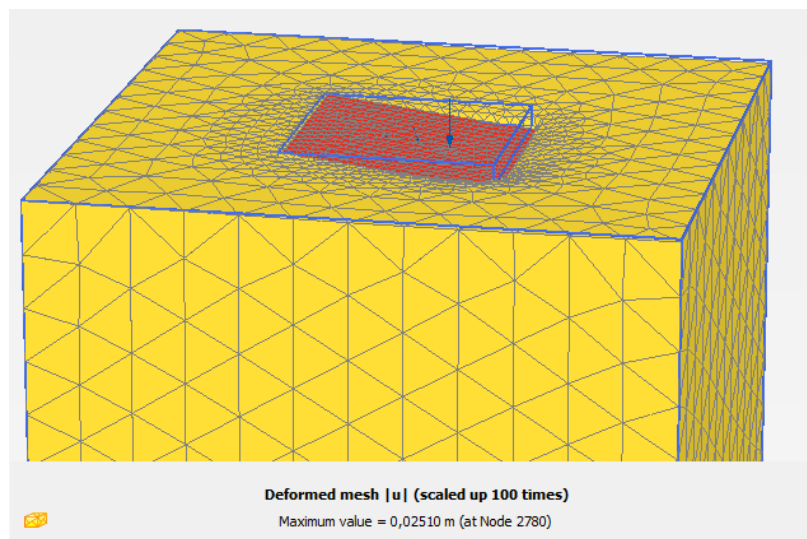
General	Original	Deformed
Node 19155		
X	20,000 m	20,004 m
Y	48,000 m	47,999 m
Node 28621		
X	39,000 m	39,004 m
Y	48,000 m	47,961 m
Δx	19,000 m	19,000 m
Δy	0,000 m	-0,038 m
Distance	19,000 m	19,000 m
Orientation	0,000 °	-0,114 °
Measurements		
Elongation	0,000 m	
$ \Delta u $	0,038 m	
$\Delta u_{\text{perpendicular}}$	-0,038 m	
Rotation	-0,114 °	
Tilt	0,198 % = 1 : 504,6	

Copy Print Close

Şekil 4.4. Senaryo 1 temel alt kısmında ölçülen deformasyonlar

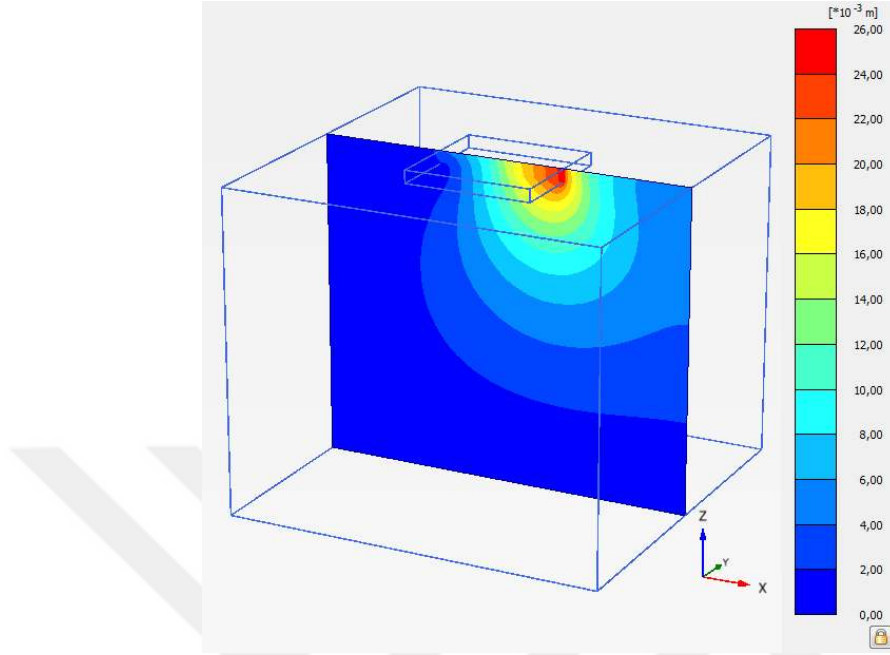
4.2. Senaryo 2 Analiz Sonuçları

Yapılan analiz işlemleri sonucunda temelin moment yönünde oluşan dönme eğilimi, temel zeminindeki oturmalar Şekil 4.5’ te programın otomatik olarak atadığı 100 kat ölçekte görülmektedir. Bu değer el ile daha sonra değiştirilebilmekte ve analiz sonuçları görselliği artırılmış şekilde yorumlanabilmektedir.



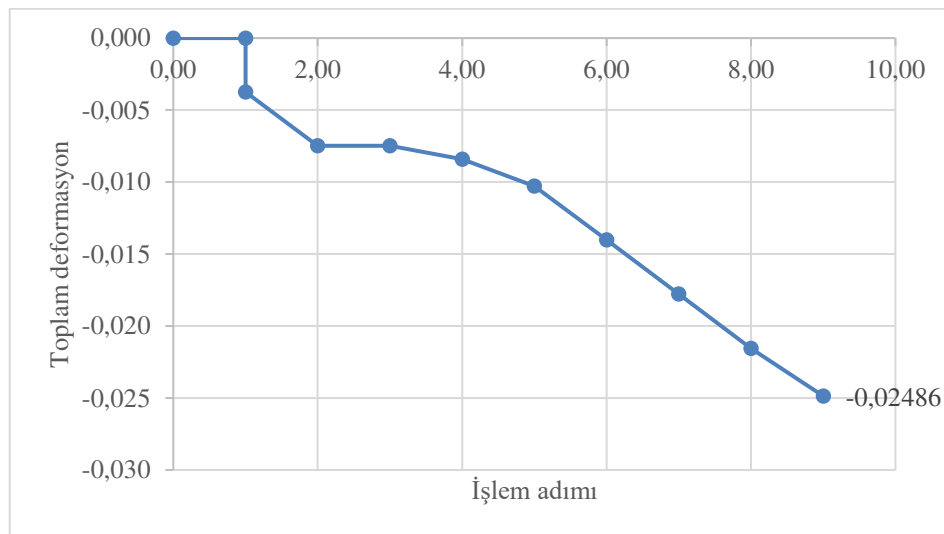
Şekil 4.5. Senaryo 2 analiz sonrası deformasyon görünümü

Analiz sonuçlarına göre zeminin bütününde oluşan yer değişikliği miktarları Şekil 4.6’da görüldüğü gibi olmuştur.



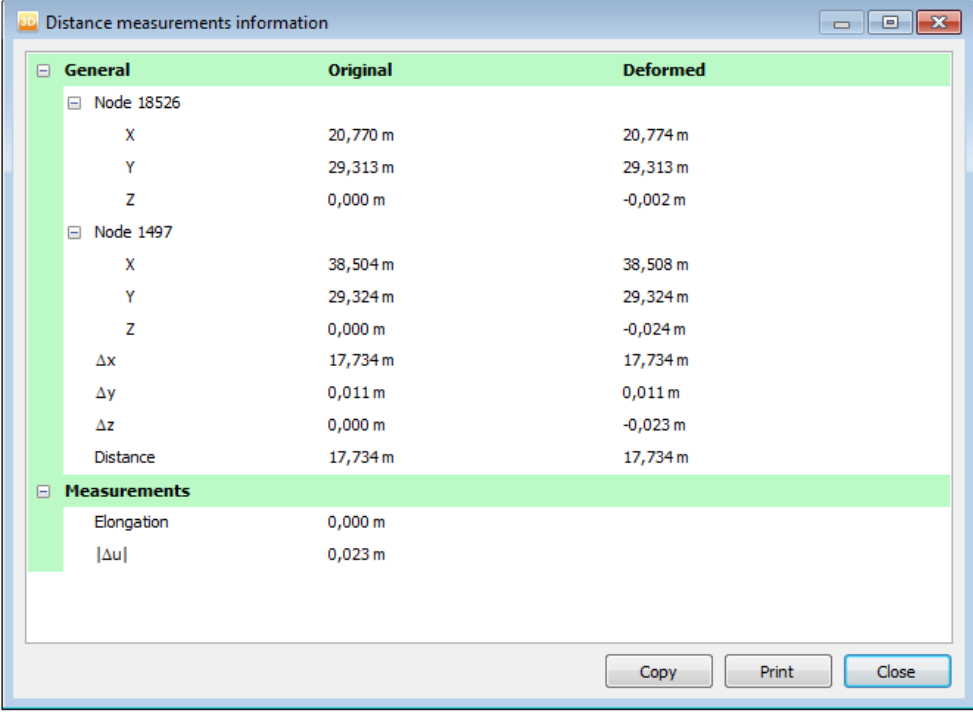
Şekil 4.6. Senaryo 2 deformasyon durumu genel görünümü

Etkiyen yükler altında en fazla deformasyonun görüldüğü bölge olan temel sağ alt kısmında işlem adımlarına bağlı deformasyon ve ulaşılan toplam deformasyon miktarı aşağıda yer alan Şekil 4.7’ de ayrıntılı bir şekilde görülmektedir.



Şekil 4.7. Senaryo 2 temel sağ alt köşesinde oluşan toplam deformasyon

Temelde görülen farklı oturma durumları Şekil 4.8’ de görülmektedir. 3 boyutlu program üzerinde farklı noktalar üzerinde oluşan deformasyon miktarları üç boyutta verilmesine rağmen dönme açıları ile ilgili bilgi sunulmamıştır. Nokta sayısının fazlalığından ötürü iki boyutlu programda ki kadar hassas bir nokta seçimi yapılamamıştır.

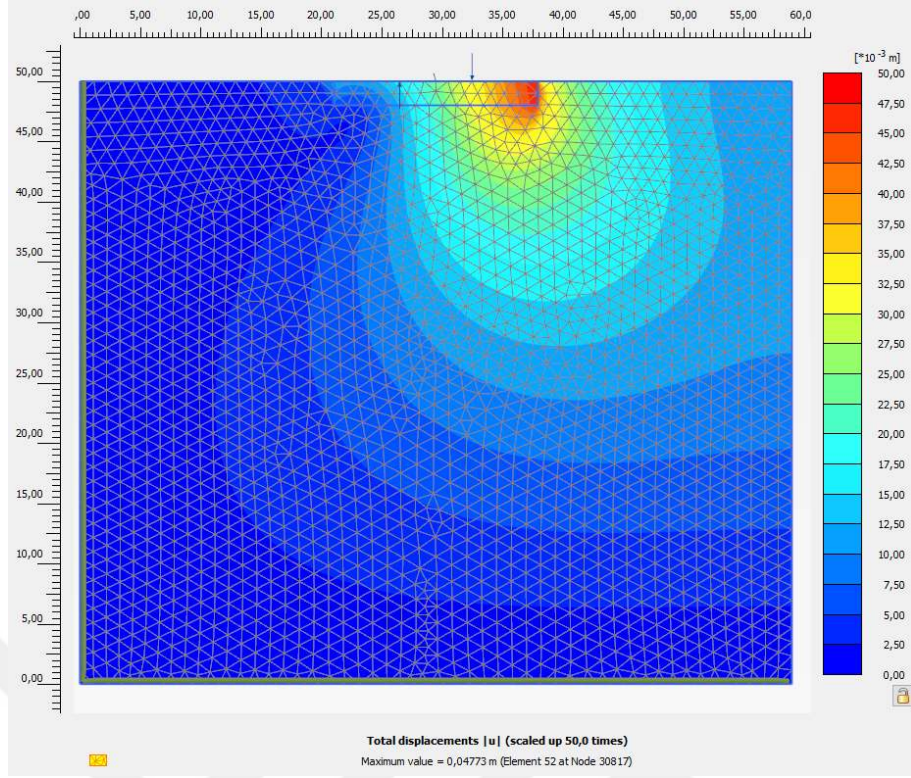


Distance measurements information		
General	Original	Deformed
Node 18526		
X	20,770 m	20,774 m
Y	29,313 m	29,313 m
Z	0,000 m	-0,002 m
Node 1497		
X	38,504 m	38,508 m
Y	29,324 m	29,324 m
Z	0,000 m	-0,024 m
Δx	17,734 m	17,734 m
Δy	0,011 m	0,011 m
Δz	0,000 m	-0,023 m
Distance	17,734 m	17,734 m
Measurements		
Elongation	0,000 m	
$ \Delta u $	0,023 m	

Şekil 4.8. Senaryo 2 temel alt kısmında ölçümlenen deformasyon bilgileri

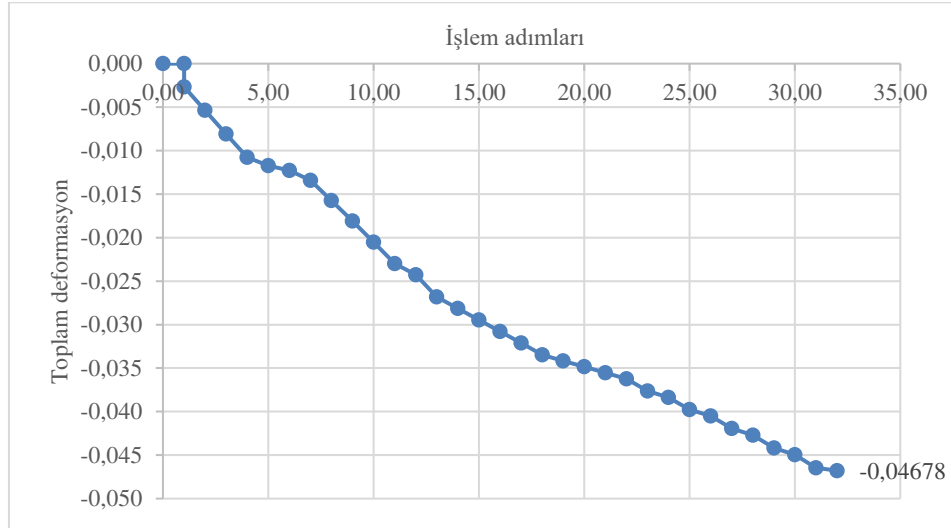
4.3. Senaryo 3 Analiz Sonuçları

Yapılan analiz işlemlerinden sonra Şekil 4.9’ da görüldüğü üzere maksimum 4,773 cm bir deformasyon meydana gelmiştir.



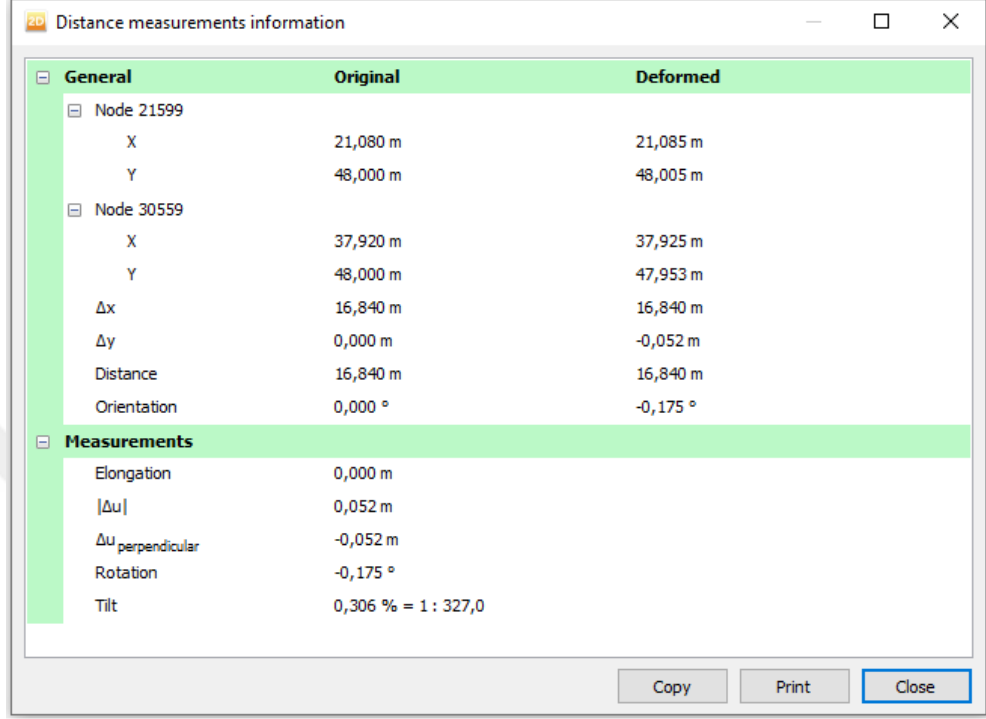
Şekil 4.9. Senaryo 3 temel ve zeminde oluşan yer değiştirme miktarları

Bu senaryoda görülen deformasyon değerlerinin Senaryo 1'e oranla yüksek olması temel alanındaki azalma ile bağlantılıdır. Moment ve yük etkilerine bağlı olarak temel sağ alt köşesinde oluşan maksimum deformasyon miktarı Şekil 4.10' da görülmektedir.



Şekil 4.10. Senaryo 3 temel sağ alt köşesinde oluşan toplam deformasyon

Temelde görülen farklı oturma ve dönme durumları Şekil 4.11’de görüntülenmektedir. Bu veriler doğrultusunda temelde 0,175° bir dönme ve 0,052 m farklı oturma durumu gözlenmiştir.



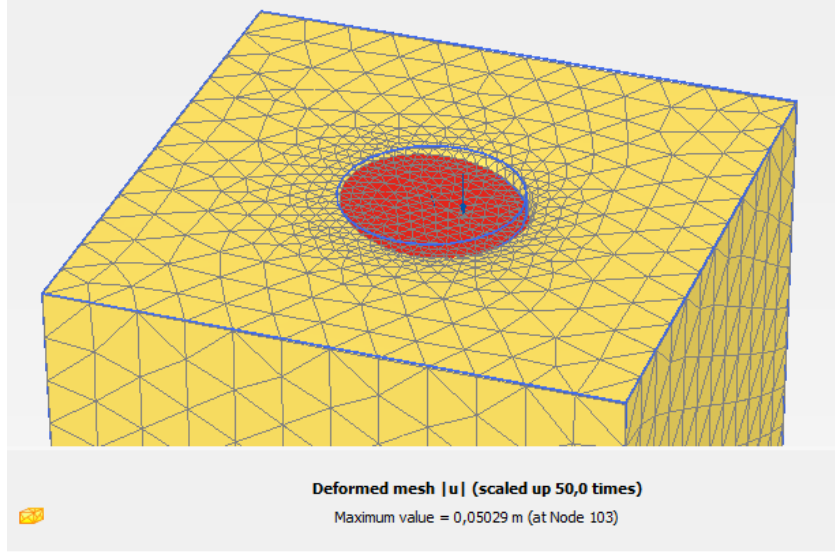
Distance measurements information		
General	Original	Deformed
Node 21599		
X	21,080 m	21,085 m
Y	48,000 m	48,005 m
Node 30559		
X	37,920 m	37,925 m
Y	48,000 m	47,953 m
Δx	16,840 m	16,840 m
Δy	0,000 m	-0,052 m
Distance	16,840 m	16,840 m
Orientation	0,000 °	-0,175 °
Measurements		
Elongation	0,000 m	
$ \Delta u $	0,052 m	
Δu perpendicular	-0,052 m	
Rotation	-0,175 °	
Tilt	0,306 % = 1 : 327,0	

Şekil 4.11. Senaryo 3 temel alt kısmında ölçümlen deformasyon bilgileri

4.4. Senaryo 4 Analiz Sonuçları

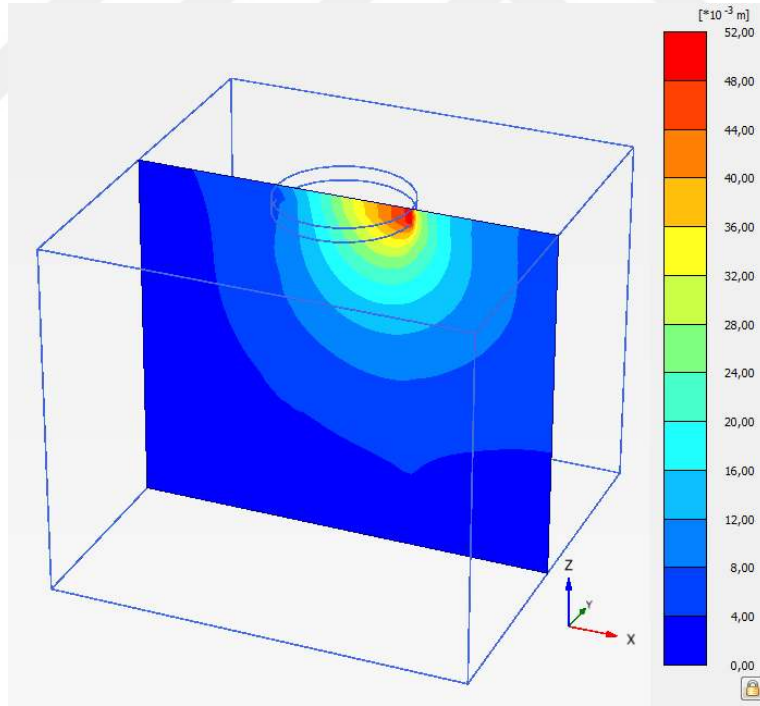
Hesaplama

Analiz işlemleri gerçekleştirildikten sonra yapı zemininde oluşan maksimum deformasyon miktarı 5.029 cm olarak ölçülmüştür. Aşağıdaki Şekil 4.12’ de temelin ilk konumu mavi renkli çember ile görülmekte ve analiz sonucunda oluşan deformasyon miktarı 50 kat büyütülmüş olarak sunulmaktadır.



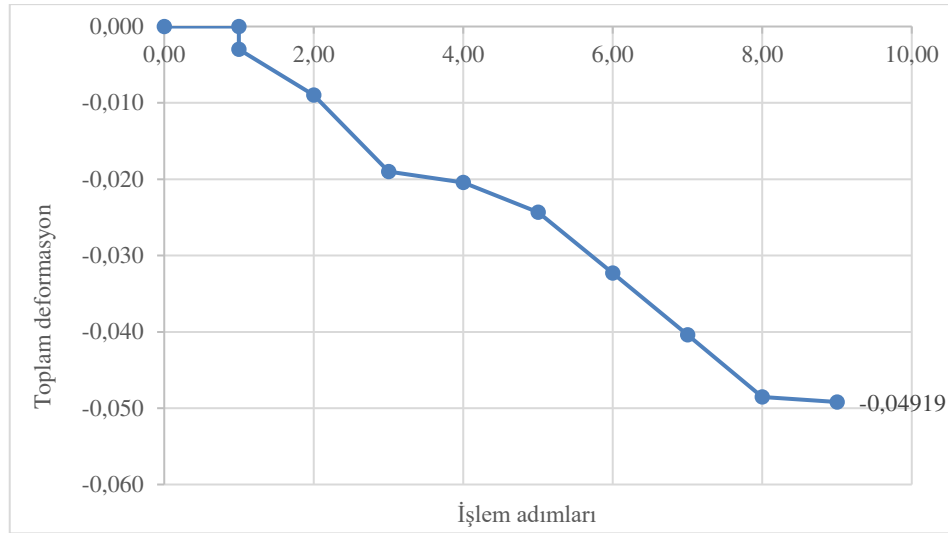
Şekil 4.12. Senaryo 4 temel in deformasyona uğramış hali

Analiz sonuçlarına göre yapı zemininin bütününde derinliğe göre oluşan yer değişiklikleri Şekil 4.13' te görüldüğü miktarlarda olmuştur.



Şekil 4.13. Senaryo 4 temel ve zeminde oluşan yer değiştirme miktarları

Temelin sağ alt kısmında ulaşılan toplam deformasyon değeri Şekil 4.14' te yükleme işlem adımlarına bağlı olarak görülmektedir.



Şekil 4.14. Senaryo 4 temel sağ alt köşesinde oluşan toplam deformasyon

Temelin alt kısmında olabildiğince yakın noktalar seçilerek temeldeki farklı oturma miktarı ve dönme miktarı ölçümlenmeye çalışılmıştır. Fakat yine Senaryo 2’de olduğu gibi; üç boyutlu programda oluşan yüksek düğüm noktası sayısı nedeniyle birebir ölçümleme yapılamamış ve ölçüm sonucunda program temeldeki açısız dönme miktarını otomatik olarak hesaplamamıştır.

Distance measurements information		
General	Original	Deformed
Node 450		
X	39,000 m	39,002 m
Y	29,500 m	29,500 m
Z	-2,000 m	-2,050 m
Node 21532		
X	20,162 m	20,164 m
Y	28,271 m	28,271 m
Z	-2,000 m	-2,005 m
Δx	-18,838 m	-18,838 m
Δy	-1,229 m	-1,229 m
Δz	0,000 m	0,044 m
Distance	18,878 m	18,878 m
Measurements		
Elongation	0,000 m	
$ \Delta u $	0,044 m	

Şekil 4.15. Senaryo 4 temel alt kısmında ölçülen deformasyon bilgileri

4.5. Analiz Sonuçlarının Karşılaştırılması

Rüzgar türbini yüklerinin, dairesel ve kare şeklindeki radye temeller üzerinden kum zeminde yapmış olduğu deformasyonlar ve temellerde oluşabilecek hareketlilik sonlu elemanlar analizi yapan Plaxis programının iki farklı versiyonu aracılığıyla analiz edilmiştir.

Aşağıda yer alan Tablo 4.1’ de özellikleri belirlenmiş olan kare radye temelin iki boyutlu ve üç boyutlu program kullanılarak oluşturulan senaryolar açısından deformasyon ve açısal dönme miktarları görülmektedir.

Tablo 4.1. Kare radye temelin 2 ve 3 boyutlu analiz sonuçları

	Maksimum Deformasyon (mm)	Temel Sağ Köşe (mm)	Açısal Dönme (°)
Senaryo 1 (2D)	39,780	39,270	0,114
Senaryo 2 (3D)	25,100	24,860	0.070

Dairesel forma sahip radye temelin analiz sonuçları ise Tablo 4.2’ de görülmektedir. Temelin üç boyutlu ortamda direk çizilmesi ve iki boyutlu çözümlemeler yapabilen program ortamında eşdeğer alan metoduyla dönüştürülerek modellenmiş halinin analiz sonuçları görülmektedir.

Tablo 4.2. Dairesel radye temelin 2 ve 3 boyutlu analiz sonuçları

	Maksimum Deformasyon (mm)	Temel Sağ Köşe (mm)	Açısal Dönme (°)
Senaryo 3 (2D)	47,730	46,780	0,175
Senaryo 4 (3D)	50,290	49,190	0,130

İki ve üç boyutlu programlar ile yapılan analizler sonucunda deformasyon ve açısal dönme açısından oluşan farklar yüzde olarak Tablo 4.3’te verilmiştir.

Tablo 4.3. Temellerin 2 ve 3 boyutlu analiz farkları

	Maksimum Deformasyon (%)	Temel Sağ Köşe (%)	Açısal Dönme (%)
Kare (2D/3D)	58,49	57,96	62,86
Dairesel (2D/3D)	-5,09	-4,90	-25,71

5. SONUÇ

Ülkemizin, maliyetleri yüksek olan rüzgar enerjisi alanında yaptığı yatırımlar ciddi düzeydedir. Bu nedenle rüzgar türbinlerinin, işletme ömrü boyunca sağlıklı bir şekilde çalışması son derece önemlidir. Güçlü dış yüklere maruz kalan ve yüksek bir yapı olan rüzgar türbinlerinin, temel ve yapı zemini ilişkilerinin oldukça hassas bir şekilde yorumlanması gerekmektedir. Oluşabilecek deformasyonların beklenen düzeyden yüksek olması, farklı oturmaların görülmesi durumunda yapının işletme dışı kalması veya devrilmesi gibi durumlar oluşabilir.

Çalışmada programın iki boyutlu veya üç boyutlu sürümlerinden herhangi birinin kullanılarak ve sadece temel şekli değiştirilerek yapılan çözümlemelerde, temel alanının azalmasıyla deformasyonun arttığı görülmüştür. Bu beklenen bir durumdur.

Rüzgar türbinleri için günümüzde dairesel ve sekizgen olan radye temeller tercih edilmektedir. Bu geometrik şekillerin iki boyutta modellenmesi dönüşüm işlemi gerektirmektedir. Fakat kare kesitli temelin analiz programının iki boyutlu versiyonunda modellenmesi herhangi bir dönüşüm gerektirmeksizin mümkündür. Bu durumun analizde oluşabilecek farklılıkları en doğru şekilde yansıtabileceği düşünülmüştür. Bu kapsamda genişliği 19 m olan kare temelin iki ve üç boyutlu programda analiz yapılmasıyla Tablo 4.1.' de yer alan deformasyon ve dönme miktarları bulunmuştur. İki boyutlu program ile elde edilen değerler, üç boyutlu programa göre %60'a yakın oranda yüksek çıkmıştır. Bu durum üç boyutlu programın ağ yapısı oluşturulurken iki boyutlu programa göre 7 kat fazla sayıda eleman oluşturması, yani daha detaylı ve gerçekçi bir analiz yapması ile açıklanabilir.

Çalışmanın diğer önemli karşılaştırması ise üç boyutta modellenmesi mümkün olan fakat iki boyutlu çözümlemelerde dönüşüm işlemi yapılmasını gerektiren dairesel radye temel olmuştur. Çapı 19 m olan dairesel formdaki temelin iki ve üç boyutlu programda analiz yapılmasıyla Tablo 4.2.' de yer alan deformasyon ve dönme miktarları hesaplanmıştır. Bu durumda üç boyutlu programın deformasyon sonuçları iki boyutlu programa göre %5 daha fazla çıkmıştır. Literatür taraması yapılırken birçok çalışma da dairesel temelin iki boyutta modellenirken eşdeğer alan metoduyla dönüştürülerek çözümlendiği görülmüştür. Dairesel formdaki temellerin eşdeğer kare temele dönüştürülmesi ile oluşan bu durumun kare temel karşılaştırmasına göre farklı bir oranda deformasyona sebep olması deneysel olarak araştırılması ve üzerine çalışılması gereken bir konudur.

Sonlu elemanlar yöntemiyle analiz yapan paket programları, analitik ve deneysel çözümlemelere göre çok daha hızlı bir şekilde sonuç verdiği için araştırmacılar ve sektör

Çalışanları tarafından sıklıkla tercih edilmektedir. Bu nedenle, bu programlar ile elde edilen değerlerin gerçeği ne kadar iyi yansıttığının bilinmesi, bu alanda çalışan kişilerde oluşacak ngr açısından önemlidir.

Programın iki ve boyutlu sürümlerinde oluşan farkların açıklanabilmesi için sadece sayısal analiz yeterli değildir. lekli modellerzerinde yapılabilcek deneysel çalışmalar veya gerçek bir türbinin yerinde zemin – temel deformasyon ölçümleri ile sayısal analizler karşılaştırılarak daha sağlıklı sonuçlar elde edilebilecektir.

Bu alışma yürütülürken eř zamanlı olarak birçok firma ile görüşülmüştür. Bu firmalardan türbinler ve inşa edildikleri zeminler ile ilgili birtakım teknik bilgiler talep edilmiştir. Fakat firmaların karşılıklı olarak yaptıkları gizlilik sözleşmeleri nedeniyle kısıtlı bilgiye erişilebilmiştir. Bu alanda yapılacak aktif bilgi paylaşımı; hem akademik çalışmaların daha gerçekçi ve faydalı olabilmelerine hem de rüzgar enerjisine yatırım yapan firmaların yaşayabileceği olumsuz durumların engellenebilmesine yardımcı olacaktır.

KAYNAKLAR

- Bayazıt, Y., 2019. Rüzgar Enerjisi Türbinleri Yüzeysel Temellerinin Geoteknik Tasarımı, Yüksek Lisans Tezi. İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, Türkiye.
- Berilgen, M., 1996. Ankrajlı Perdelerde Zemin Yapı Etkileşiminin İncelenmesi, Doktora Tezi. Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, Türkiye.
- Celep, Z., Kumbasar, N., 2005. *Betonarme Yapılar*, Dördüncü Baskı. Beta Yayınevi, İstanbul, 861 s.
- Cengizhan, A., 2018. Temel Projelendirilmesinde Laboratuvar Deneylerinin Önemi ve Klasik Çözüm Sonuçlarıyla Sonlu Elemanlar Çözümlerlerinin Karşılaştırılması, Yüksek Lisans Tezi. Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Isparta, Türkiye.
- Coduto, D., 2011. *Temel Tasarımı İlkeler ve Uygulamalar*, İkinci Baskı. (çev. Mollamahmutoğlu, M., Kayabalı, K.) Gazi Kitabevi, Ankara, 815 s.
- Çinicioğlu, S.F., 2005. Zeminlerde Statik ve Dinamik Yükler Altında Taşıma Gücü Anlayışı ve Hesabı. *İnşaat Mühendisleri Odası Semineri*, İstanbul, 1-25.
- Elibüyük, U., Üçgül, İ., 2014. Rüzgar Türbinleri, Çeşitleri ve Rüzgar Enerjisi Depolama Yöntemleri. *SDÜ Yekarum e-Dergi*, 2, 1-14.
- Erdem, O., Batur, B., Bilge, Z.D., Temir, G., 2015. Bozcaada’da Kurulacak Olan Bir Rüzgâr Enerjisi Santralinin Ekonomik Analizi. *Tesisat Mühendisliği*, 148, 22-27.
- Ergin, A., Bayraktarkatal, E., Ünsan, Y., 2000. *Sonlu Elemanlar Metodu ve Gemi İnşaatı Sektöründeki Uygulamaları*. Yapım Matbaacılık, İstanbul, 89 s.
- ETKB, 2020. *Rüzgar Enerjisi*. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, <https://www.enerji.gov.tr/tr-TR/Sayfalar/Ruzgar>, (Erişim tarihi: 22.01.2020)
- Genç, M., 2017. Rüzgar Enerji Sektöründe Kule ve Temel Teknolojileri, 4. *İzmir Rüzgar Sempozyumu*, İzmir, 1-47.
- GWEC, 2019. *Global Wind Report 2018*. Global Wind Energy Council, <https://gwec.net/wp-content/uploads/2019/04/GWEC-Global-Wind-Report-2018.pdf>, (Erişim Tarihi: 13.03.2020)
- Mohamed, W., 2016. Windmill Foundations On Weak Soils Evaluation of New Proposals for Cost-Efficient Solutions, Master’s Dissertation, Lund University Department Of Construction Sciences, Sweden.

- Kaçar, C., 2011. Rüzgar Santrallerinde Proje Süreci, *İzmir Rüzgar Sempozyumu ve Sergisi Bildirileri*, İzmir, 1-4.
- Kanbur, F.A., 2014. 500 Kw Enerji Kapasiteli Bir Rüzgar Türbinin Çelik Kule Tasarımı, Yüksek Lisans Tezi. İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, Türkiye.
- Karakaş, A.İ., 2017. Elastik Zemine Oturan Kule Tipi Yapıların SAP2000-OAPI Kullanılarak Yapısal Analizi ve Optimum Tasarımı, Doktora Tezi. Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon, Türkiye.
- Keskin, M.S., 2009. Güçlendirilmiş Kumlu Şevlere Oturan Yüzeysel Temellerin Deneysel ve Teorik Analizi, Doktora Tezi. Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Adana, Türkiye.
- Kılıç, H., 2000. Yumuşak Zeminler Üzerine Oturan Dolgu Barajlarda Deformasyonların Nümerik ve Deneysel Yöntemler ile Belirlenmesi, Doktora Tezi. Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, Türkiye.
- Kutlu, Y., 2011. Deniz Üstü Rüzgar Türbini Temel Tasarımı ve Türkiye’de Kazıklı Bir Uygulaması, Yüksek Lisans Tezi. İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, Türkiye.
- MGM, 2020. *Rüzgar Atlası*. Meteoroloji Genel Müdürlüğü, <https://www.mgm.gov.tr/genel/ruzgar-atlasi.aspx> (Erişim tarihi: 20.01.2020)
- Ntambakwa, E., Yu, H., Guzman, C., Rogers, M., 2018. Geotechnical design consideration for onshore wind turbine shallow foundations. https://www.researchgate.net/publication/326580137_Geotechnical_desgin_consideration_for_onshore_wind_turbine_shallow_foundations/link/5ba01962a6fdccd3cb5ee90b/download, (Erişim Tarihi: 17.01.2020)
- Shretsha, S., 2015. Design and Analysis of Foundation For Onshore Tall Wind Turbines, Master’s Thesis. Clemson University Institute of Science, Clemson, United States of America.
- Svensson, H., 2010. Design of Foundations For Wind Turbines, Master’s Dissertation. Lund University Department of Construction Sciences, Lund, Sweden.
- TUREB, 2019. *Türkiye Rüzgar Enerjisi İstatistik Raporu 2019*. Türkiye Rüzgar Enerjisi Birliği, <https://tureb.com.tr/lib/uploads/4e77501b714739a9.pdf>, (Erişim Tarihi: 05.03.2020)
- Turgut, M., 2015. Rüzgar Türbini Kulesinin Prefabrike Olarak Tasarlanması ve Fizibilitesi, Yüksek Lisans Tezi. İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, Türkiye.
- Turhan, M., 2018. Farklı Temel Tipleri İçin Betonarme Siloların Zemininde Oluşturduğu Etkilerin Plaxis Programı İle Belirlenmesi, Yüksek Lisans Tezi. Iğdır Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Iğdır, Türkiye.

- URL-1, 2015. *Rüzgar Türbinlerinin Kurulum ve Bakım Süreçlerindeki Risklerin Tespiti, Değerlendirilmesi ve Çözüm Önerilerinin Sunulması*. <https://www.ailevecalisma.gov.tr/medias/5117/tolgamuratdagi.pdf>, (Erişim Tarihi: 18.12.2019)
- URL-2, 2017. *Dünya’da ve Türkiye’de Yenilenebilir Enerji*. <https://setav.org/assets/uploads/2017/04/YenilenebilirEnerji.pdf>, (Erişim Tarihi: 18.02.2020)
- URL-3, 2019. *Bilgisayar Destekli Tasarım ve Analiz (Ansys)*. <http://www.ibrahimcayiroglu.com/Dokumanlar/BilgisayarDestekliTasarim/BilgisayarDestekliTasarimVeAnaliz-1-hafta.pdf>, (Erişim Tarihi: 10.02.2020)
- Uzuner, B.A., 2016. *Temel Mühendisliğine Giriş*, Altıncı Baskı. Derya Kitabevi, Trabzon, 409 s.
- Qazizada, R., 2019. Rüzgar Türbin Temellerinin Sismik Yükler Altındaki Davranışının İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi. Ondokuz Mayıs Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Samsun, Türkiye.
- WindEurope, 2019. *Wind Energy in Europe in 2018 Trends and Statistics*. European Wind Energy Association, <https://windeurope.org/wp-content/uploads/files/about-wind/statistics/WindEurope-Annual-Statistics-2018.pdf>, (Erişim Tarihi: 06.03.2020)
- Zhussupbekov, A., Lukpanov, R., Orazova, D., Sapenova, Z., 2016. Design of Foundations for Wind Turbine with Analysis by Finite Element Method, *13th Baltic Sea Geotechnical Conference*, Lithuania, 196-200.