



**TÜRKİYE İÇİN OPTİMUM AÇIK DENİZ ÜZERİ KOMBİNE RÜZGAR VE
MAVİ ENERJİ SANTRALİ GELİŞTİRİLMESİ**

Abdullah Kürşat DEMİR

**DOKTORA TEZİ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

OCAK 2025

ETİK BEYAN

Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Tez çalışmada yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu,

bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

Abdullah Kürşat DEMİR

27/01/2025

TÜRKİYE İÇİN OPTİMUM AÇIK DENİZ ÜZERİ KOMBİNE RÜZGAR VE MAVİ ENERJİ SANTRALİ GELİŞTİRİLMESİ

(Doktora Tezi)

Abdullah Kürşat DEMİR

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Ocak 2025

ÖZET

Türkiye üç yanı denizlerle çevrili Mavi Vatan doktrini ile 462 000 km² deniz alanına sahip bir ülkedir. Bu kapsamda Türkiye'nin deniz saha planlamasını gerçekleştirerek söz konusu bu alandan en verimli şekilde faydalanması gerekmektedir. Çalışma dahilinde, Deniz Saha Planlamasına (DSP) yönelik öncü bir ÇKKV (Çok Kriterli Karar Verme) modeli geliştirilmiştir. Model kapsamında DSP kullanımı, çevresel etki ve ekolojik – biyolojik çeşitlilik altında üç ana kriter belirlenerek hem sürdürülebilirlik hem de fayda sağlama ilkeleri göz önünde bulundurulmuştur. Alt kriterler belirlenen dağılımlarla Monte Carlo Simülasyonu (MCS) ile modellenerek bir Stratejik Planlama Modeli (SPM) ortaya konmuştur. Mavi enerji, gelgit, dalga ve açık deniz rüzgarı gibi deniz ve hidrokinetik bazlı enerji kaynaklarını ifade eder ve Türkiye'nin doğal gaz ve petrol gibi dışa bağımlı birincil enerji kaynaklarına olan bağımlılığını azaltarak, ulusal enerji karışımındaki yerli enerji kaynaklarının çeşitliliğini artırmak için önemli bir fırsat sunar. Türkiye'nin açık deniz mavi enerji kapasitesinin araştırılması, enerji politikası hedefleriyle uyum sağlamak açısından kritik bir öneme sahiptir. Özellikle Yenilenebilir Enerji Kaynak Alanı Kapsamında (YEKA) aday bölgelerden biri olan Karadeniz'deki Kıyıköy kıyıları, açık deniz mavi enerji geliştirme için elverişli alanlar arasında yer almakta olup, ülkenin açık deniz mavi enerji potansiyelinin yaklaşık 1700 MW olduğu tahmin edilmektedir. Rüzgar, dalga ve hidrokinetik türbinlerinin birleştirildiği hibrit tasarım modeli, DSP aracılığıyla yeni projeler için altyapı sağlayarak sürdürülebilir bir mavi ekonomi oluşturulmasına katkı sunmayı amaçlamıştır. Açık Deniz Üzeri Kombine Rüzgar ve Mavi Enerji Santrali için tezde geliştirilen hibrit tasarım modelinin temel deformasyon analizinde basitleştirilmiş üçlü yay yöntemine MCS analizi uygulanarak literatürde API (2014) ve DNV (2014) tarafından önerilen p – y yöntemleriyle Bryne ve diğ. (2015) tarafından önerilen 3 boyutlu sonlu elemanlar modelini kapsayıcı bir çözüm yolu ortaya konmuştur. Kombine hibrit sistemin en önemli tasarım kriterlerinden biri olan yapının doğal frekans analizinde ise hibrit sistem literatürde verilenin aksine birinci dereceden serbestliğe değil ikinci dereceden serbestliğe göre çözülmüştür. Öncelikle, geliştirilen bu yeni çözüm literatürle kıyaslanmış ve mutlak bağıl fark %1,84 bulunarak çözüm metodolojisi gerçekleştirilmiştir. Bunun yanında, yeni hibrit yapının doğal frekans değeri birinci dereceden serbestliğe ve ikinci dereceden serbestliğe göre ayrı ayrı çözümlenerek, aradaki mutlak bağıl farkın %48,64 gibi yadsınamaz bir fark olduğu görülmüştür. Çalışmanın son kısmında ise fizibilite çalışması yapılarak elektrik maliyetinin düzeylendirilmiş değeri (LCOE) 52,90 Eur/MWh olarak elde edilmiştir. Sonuç olarak bu tezde, sistemin sürdürülebilirliği, fizibilitesi ve operasyonel ömrü açısından Karadeniz koşullarında özgün bir mavi enerji tasarım modeli geliştirilmiştir. Hibrit sistemlerin tek dereceli çözümlerinin hatalı olacağı, iki dereceli serbestliğe göre çözümlerin yapılması gerektiği literatürde ilk defa ortaya konmuştur. Toplamda kombine sistemin üreteceği elektrik miktarı 1,68 MW saat olarak bulunmuştur. Dalga enerji üretici için B/C fizibilite değeri 2,17 deniz üzeri rüzgar türbini için ise 1,39 bulunmuştur. Bu sistemlerin kombine kullanılması ile de bu değer B/C=1,40 olarak hesaplanmıştır. Görüldüğü üzere tezde Türkiye'ye özgü geliştirilen yerli ve milli kombine mavi enerji santrali aynı zamanda verimli ve ekonomik açıdan yapılabilir. Bu yapıların tasarımı için de çift dereceli serbestliğe dayalı yeni bir tasarım modeli geliştirilmiştir.

Bilim Kodu : 91112

Anahtar Kelimeler : Deniz saha planlaması, mavi enerji, kombine açık deniz üzeri rüzgar enerji santrali (adres), yenilenebilir enerji kaynak alanı, çok kriterli karar verme

Sayfa Adedi : 323

Danışman : Prof. Dr. Can Elmar BALAS

DEVELOPMENT OF AN OPTIMAL OFFSHORE COMBINED WIND AND BLUE ENERGY PLANT FOR TÜRKİYE

(Ph. D. Thesis)

Abdullah Kürşat DEMİR

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

January 2025

ABSTRACT

Turkey, surrounded by seas on three sides, occupies a maritime area of 462 000 km² under the Blue Homeland doctrine. The necessity of utilizing this area most efficiently and sustainably is an undeniable fact. Within this context, Türkiye must conduct Marine Spatial Planning (MSP) to maximize the benefits of these maritime zones. In this study, a pioneering Multi-Criteria Decision-Making (MCDM) model has been developed for MSP under the Blue Homeland doctrine. The model focuses on offshore spatial planning and utilization, environmental impact, and ecological-biological diversity, considering sustainability and benefit maximization principles. Sub-criteria were modeled through Monte Carlo Simulation (MCS), resulting in a Strategic Planning Model (SPM). Blue energy refers to marine and hydro-based energy sources, such as tidal, wave, hydrokinetic, and offshore wind. It presents a significant opportunity to reduce Turkey's reliance on primary energy sources like natural gas and oil, which are imported, and to increase the diversity of domestic energy sources in the national energy mix. Investigating Turkey's offshore blue energy capacity is critical to aligning it with energy policy objectives. In particular, the Kıyıköy coasts in the Black Sea, one of the Renewable Energy Resource Zone (YEKA) candidate areas, have been identified as suitable for offshore blue energy development. The offshore blue energy potential in this area is estimated to be approximately 1,700 MW. A hybrid design model combining wind and wave turbines aims to contribute to the establishment of a sustainable blue economy by providing infrastructure for new projects through Marine Spatial Planning. In the fundamental deformation analysis of the hybrid design model developed in the thesis for the Offshore Combined Wind and Blue Energy Plant, a simplified triple-spring method was integrated with MCS analysis, employing the p-y methods proposed in the literature by API (2014) and DNV (2014), as well as the 3D finite element model suggested by Bryne et al. (2015). In the natural frequency analysis of the structure by using the comprehensive solution approach presented, which is one of the most critical design criteria for the combined hybrid system, the structure's response was solved based on second-degree freedom, contrary to the first-degree freedom assumption commonly given in the literature. A comparison with the literature revealed a relative absolute error of 1.84%, demonstrating the verification of the solution methodology. On the other hand, the natural frequency value of the new hybrid structure was solved separately for first-degree and second-degree freedoms, revealing a significant relative absolute error of 48.64%. In the final part of the study, a feasibility analysis was conducted, resulting in a levelized cost of electricity (LCOE) of 52.90 EUR/MWh. In conclusion, this thesis presents a unique blue energy design model developed for Black Sea conditions in terms of the system's sustainability, feasibility, and operational life. It is shown for the first time in the literature that single-degree-of-freedom solutions for hybrid systems would be incorrect, and solutions should be made based on two-degree-of-freedom. The total amount of electricity the combined system generates is 1.68 MW hours. The B/C feasibility value for the wave energy generator is 2.17, and for the offshore wind turbine, it is 1.39. By combining these systems, the B/C value is calculated to be 1.40. As seen, the domestically developed, indigenous hybrid blue energy power plant, specific to Turkey, is both efficient and economically viable. A new design model based on two degrees of freedom has also been developed to design these structures.

Science Code : 91112

Key Words : Marine spatial planning, combined offshore wind power plant, blue energy, renewable energy resource area, multi-criteria decision making

Page Number : 323

Supervisor : Prof. Dr. Can Elmar BALAS

TEŞEKKÜR

Çalışma boyunca hiçbir desteğini esirgemeyen değerli danışmanım Prof. Dr. Can Elmar BALAS'a sonsuz şükranlarımı sunarım. Hayatımın her alanına dokunarak, bu süreçte bana kattığı değerli tecrübeleriyle hayatıma yeni bir vizyon ve misyon katmasının kıymeti benim için paha biçilemez bir duygu olarak hayatımın en baş köşesinde kalacaktır. Kendisinin öğrencisi olmaktan duyduğum gururu, mutluluğu bir ömür boyunca unutmayacağım.

Eğitim hayatım boyunca her an desteğini hissettiğim canım annem Reyhan DEMİR'e, kıymetli babam Yusuf DEMİR'e, doktora tez savunmam sırasında sürekli beni motive tutmaya çalışan canım kardeşim Abdülhamid İşbara Alp DEMİR'e,, hem meslektaşım hem de kardeşim Abdülkerim Alperen DEMİR'e teşekkürü bir borç bilirim. Var olsunlar.

Çalışma süresince belki de bana en çok sabır gösteren insan olan değerli hayat arkadaşım Ceyda TOSUN'a da sabırlarından ötürü çok teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	x
ŞEKİLLERİN LİSTESİ.....	xiii
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xxi
1. GİRİŞ.....	1
2. LİTERATÜR TARAMASI	35
3. KOMBİNE ADRES TASARIM MODELİ.....	51
3.1. Tasarım Kriterlerinin Belirlenmesi.....	52
3.2. Temel Türbin Verilerinin Belirlenmesi.....	52
3.3. Çevresel Verilerin Belirlenmesi	52
3.4. Jeolojik Verilerin Belirlenmesi.....	53
3.5. Veri Girdileri Alt Modeli	53
3.6. Ön Tasarım Alt Modeli.....	54
3.7. Temel Analizi Alt Modeli	54
3.8. Taşıma Kapasitesi Alt Modeli	54
3.9. Stabilite Kontrol Alt Modeli.....	54
3.10. Limit Tasarım Alt Modeli.....	55
3.11. Servis Limit Tasarım Alt Modeli	55
3.12. Doğal Frekans Analizi Alt Modeli	56
3.13. Uzun Dönem Davranışı Analiz Alt Modeli	56
3.14. Taşıma Kapasitesi Alt Modeli	57
4. MODELİN KIRKLARELİ – KIYIKÖY UYGULAMASI	59

	Sayfa
4.1. Tasarım Kriterlerinin Belirlenmesi.....	59
4.2. Meteorolojik Verilerin Elde Edilmesi	59
4.2.1. Rüzgar iklimi.....	63
4.2.2. Dalga iklimi.....	70
4.2.3. Akıntı iklimi	77
4.3. Türbinlerin Seçimi.....	80
4.3.1. Rüzgar türbini seçimi	80
4.3.2. Dalga türbini seçimi	82
4.3.3. Akıntı türbini seçimi.....	84
4.4. Zemin Parametrelerinin Belirlenmesi	87
4.5. Deniz Saha Planlaması.....	92
5. KOMBİNE ADRES TASARIMI: DEFORMASYON ANALİZİ	105
5.1. 3 Boyutlu Sonlu Elemanlar Programının Doğrulanması	112
5.2. PLAXIS 3D Ortamında Kazık Davranışlarının İncelenmesi	119
5.3. Açık Deniz Rüzgar Enerjisi Santralinin (ADRES) Ön Boyutlandırması.....	127
5.3.1. Ön boyutlandırma hesaplama aşamaları	128
5.4. Monte Carlo Simülasyonu ile Temel Tasarımı.....	164
6. KOMBİNE ADRES TASARIMI: DOĞAL FREKANS ANALİZİ.....	171
6.1. Deniz Üzeri Rüzgâr Türbininin Doğal Frekans Analizi.....	173
6.1.1. Zemin etkisinin dikkate alınmadığı durum için doğal frekans hesaplamaları	176
6.1.2. Zemin etkisinin dikkate alındığı durum için doğal frekans hesaplamaları	200
6.2. Kombine ADRES doğal frekans analizi.....	217
6.2.1. Zemin etkisinin dikkate alınmadığı durumda ADRES için doğal frekans hesaplaması	217
6.2.2. Zemin etkisinin dikkate alındığı durumda ADRES için doğal frekans hesaplaması	222

	Sayfa
6.2.3. Kombine sistem için tezde önerilen yöntemin doğrulanması.....	240
6.3. Kombine Hibrid Sistem (KHS) doğal frekans analizi.....	244
7. KOMBİNE ADRES FİZİBİLİTE ETÜDÜ	251
8. SONUÇ VE ÖNERİLER	257
KAYNAKLAR.....	263
EKLER.....	279
EK-1. Görünür sabitlik yöntemiyle uzatılmış tekil kazığın Ashes ortamındaki kodu.....	279
EK-2. Geliştirilmiş görünür sabitlik yöntemiyle uzatılmış tekil kazığın Ashes ortamındaki kodu	293
EK-3. Karma yöntemin EXCEL ortamındaki yazılımı.....	308
EK-4. Bağlı yaylar yöntemiyle tekil kazığın Ashes ortamındaki kodu	309
ÖZGEÇMİŞ	323

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 1.1. Kıta sahanlığı ve münhasır ekonomik bölge arasında farklılıklar	18
Çizelge 2.1. Merkezi idarelerce yapılmış bütünleşik kıyı alanları plan ve projeleri.....	36
Çizelge 4.1. Türbin sınıflandırılması için temel parametreler	68
Çizelge 4.2. Tasarımda kullanılacak rüzgar iklimi parametreleri ve değerleri	69
Çizelge 4.3. Etkin dalga kabarma mesafeleri	72
Çizelge 4.4. HYDROTAM ortamından elde edilen K1yıköy bölgesi için dalga verileri, Gumble dağılımı (H_s metre, T_m saniye cinsindendir.)	73
Çizelge 4.5. Kırklareli – K1yıköy bölgesi için dalga parametreleri	77
Çizelge 4.6. DTU 10 MW referans türbininin teknik özellikleri	81
Çizelge 4.7. SeaGen 1,2 MW akıntı türbininin teknik özellikleri	86
Çizelge 4.8. Farklı sıklık değerleri için zemin parametrelerinin değerleri	92
Çizelge 4.9. Açık deniz saha planlaması ve kullanımı alt kriterler puanlaması	95
Çizelge 4.10. Açık deniz saha planlaması ve kullanıma etkisi kriterlerinin MCS'den elde edilen deniz saha planlamasına etkileri ve öngörülen puanları	97
Çizelge 4.11. Çevresel etki alt kriterler puanlaması	98
Çizelge 4.12. Çevresel etki kriterlerinin MCS'den elde edilen deniz saha planlamasına etkileri ve öngörülen puanları	100
Çizelge 4.13. Ekolojik – biyolojik çeşitlilik alt kriterler puanlaması	101
Çizelge 4.14. Ekolojik – biyolojik çeşitlilik kriterlerinin MCS'den elde edilen deniz saha planlamasına etkileri ve öngörülen puanları.....	102
Çizelge 5.1. Dunkirk kumu için Pekleşen Zemin Küçük Birim Deformasyon Modelinin (HS-Small) kalibrasyonu	114
Çizelge 5.2. Dunkirk bölgesinde test edilen (McAdam ve diğ., 2020) ve PLAXIS 3D'de simüle edilen kazıkların geometrik parametreleri	115
Çizelge 5.3. Dunkirk bölgesinde test edilen (McAdam ve diğ., 2020) ve PLAXIS 3D'de simüle edilen kazıkların geometrik parametreleri	119
Çizelge 5.4. $L/D = 2 - 6$ aralığında tasarım durumu için kazık geometrik özellikleri ..	120

Çizelge	Sayfa
Çizelge 5.5. Rölatif sıklık değerlerine göre zemin sınıflandırması	131
Çizelge 5.6. Terzaghi (1955)'e göre yatak katsayısı sabiti değerleri	132
Çizelge 5.7. Temel tasarımı için seçilen yük durumlarını belirleyen çevresel senaryolar.....	134
Çizelge 5.8. Farklı senaryolar için dalga ve rüzgar yükleri	138
Çizelge 5.9. Hidrokinetik türbini gelen kuvvet ve moment değerleri	148
Çizelge 5.10. Hidrokinetik türbin destek yapısına gelen kuvvet ve moment değeri	148
Çizelge 5.11. Dalga enerji üreticine gelen kuvvetler	154
Çizelge 5.12. Yapı parçalarının ağırlıkları.....	155
Çizelge 5.13. Uzun, narin kazıklar için rijitlik katsayıları	158
Çizelge 5.14. Kısa, rijit kazıklar için rijitlik katsayıları	158
Çizelge 5.15. Kombine hibrit sistemin geometrik özellikleri	159
Çizelge 5.16. Analiz yöntemlerine göre dönme ve deformasyon miktarlarının mukayeseleri	161
Çizelge 5.17. MCS analizi için stokastik değişkenler	165
Çizelge 6.1. DTU 10 MW rüzgâr türbininin literatürdeki doğal frekans değerleri.....	192
Çizelge 6.2. DTU 10 MW rüzgâr türbininin bahsedilen yöntemlerle hesaplanan doğal frekans değerleri	193
Çizelge 6.3. DTU 10 MW rüzgâr türbininin özellikleri.....	193
Çizelge 6.4. Tekil kazıklı DTU 10 MW rüzgâr türbininin bahsedilen yöntemlerle hesaplanan doğal frekans değerleri	196
Çizelge 6.5. Farklı yöntemlerle zemin etkisi dikkate alınarak hesaplanan doğal frekans değerleri	216
Çizelge 6.6. OC 3, 2. Faz için doğal frekans değerleri	243
Çizelge 6.7. KHS kombine sistemi için doğal frekans değerleri ve bağıl farkları	244
Çizelge 6.8. KHS türbinler için frekans aralıkları	245
Çizelge 6.9. KHS türbinleri için yenilenmiş frekans aralıkları	246

Çizelge	Sayfa
Çizelge 6.10. Optimum KHS için yapı bileşenlerinin eski ve yeni değerleri.....	248
Çizelge 7.1. Deniz üzeri rüzgar türbini maliyet dağılımı	251
Çizelge 7.2. Kombine hibrit sistemin hidrokinetik türbin ve dalga enerji üretici hariç maliyeti	252



ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 1.1. Sektörlere göre elektrik tüketimi	1
Şekil 1.2. Kaynaklara göre kurulu güç.....	2
Şekil 1.3. Deniz üzeri rüzgar türbini boyutlarının zamanla değişimi	3
Şekil 1.4. Dünya üzerindeki DRES'lerin yıllara göre kümülatif kurulu kapasitesi	4
Şekil 1.5. Dünya üzerindeki kurulu DRES güç kapasitesi.....	4
Şekil 1.6. Türkiye'nin kıyı su alanlarındaki yıllık rüzgar enerjisi potansiyelinin ECMWF ERA5 arşiv verilerine dayalı haritası.....	7
Şekil 1.7. Türkiye'nin kıyı su alanlarındaki yıllık dalga enerjisi potansiyelinin ECMWF ERA5 arşiv verilerine dayalı haritası.....	7
Şekil 1.8. Hidrokinetik ve rüzgar türbinlerinin güç yoğunluğu açısından karşılaştırılması	8
Şekil 1.9. Enerji tesisi tipine göre MW başına yatırım maliyeti	9
Şekil 1.10. BKAY ve bütüncül yaklaşım	13
Şekil 1.11. İnsan odaklı katılımcı bir BKAY döngüsü.....	14
Şekil 1.12. Kıta sahanlığı.....	15
Şekil 1.13. Deniz yetki alanları.....	17
Şekil 1.14. DSP ve sektörel planlamalar	19
Şekil 1.15. Adım adım DSP yaklaşımı.....	20
Şekil 1.16. Sürekli DSP döngüsü	21
Şekil 1.17. BKAY ve DSP arasındaki bağlantı	22
Şekil 1.18. KDE'nin şematik gösterimi	25
Şekil 1.19. Mavi vatan doktrini kapsamında Türkiye'nin su sınırları, Mavi Vatan.....	25
Şekil 2.1. Türkiye'de BKAY ve planlaması.....	35
Şekil 2.2. 3. nesil BKAY planlama süreci.....	38
Şekil 2.3. Deniz üzeri rüzgar türbini temel türleri ve uygulanabilir su derinlikleri.....	40
Şekil 2.4. PISA projesinin temel yapıtaşları	42

Şekil	Sayfa
Şekil 2.5. Zemin modeli.....	43
Şekil 3.1. Kombine ADRES tasarım modeli akış şeması.....	51
Şekil 3.2. Veri girdileri alt modelinin akış şeması.....	54
Şekil 3.3. Çalışma kapsamında deformasyon analizi için geliştirilen akış şeması.....	58
Şekil 4.1. Kırklareli – Kıyıköy bölgesinin Google Earth görüntüsü.....	60
Şekil 4.2. Kıyıköy bölgesinin batimetri haritası (Balas ve Balas, 2020).....	60
Şekil 4.3. HYDROTAM ortamında kombine hibrid sistemin koordinatlar.....	61
Şekil 4.4. Google Earth ortamında kombine hibrid sistem koordinatları.....	62
Şekil 4.5. Kıyıköy rüzgar noktası konumu, ECMWF Era Interim 0,25° (41,75 N ; 28,25 E).....	63
Şekil 4.6. 2000 – 2021 yılları arasında ECMWF verilerine göre yıllık ve mevsimlik rüzgar gülleri.....	64
Şekil 4.7. Aylık ortalama ve en uç değer rüzgar hızları.....	64
Şekil 4.8. Yıllara göre en yüksek rüzgar hızları ve yönleri.....	66
Şekil 4.9. HYDROTAM ortamında Kıyıköy uzun dönem rüzgar istatistiği, Weibull dağılımı.....	66
Şekil 4.10. Frøya rüzgar spektrumu.....	70
Şekil 4.11. Kırklareli – Kıyıköy için dalga kabarma mesafesi.....	71
Şekil 4.12. 2000 – 2021 yılları arasında ECMWF verilerine göre yıllık ve mevsimlik dalga gülleri.....	72
Şekil 4.13. Kırklareli – Kıyıköy bölgesi için en büyük değer dalga istatistiği, Gumble dağılımı.....	74
Şekil 4.14. Belirgin dalga yüksekliği ile periyot arasındaki bağıntı.....	75
Şekil 4.15. Kombine hibrit sistemin tasarlandığı noktada tüm aylar için yüzey akıntı gülü.....	78
Şekil 4.16. Kombine hibrit sistemin tasarlandığı noktada tüm aylar için taban akıntı gülü.....	79
Şekil 4.17. 10/01/2021 tarihli akıntı verisine göre yüzey akıntı yörüngesi.....	80
Şekil 4.18. DTU 10 MW referans türbini için hız - güç ve hız - etki eğrileri.....	82

Şekil	Sayfa
Şekil 4.19. Dalga enerji dönüştürücüleri.....	82
Şekil 4.20. YETI dalga enerji dönüştürücüsü	84
Şekil 4.21. SeaGen 1,2 MW akıntı türbini hız - güç eğrisi	85
Şekil 4.22. SeaGen 1,2 MW akıntı türbinin görünümü.....	86
Şekil 4.23. Kırklareli - Kıyıköy balıkçı barınağı yakınındaki temel sondaj loğu.....	88
Şekil 4.24. Farklı yoğunluktaki farklı kumlar için G_0^{ref} değerlerinin karşılaştırılması.....	90
Şekil 4.25. Açık deniz saha planlaması ve kullanımı puanının MCS benzeşimi sonucunda elde edilen histogram	96
Şekil 4.26. Çevresel etki puanının MCS benzeşimi sonucunda elde edilen histogram.....	99
Şekil 4.27. Ekolojik – biyolojik çeşitlilik puanının MCS benzeşimi sonucunda elde edilen histogram	101
Şekil 4.28. Deniz saha planlaması puanının MCS benzeşimi sonucunda elde edilen histogram.....	103
Şekil 4.29. Çok kriterli karar verme stratejik planlama modeli.....	104
Şekil 5.1. Broms (1964)'e göre serbest başlıklı yanal yüklü kazıkta yenilme modları, solda kısa kazık ve serbest cisim dönmesi, sağda uzun kazık ve plastik mafsall oluşumu	105
Şekil 5.2. Kum zemin ortamında kısa kazıklar için kazık davranışı farklılıkları	106
Şekil 5.3. Kum zemin ortamında uzun kazıklar için kazık davranışı farklılıkları	106
Şekil 5.4. Önerilen 1 boyutlu sonlu model analiz yöntemi.....	107
Şekil 5.5. Kazık dış cidarındaki düşey kayma gerilmelerinin kesitlerde oluşturduğu yayılı moment.....	108
Şekil 5.6. Kum zeminde zemin reaksiyonlarının münferit ve kümülatif etkileri	109
Şekil 5.7. 1 boyutlu tasarım yöntemini uygulamak için kullanılan iki farklı yöntem.....	110
Şekil 5.8. Tasarım metotlarının farklı L/D oranlarındaki uygulamaları	111
Şekil 5.9. PISA saha deneyleri için geometrik parametreler	112
Şekil 5.10. CPT konik uç direnci profili	113

Şekil	Sayfa
Şekil 5.11. Dunkirk kumu için konsolide drenajlı üç eksenli basınç testlerinin sonuçları	113
Şekil 5.12. PLAXIS 3D ortamında Dunkirk saha deneylerinin tasarlanması (çözüm ağının oluşturulması).....	115
Şekil 5.13. PLAXIS 3D ortamında Dunkirk saha deneylerinin tasarlanması (zemin parametrelerinin belirlenmesi)	116
Şekil 5.14. OriginPro yazılımı ile Dunkirk kumunda yapılan DL1 saha deneyinin deplasman sonuçlarının elde edilmesi.....	117
Şekil 5.15. OriginPro programı ile Dunkirk kumunda yapılan DM4 saha deneyinin deplasman sonuçlarının elde edilmesi.....	117
Şekil 5.16. DL1 kazığının saha deneylerinden elde edilen deformasyon değerleriyle 3D PLAXIS ortamında yapılan analizlerden elde edilen sonuçların mukayesesi	118
Şekil 5.17. DM4 kazığının saha deneylerinden elde edilen deformasyon değerleriyle 3D PLAXIS ortamında yapılan analizlerden elde edilen sonuçların mukayesesi	118
Şekil 5.18. $L/D = 2 - 6$ aralığında tasarım durumu için çözüm aralığı	120
Şekil 5.19. Çalışma kapsamında yapılan $L/D = 2$ için 1B analiz, API (2014) p-y eğrileri ve PLAXIS 3D ortamından elde edilen yük deformasyon eğrileri	121
Şekil 5.20. Çalışma kapsamında yapılan $L/D = 3$ için 1B analiz, API (2014) p-y eğrileri ve PLAXIS 3D ortamından elde edilen yük deformasyon eğrileri	121
Şekil 5.21. Çalışma kapsamında yapılan $L/D = 4$ için 1B analiz, API (2014) p-y eğrileri ve PLAXIS 3D ortamından elde edilen yük deformasyon eğrileri	122
Şekil 5.22. Çalışma kapsamında yapılan $L/D = 5$ için 1B analiz, API (2014) p-y eğrileri ve PLAXIS 3D ortamından elde edilen yük deformasyon eğrileri	122
Şekil 5.23. Çalışma kapsamında yapılan $L/D = 6$ için 1B analiz, API (2014) p-y eğrileri ve PLAXIS 3D ortamından elde edilen yük deformasyon eğrileri	123
Şekil 5.24. Çalışma kapsamında yapılan $L/D = 7$ için 1B analiz, API (2014) p-y eğrileri ve PLAXIS 3D ortamından elde edilen yük deformasyon eğrileri	124

Şekil	Sayfa
Şekil 5.25. Çalışma kapsamında yapılan $L/D = 8$ için 1B analiz, API (2014) p-y eğrileri ve PLAXIS 3D ortamından elde edilen yük deformasyon eğrileri	124
Şekil 5.26. Çalışma kapsamında yapılan $L/D = 9$ için 1B analiz, API (2014) p-y eğrileri ve PLAXIS 3D ortamından elde edilen yük deformasyon eğrileri	125
Şekil 5.27. Çalışma kapsamında yapılan $L/D = 10$ için 1B analiz, API (2014) p-y eğrileri ve PLAXIS 3D ortamından elde edilen yük deformasyon eğrileri	125
Şekil 5.28. $D_r = 30$ için elde edilen yük deformasyon eğrileri.....	126
Şekil 5.29. $D_r = 70$ için elde edilen yük deformasyon eğrileri.....	127
Şekil 5.30. ADRES ön boyutlandırması.....	127
Şekil 5.31. Üç yaylı zemin modeli	128
Şekil 5.32. Halihazırda kurulu olan bazı rüzgar türbinlerinin kazık et kalınlığı değerleri	130
Şekil 5.33. Horns Rev deniz üzeri rüzgar türbininden ölçülen ve hesaplanan zemin kotundaki eğilme momenti değerleri, ölçülen değerler Hald ve diğ. (2009) tarafından verilmiştir	137
Şekil 5.34. Hald ve diğ. (2009) tarafından Horns Rev'deki Vestas V80 türbininde ölçülen ve yaklaşımda bulunulan itki katsayıları	137
Şekil 5.35. Hidrostatik basınç dağılımı	150
Şekil 5.36. Dalga iletimi.....	150
Şekil 5.37. Bağlama zinciri profili	152
Şekil 5.38. Farklı zemin rijitlik profilleri	157
Şekil 5.39. Kombine türbin sisteminin ana taşıyıcı unsurları ve detayları.....	160
Şekil 5.40. Kombine sistemin görselleştirilmiş hali.....	160
Şekil 5.41. Nihai limit durumu için analiz yöntemlerinden elde edilen deplasman sonuçları.....	161
Şekil 5.42. API p – y eğrileri ile 3B analiz sonuçları arasındaki farklılıklar	162
Şekil 5.43. Kısa kazıklarda analiz yöntemlerinde kazık davranışları	162
Şekil 5.44. Servis limit durumu için analiz yöntemlerinden elde edilen deplasman sonuçları	163

Şekil	Sayfa
Şekil 5.45. Kritik göçme derinliği ile gömülü kazık derinliği arasındaki bağıntı	163
Şekil 5.46. Deformasyon değerlerinin olasılık yoğunluk fonksiyonu.....	165
Şekil 5.47. Dönme değerlerinin olasılık yoğunluk fonksiyonu.....	166
Şekil 5.48. Farklı analizlerden elde edilen sonuçlar ve basitleştirilmiş üçlü yay yöntemine MCS uygulanmasıyla elde edilen zarf eğrisinin birlikte gösterilmesi	167
Şekil 5.49. Farklı analizlerden elde edilen sonuçlar ve basitleştirilmiş üçlü yay yöntemine MCS uygulanmasıyla elde edilen zarf eğrisinin birlikte gösterilmesi	168
Şekil 5.50. Göçme durumunun MCS simülasyon sonucunda gösterimi.....	169
Şekil 5.51. MCS simülasyonundan elde edilen sonucun ters kümüle sıklığı.....	169
Şekil 6.1. Dinamik yüklerin frekans spektrumu tasarımının seçimi.....	171
Şekil 6.2. Kule üzerindeki kanat gölgeleme yükünden oluşan yükleme (3P). Sol taraftaki şekil kanatların kuleyi gölgelemediği durumdaki kule üzerindeki yükü göstermektedir	173
Şekil 6.3. Doğal frekans analizinin yöntemleri.....	174
Şekil 6.4. Deniz üzeri rüzgâr türbininin basitleştirilmesi	176
Şekil 6.5. Değişken kesitli ankastre mesnetli kiriş	177
Şekil 6.6. Deniz üzeri rüzgâr türbininin dinamik modeli.....	181
Şekil 6.7. μ 'ya karşılık gelen J değerleri	184
Şekil 6.8. Üç kısma ayrılan yapı profili	185
Şekil 6.9. Yapının doğal frekansının hesaplanmasında kullanılan zemin etkisini dikkate almayan model.....	188
Şekil 6.10. DTU 10 MW rüzgâr türbininin hem tekil kazık olmaması hem de zemin etkisinin dikkate alınmadığı durum için Ashes ortamında modellenmesi	192
Şekil 6.11. DTU 10 MW rüzgâr türbininin önden görünüşü	194
Şekil 6.12. Kule tabanı, geçiş parçası ve tekil kazık arasındaki bağlantının temsili, (a) Sürekli bağlantı, (b) Beton dolgulu bağlantı.....	195

Şekil	Sayfa
Şekil 6.13. DTU 10 MW rüzgâr türbininin tekil kazık olması fakat zemin etkisinin dikkate alınmadığı durum için Ashes ortamında modellenmesi	196
Şekil 6.14. Ashes ortamında rüzgârın modellenmesi	198
Şekil 6.15. Ashes ortamında dalganın modellenmesi	199
Şekil 6.16. Ashes ortamında akıntının modellenmesi	199
Şekil 6.17. Ankastre mesnet yönteminde kullanılan model (solda) ve zeminin elastisitesinin görünür sabitlik (GS) metodu ile dikkate alındığı model (sağda)	200
Şekil 6.18. Görünür sabitlik yöntemiyle sistemin Ashes ortamında modellenmesi	202
Şekil 6.19. Geliştirilmiş görünür sabitlik yöntemi	204
Şekil 6.20. Tekil kazıklı deniz üzeri rüzgâr türbini modeli	206
Şekil 6.21. Sanal iş	207
Şekil 6.22. Tepeden yüklü yapının deformasyonu	209
Şekil 6.23. Eşdeğer sistem	211
Şekil 6.24. Yay sabitlerinin yöntemlere bağlı olarak derinlikle değişimi	215
Şekil 6.25. Ashes ortamında yatak katsayısı yöntemi ile yapılan modelleme	215
Şekil 6.26. İkinci dereceden serbestliğe sahip kombine ADRES ve serbest cisim diyagramı	217
Şekil 6.27. Kombine ADRES deformasyon biçimi	222
Şekil 6.28. Eşdeğer kombine sistem	224
Şekil 6.29. Uç noktasında W kütesine sahip ankastre mesnetli sistem	228
Şekil 6.30. İkinci dereceden serbestliğe sahip ankastre mesnetli kombine sistem	230
Şekil 6.31. Kirişlerin kütlelerini temsil eden aralıkların gösterimi	239
Şekil 6.32. Strathclyde üniversitesindeki araştırmacılar tarafından önerilen kombine sistemin görseli	241
Şekil 6.33. Strathclyde üniversitesindeki araştırmacılar tarafından önerilen kombine sistemin ANSYS ortamında modellenmesi	242
Şekil 6.34. OC 3, 2. Faz için zemin profili	243

Şekil	Sayfa
Şekil 6.35. KHS türbinlerinin frekans değerleri.....	245
Şekil 6.36. KHS türbinlerinin yenilenmiş frekans değerleri	246
Şekil 6.37. KHS için dinamik yüklerin frekans spektrumu tasarımının seçimi	247
Şekil 6.38. Optimum KHS için dinamik yüklerin frekans spektrumu tasarımının seçimi	247
Şekil 6.39. Kombine hibrit sistem nihai tasarımı	248
Şekil 6.40. Kombine hibrit sistemin nihai tasarımı için MCS analizi.....	249



SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler	Açıklamalar
A_R	Rotor alanı
A'	Rüzgarın sürüklemeye sebebiyet verdiği alan
a_x	Yatay dalga orbital ivmesi
B	Cismin genişliği
C	Weibull dağılımı şekil parametresi
C_D	Sürüklenme katsayısı
C_{Dw}	Rüzgar sürüklenme katsayısı
C_m	Atalet katsayısı
C_R	Dalga iletim katsayısı
C_T	Dalga iletim katsayısı
c'_{ref}	Kohezyon değeri
D_b	Kulenin taban noktasındaki çapı
D_P	Tekil kazığın çapı
D_s	Geçiş yapısı çapı
D_t	Kulenin tepe noktasındaki çapı
D_T	Rüzgâr türbini kulesinin ortalama çapı
dF_{atalet}	Birim uzunluğa gelen atalet kuvveti
dF_{dalga}	Birim uzunluğa gelen dalga kuvveti
EI	Rüzgâr türbini kulesinin eğilme rijitliği
EI_{GS}	Uzatılan kısmın eğilme rijitliği
EI_{η}	Kulenin eşdeğer eğilme rijitliği
EI_t	Kulenin tepe noktasının eğilme rijitliği değeri
E_p	Kazığın elastisite modülü
E_{s0}	Kazık çapı kadar derinlikteki zemin rijitliği
E_{50}^{ref}	Drenajlı standart üç eksenli yükleme testindeki sekant rijitlik
E_{oed}^{ref}	Ödometre yüklemesindeki tanjant rijitlik
E_s	Zemin elastisite modülü

Simgeler	Açıklamalar
E_T	Rüzgâr türbini kulesinin elastisite modülü
E_{ur}^{ref}	Yükleme – boşaltma rijitliği
e	Mevcut boşluk oranı
e_{max}	Maksimum boşluk oranı
e_{min}	Minimum boşluk oranı
F_A	Atalet kuvveti
F_b	Rüzgar türbininin göbeğine gelen kuvvet
F_R	Temelin yanal yük taşıma kapasitesi
F_S	Sürüklemeye kuvveti
f	Frekans değeri
f_{AM}	Ankastre mesnetli giriş sisteminin frekans değeri
$f_{AM,T}$	Yapının tek parça halinde olması halindeki doğal frekans değeri
$f(q)$	Kule tepe noktasındaki kule çapı ile kule taban noktasındaki kule çapının oranına bağlı bir fonksiyon
G_0^{ref}	Zemin için referans kayma modülü
H	Kazığa uygulanan kuvvet
H_i	Gelen dalga yüksekliği
H_m	Maksimum dalga yüksekliği
$H_{m,1}$	1 yıllık maksimum dalga yüksekliği
$H_{m,50}$	50 yıllık maksimum dalga yüksekliği
H_R	Yansıyan dalga yüksekliği
H_s	Belirgin dalga yüksekliği
$H_{s,50}$	50 yıllık belirgin dalga yüksekliği
H_T	İletilen dalga yüksekliği
I_p	Kazığın atalet momenti
I_{ref}	15 m/s hızda referans türbülans yoğunluğunun beklenen değeri
I_T	Rüzgâr türbin kulesinin ortalama atalet momenti
J	Rotor – nasel birleşiminin atalet momenti
ρ_{su}	Suyun yoğunluğu
K_h	Zincirle duba arasındaki noktaya bağlama ankrajı arasındaki yatay mesafe
K_L	Zemin yanal rijitlik katsayısı

Simgeler	Açıklamalar
K_R	Zemin dönme rijitliği katsayısı
K_V	Zemin dikey rijitlik katsayısı
K_{LR}	Zemin çapraz rijitlik katsayısı
K_0	Sükunetteki toprak basıncı katsayısı
k	Weibull dağılımı boyut parametresi
k_h	Yatay zemin reaksiyon modülü
k_T	Yapının tek parça halinde olması halindeki yay sabiti
L	Kazık uzunluğu
L_{GS}	Uzatılma miktarı
L_k	Türbülans integral uzunluk boyutu
L_P	Gömülü kazık derinliği
L_S	Zemin seviyesi üzerindeki platform yüksekliği
L_T	Rüzgâr türbini kulesinin uzunluğu
M	Zemin kotundaki moment
M_R	Temelin moment taşıma kapasitesi
m	Rijitliğin gerilme seviyesine bağlılık oranı
$m_{geçiş}$	Geçiş parçasının kütlesi
m_1	Rotor – nasel (gövde) birleşiminin ağırlığı
$m_{kazık}$	Zemin içerisindeki tekil kazığın kütlesi
m_{kule}	Kulenin ana kütlesi
m'_{kule}	İdealize edilmiş rüzgar türbini kulesinin ağırlığı
m_{RNA}	Rotor – nasel birleşiminin kütlesi
m_T	Rüzgâr türbini kulesinin ağırlığı
m^*	Genelleştirilmiş kütle ifadesi
N_d	3 saatlik periyotta meydana gelen dalga sayısı
n_h	Yatay zemin reaksiyon katsayısı
P	Yatay dış kuvvet
$P(V)$	Rüzgar hızının aşılma olasılığı
p_{ref}	Referans gerilme seviyesi
Q	Genelleştirilmiş kuvvet
q	Genelleştirilmiş deformasyon
Re	Reynolds sayısı

Simgeler	Açıklamalar
R_f	Zemin modülü azalması
S	Deniz derinliği
$S(f)$	Spektrum değeri
T_A	Bağlama ankrajının tutma gücü
T_c	Yüzen cismin zincire bağlama noktasındaki gerilme
T_m	Maksimum dalga periyodu
T_h	Rotor seviyesindeki rüzgar itki kuvveti
t_g	Beton harcın kalınlığı
t_p	Tekil kazığın duvar kalınlığı
t_T	Rüzgâr türbini kulesinin ortalama duvar kalınlığı
t_{TP}	Geçiş yapısının et kalınlığı
U	Rüzgar hızı
$U_{akıntı}$	Akıntı hızı
U_{out}	Türbin kapanma rüzgar hızı
U_R	Nominal rüzgar hızı seviyesi
$U(z)$	Deniz seviyesinden z mesafe uzaklıktaki hız değeri
$U(z_r)$	Deniz seviyesinden z_r mesafe uzaklıktaki referans hız değeri
u'	Rüzgar hızının türbülans bileşeni
u_{ETM}	Ekstrem türbülans durumunda maksimum türbülanslı rüzgar hızı bileşeni
u_{NTM}	Normal türbülans durumunda maksimum türbülanslı rüzgar hızı bileşeni
u_{ort}	Uzun dönem ortalama rüzgar hızı
u_x	Yatay dalga orbital hızı
V	Rüzgar hızı
V_a	Bağlama ankrajına etkiyen düşey kuvvet
V_{ave}	Yıllık ortalama rüzgar hızı
V_b	Dubayla zincir arasındaki noktaya etkiyen düşey kuvvet
V_C	Toplam deformasyon enerjisi
V_{ref}	10 dakika ortalama referans rüzgar hızı
$V_{ref,T}$	Tropikal tayfunlara maruz kalan bölgelerde 10 dakika ortalama referans rüzgar hızı
V_w	Rüzgar hızı

Simgeler	Açıklamalar
W	Yapının ağırlığı
w	Yatay parçacık hızı
$w(0)$	Rüzgâr türbini kulesinin tepe noktasındaki deformasyon değeri
w^*	Yatay parçacık ivmesi
w^*	Birim uzunlukta batık zincir ağırlığı
X_{eff}	Efektif dalga kabarma uzunluğu
X_i	Dalga kabarma uzunluğu
$x(t)$	Hareket fonksiyonu
z	Deniz seviyesinden olan mesafe
z_r	Hız ölçümü yapılan referans düzeyin deniz seviyesinden uzaklığı
α	Kuvvet yasasının üstel değeri
Λ_1	Uzunlamasına türbülans ölçeği parametresi
ρ_{hava}	Havanın yoğunluğu
θ_i	Derece artım miktarı
ρ_{su}	Deniz suyunun yoğunluğu
γ_{unsat}	Zeminin suya doymun olmadığı birim hacim ağırlığı
γ_{sat}	Zeminin tamamen suya doymun olduğu birim hacim ağırlığı
ν_{ur}	Boşaltma ve yeniden yükleme için Poisson oranı
$\gamma_{0,7}$	Modül azalma eğrisini, tekrarlı yük altında kayma gerilme seviyesi ile ilişkilendiren parametre
φ'	Efektif içsel sürtünme açısı
ψ	Dilatans açısı
ρ_{hava}	Havanın yoğunluğu
$\sigma_{U,NTM}$	Normal türbülans koşullarında rüzgar hızının standart sapması
$\sigma_{U,ETM}$	Ekstrem türbülans koşullarında rüzgar hızının standart sapması
Φ	Kümülatif dağılım fonksiyonu
$\sigma_{U,c}$	Rüzgar hızının karakteristik standart sapması
η	Dalga yüzey profili
θ_1	Zincirin, zincirle bağlama ankrajı arasındaki noktayla yatay düzlem arasında yaptığı açı
θ_2	Zincirin, dubayla bağlama zinciri arasındaki noktayla yatay düzlem arasında yaptığı açı

Simgeler	Açıklamalar
γ'	Derinlik boyunca sabit olduğu varsayılan kohezyonsuz zeminin batık birim hacim ağırlığı
ρ	Kazık başının deformasyonu
θ	Kazık başının dönmesi
η_L	Boyutsuz yatay rijitlik parametresi
η_R	Boyutsuz dönme rijitlik parametresi
η_{LR}	Boyutsuz çapraz rijitlik parametresi
ω	Dairesel frekans değeri
ρ_T	Rüzgâr türbini kulesinin yoğunluğu
χ	Eğilme rijitliği oranı
ψ	Alt destek yapısı uzunluğunun rüzgâr türbini kulesi uzunluğuna oranı
δ_{uu}	Birim yatay kuvvet kaynaklı yatay yer değiştirme
$\delta_{u\theta}$	Birim yatay kuvvet kaynaklı dönme
$\delta_{\theta u}$	Birim moment tarafından oluşturulan dönme
$\delta_{\theta\theta}$	Birim moment tarafından oluşturulan dönme
δ_L	Yatay yöndeki elastisite
δ_R	Dönme elastisitesi
δ_{LR}	Çapraz yöndeki elastisite

Kısaltmalar	Açıklamalar
AB	Avrupa Birliği
ADRES	Açık Deniz Rüzgar Enerji Santrali
AHP	Analitik Hiyerarşi Prosesi
API	American Petroleum Institute – Amerikan Petrol Enstitüsü
ASELSAN	Askeri Elektronik Sanayi
BKAY	Bütünleşik Kıyı Alanları Yönetimi
BM	Birleşmiş Milletler
BMDHS	Birleşmiş Milletler Deniz Hukuku Sözleşmesi
CBS	Coğrafi Bilgi Sistemleri
CDF	Kümülatif Dağılım Fonksiyonu
CPT	Cone Penetration Test – Konik Penetrasyon Testi

Kısaltmalar	Açıklamalar
ÇKKV	Çok Kriterli Karar Verme
ÇŞİDB	Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı
DNV	Det Norske Veritas
DRES	Deniz Üstü Rüzgar Enerji Santrali
DSP	Deniz Saha Planlaması
DPT	Devlet Planlama Teşkilatı
DTU	Danmarks Tekniske Universitet – Danimarka Teknik Üniversitesi
DÜRED	Deniz Üzeri Rüzgar Enerjisi Derneği
E	East – Doğu
EC	European Commission – Avrupa Komisyonu
EC DG MARE	European Commission Directorate General for Maritime Affairs and Fisheries – AB Denizcilik İşleri ve Balıkçılık Genel Müdürlüğü
ECMWF	European Centre for Medium Range Weather Forecasts – Avrupa Orta Vadeli Hava Tahminleri Merkezi
EMODnet	European Marine Observation and Data Network – Avrupa Deniz Gözlem ve Veri Ağı
ENE	East North East – Doğu Kuzey Doğu
EOG	Ekstrem Ani Esinti
ESE	East South East – Doğu Güney Doğu
ESMAP	Energy Sector Management Assistance Program – Enerji Sektörü Yönetim Yardım Programı
ESS	Ekstrem Deniz Durumu
ETM	Ekstrem Türbülans Modeli
EWB	1 yıllık ekstrem dalga yüksekliği
FLS	Fatigue Limit State – Yorulma Limit Durum
GDSM	General Dunkerque Sand Model – Genel Dunkirk Kum Modeli
GS	Görünür sabitlik
GSYİH	Gayrı Safi Yurt İçi Hasıla
GW	GigaWatt
GWEC	Global Wind Energy Council – Küresel Rüzgar Enerjisi Konseyi
HARM	Hyperplastic Accelerated Ratcheting Model – Hiperplastik Hızlandırılmış Ratcheting Modeli
HAWC2	Horizontal Axis Wind turbine simulation Code 2nd generation – İkinci nesil yatay eksenli rüzgâr türbini simülasyon kodu

Kısaltmalar	Açıklamalar
HS	Hardening Soil – Pekleşen Zemin
HYDROTAM – 3D	Three – Dimensional Hydrodynamic Transport Model – Üç Boyutlu Hidrodinamik Taşınım Modeli
HWL	Maksimum Su Seviyesi
IEC	International Electrotechnical Commission – Uluslararası Elektroteknik Komisyonu
IOC	Intergovernmental Oceanographic Commission – Hükümetler arası Okyanus Bilimsel Komisyonu
JONSWAP	Joint North Sea Wave Project – Kuzey Denizi Ortak Dalga Projesi
KDE	Kara – Deniz Etkileşimi
KHS	Kombine Hibrit Sistem
kW	KiloWatt
LSI	Land – Sea Interaction
MAP	Mediterranean Action Plan – Akdeniz Eylem Planı
MCS	Monte Carlo Simulation – Monte Carlo Simülasyonu
MCT	Marine Current Turbines – Deniz Akıntısı Türbinleri
MEB	Münhasır Ekonomik Bölge
MEDCOAST	Mediterranean Coast Foundation – Akdeniz Kıyı Vakfı
MoDeTo	Monopile Designer Tool – Tekil Kazık Tasarım Aracı
MW	MegaWatt
MWL	Ortalama Su Seviyesi
N	North – Kuzey
NATO	North Atlantik Treaty Organization – Kuzey Atlantik Antlaşma Paktı
NBD	Numerical Based Design – Nümerik Tabanlı Tasarım
NE	North East – Kuzey Doğu
NNE	North North East – Kuzey Kuzey Doğu
NNW	North North West – Kuzey Kuzey Batı
NREL	National Renewable Energy Laboratory – Ulusal Yenilenebilir Enerji Laboratuvarı
NTM	Normal Türbülans Modeli
NW	North West – Kuzey Batı
NWH	Normal Dalga Yüksekliği
OC	Offshore Code Comparison Collaboration – Açık Deniz Kod Karşılaştırma Birliği

Kısaltmalar	Açıklamalar
OCDI	The Overseas Coastal Area Development Institute of Japan – Japonya Denizaşırı Kıyı Bölgesi Geliştirme Enstitüsü
OREC	Offshore Renewable Energy Catapult – Açık Deniz Yenilenebilir Enerji İvmelendirme Merkezi
PAP / RAC	Priority Actions Programme Regional Activity Centre – Birleşmiş Milletler Çevre Programı Akdeniz Eylem Planı Öncelikli Eylem Programı Bölgesel Aktivite Merkezi
PIANC	World Association for Waterborne Transport Infrastructure – Su Yolu Taşımacılığı Altyapısı için Dünya Birliği
PISA	Pile Soil Analysis – Kazık Zemin Analizi
RBD	Rule Based Design – Kural Tabanlı Tasarım
RD	Relative Density – Rölatif Sıklık
S	South – Güney
SANISAND – MS	Simple ANIsotropic SAND model with Memory Surface – Basit ANİzotropik Kum Modeli ile Bellek Yüzeyi
SE	South East – Güney Doğu
SHOD	Seyir Hidrografi ve Oşinografi Dairesi
SIMWESTMED	Supporting Maritime Spatial Planning in the Western Mediterranean Region – Batı Akdeniz Bölgesinde Deni Saha Planlamasının Desteklenmesi
SLS	Serviceability Limit State – Servis Limit Durum
SPM	Stratejik Planlama Modeli
SSE	South South East – Güney Güney Doğu
SSW	South South West – Güney Güney Batı
SUPREME	Supporting Maritime Spatial Planning in the Eastern Mediterranean – Doğu Akdeniz’de Deniz Saha Planlamasının Desteklenmesi
SW	South West – Güney Batı
TSE	Türk Standartları Enstitüsü
TurbSim	Turbulence Simulation – Türbülans Simülasyonu
TWh	TeraWatt saat
ULS	Ultimate Limit State – Nihai Limit Durum
UNEP	United Nations Environment Programme – Birleşmiş Milletler Çevre Programı

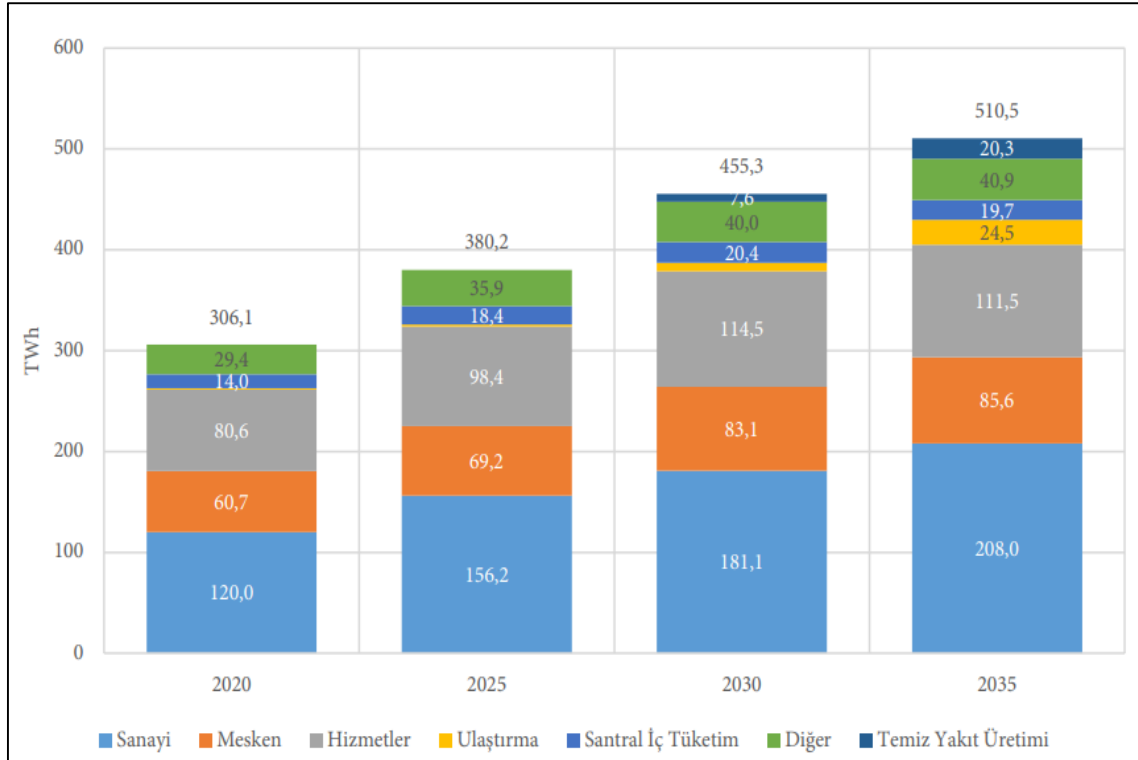
Kısaltmalar**Açıklamalar**

UNESCO	United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization – Birleşmiş Milletler Eğitim, Bilim ve Kültür Kurumu
W	West – Batı
WFO	World Forum Offshore Wind – Dünya Açık Deniz Rüzgar Forumu
WNW	West North West – Batı Kuzey Batı
WSW	West South West – Batı Güney Batı
YASS	Yeraltı Su Seviyesi
YEKA	Yenilenebilir Enerji Kaynak Alanları



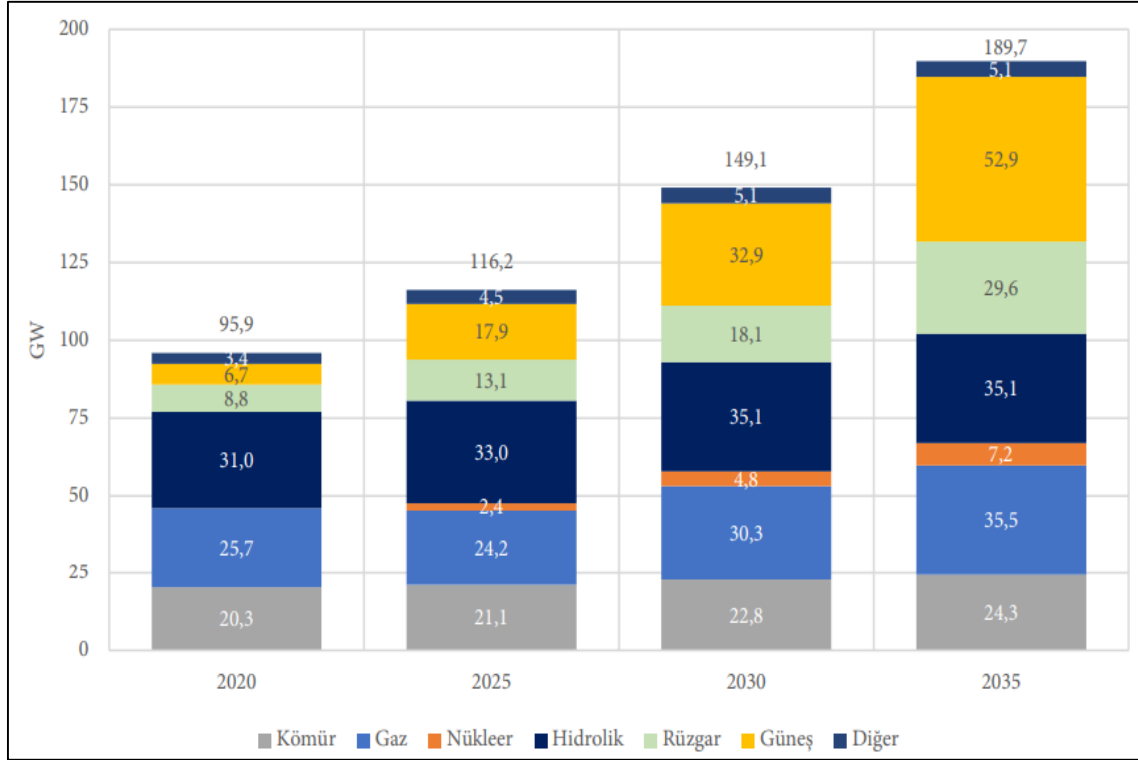
1. GİRİŞ

Dünya’da ve ülkemizde artan nüfus, gelişen sanayi ve teknolojiye bağlı olarak enerjiye olan ihtiyaç gitgide artmaktadır. Türkiye Cumhuriyeti Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı’nın verilerine göre Türkiye’nin elektrik enerjisi tüketimi 2022 yılında 330,3 TWh olarak gerçekleşmiş olup, Şekil 1.1’de verilen Türkiye Ulusal Enerji Planı çalışmasının sonuçlarına göre elektrik tüketiminin 2025 yılında 380,2 TWh, 2030 yılında 455,3 TWh, 2035 yılında ise 510,5 TWh seviyesine ulaşması öngörülmektedir (Türkiye Cumhuriyeti Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, 2022)



Şekil 1.1. Sektörlere göre elektrik tüketimi (Türkiye Cumhuriyeti Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, 2022)

Yine Türkiye Ulusal Enerji Planı’na göre ülkemizde 2020 yılında elektrik kurulu gücü 95,9 GW iken 2035 yılında ise 189,7 GW’a yükselmesi beklenmektedir. 2020 yılı itibariyle kurulu güç içindeki payı % 52,0 olan yenilenebilir enerji kaynaklarının payının ise 2035 yılında % 64,7’ye ulaşması öngörülmektedir. Söz konusu bu verilere dayanarak önümüzdeki dönemde ulusal plan çerçevesinde yenilenebilir enerjiye önem verileceği ve fosil yakıtlardan enerji üretiminin ikinci planda kalacağı çıkarımı yapılabilir (Şekil 1.2).



Şekil 1.2. Kaynaklara göre kurulu güç (Türkiye Cumhuriyeti Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, 2022)

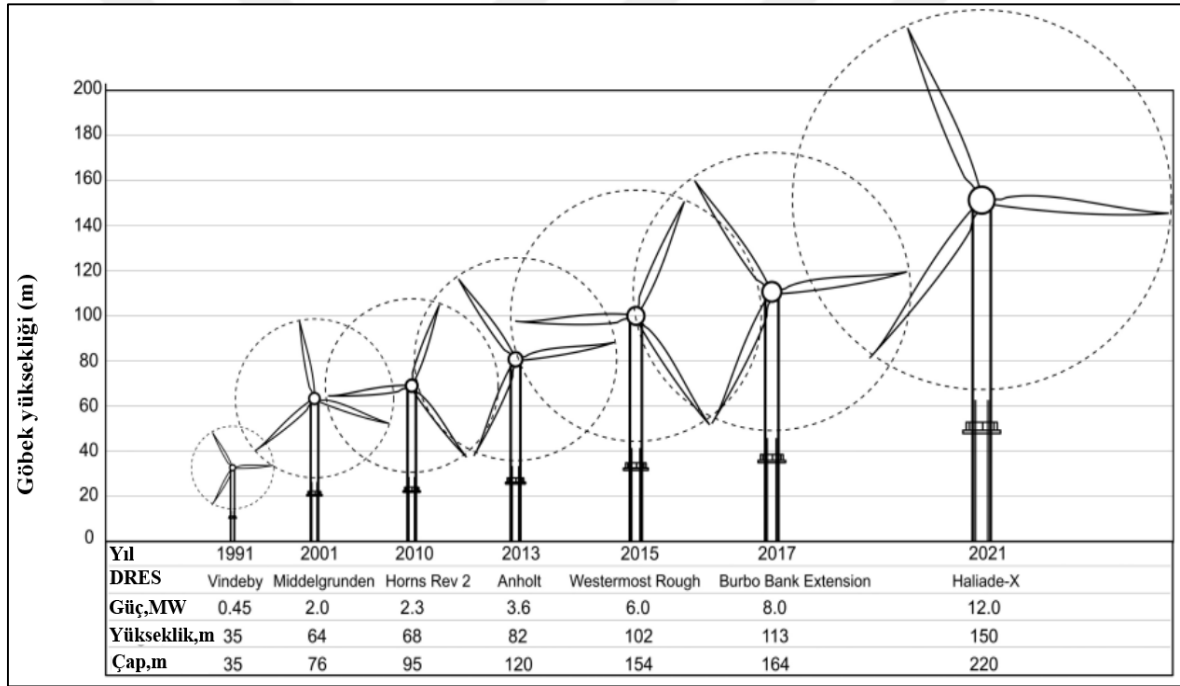
Petrol, petrol türevi ve katı yakıtların çevreye verdikleri zarar düşünüldüğünde, bunların ekolojik denge üzerinde olumsuz etkileri olduğu görülebilmektedir. Buna karşın yenilenebilir enerji kaynakları; doğanın kendi özkaynağından elde edildiğinden ekolojik denge üzerindeki olumsuz etkileri söz konusu bu yakıtlara kıyasla çok daha düşük seviyededir. Yenilenebilir enerji kaynaklarına örnek olarak;

- Dalga enerjisi
- Rüzgar enerjisi
- Güneş enerjisi
- Jeotermal enerji
- Hidrokinetik enerji
- Akıntı enerjisi

verilebilir.

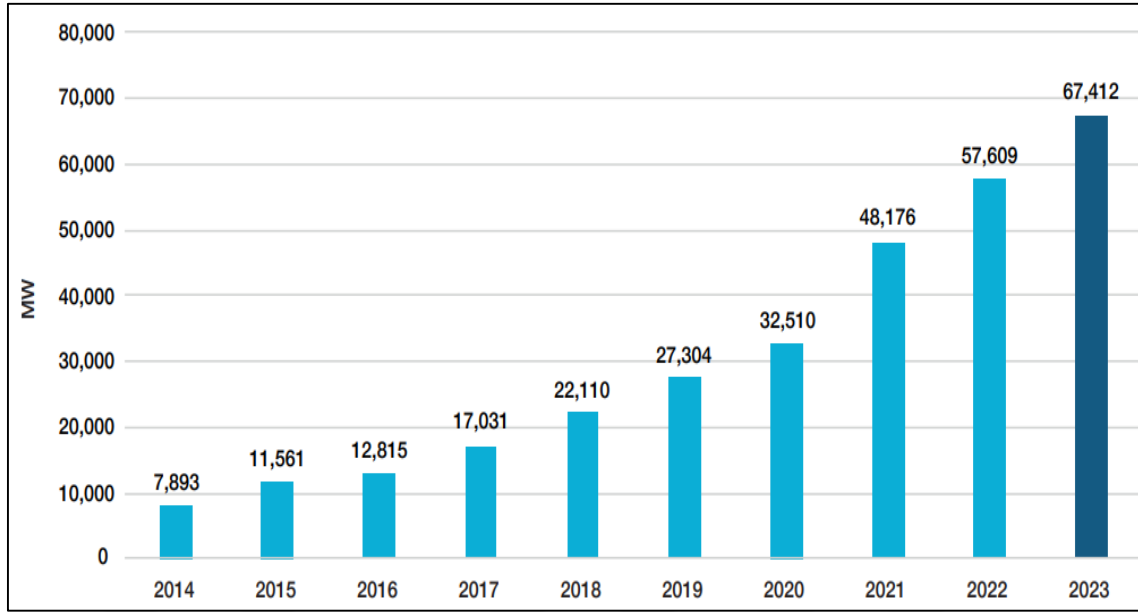
Rüzgar enerjisi

Deniz üstü rüzgar enerji santralleri (DRES) deniz ortamındaki rüzgar enerjisini elektrik enerjisini dönüştüren yapılardır. İlk DRES örneği 25 Haziran 1991 tarihinde başlayıp 4 Temmuz 1991 tarihinde yapımı tamamlanan, Danimarka'nın Vindeby bölgesindeki, her bir türbinin gücü 450 kW olmak üzere toplam 11 adet türbinden oluşan projedir. Deniz seviyesinden yaklaşık 50 m yükseklikte ve 35 metre rotor çapına sahip olan türbinlerin toplam kurulu gücü 4,95 MW seviyesindedir (Şahin, 2020). Günümüzde ise 16 MW güce, 252 metre rotor çapına sahip olan türbinlerin kurulumu yapılırken 22 MW güce sahip, 310 metre rotor çapına sahip türbinlerin de konsept aşamasında olduğu bilinmektedir (Şekil 1.3).



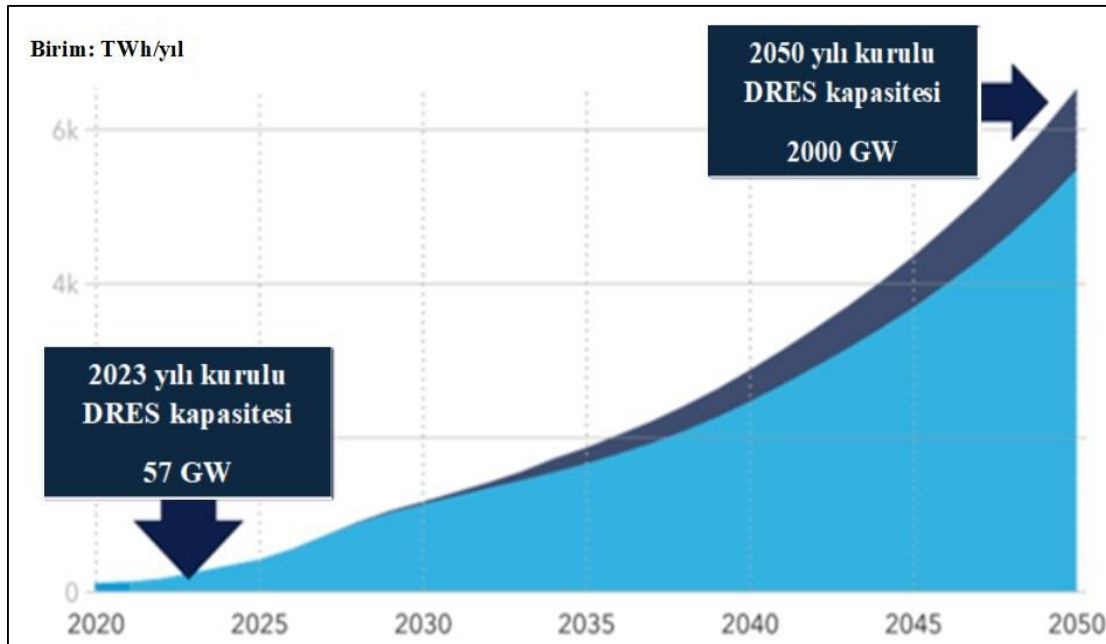
Şekil 1.3. Deniz üzeri rüzgar türbini boyutlarının zamanla değişimi (Trojnar, 2024)

Dünya Açık Deniz Rüzgar Forumu (World Forum Offshore Wind – WFO) 2024 yılında yayınladıkları raporlarında (Global Offshore Wind Report – Küresel Denizaşırı Rüzgar Raporu) dünya çapındaki DRES kurulu gücünün 2023 yılı itibariyle 67 GW seviyesine yaklaştığını belirtmişlerdir (Şekil 1.4).



Şekil 1.4. Dünya üzerindeki DRES'lerin yıllara göre kümülatif kurulu kapasitesi (WFO, 2024)

Şekil 1.4'ten görüleceği üzere Dünya üzerindeki DRES kurulu güç kapasitesinde son yıllarda büyük bir artış bulunmaktadır. Norveçli kuruluş DNV (Det Norske Veritas) de yayınlamış olduğu raporda (DNV, 2023) bu artış trendinin devam edeceğini ve nihayetinde 2050 yılına gelindiğinde kurulu DRES gücünün 2000 GW olacağını öngörmüştür (Şekil 1.5).



Şekil 1.5. Dünya üzerindeki kurulu DRES güç kapasitesi (DNV, 2023)

Ülkemiz üç tarafı denizlerle çevrili bir ülke olup yenilenebilir enerji kaynağı olarak rüzgar, dalga ve akıntı enerjisi bakımından oldukça verimli bir coğrafyada bulunmaktadır. ESMAP (Energy Sector Management Assistance Program – Enerji Sektörü Yönetim Yardım Programı)’ın 2019 yılının Ekim ayında yayınladığı ve 2020 yılının mayıs ayında yenilediği raporda, Türkiye’nin toplam açık deniz rüzgar potansiyelinin 12 GW sabit ve 63 GW da yüzer olmak üzere toplam 75 GW olduğu belirtilmiştir (ESMAP, 2020). Bu değer Türkiye’nin 2020 yılındaki kurulu elektrik gücünün % 73’üne denk gelmektedir. Türkiye’nin bu potansiyeli düşünüldüğünde, Dünya’daki DRES gelişimine kayıtsız kalması söz konusu olmamalıdır. Halihazırda gelişmekte olan bu pazardan ileride enerji ihtiyacına gereksinim duyacağı projeksiyonlarla belli olan ülkemizin de bir pay elde etmesi gereklidir. Ülkemizde karada inşa edilen rüzgar türbinlerinin direkleri yerli üretimle imal edilmektedir. Ayrıca ASELSAN (Askeri Elektronik Sanayi)’ın da yine kara üzerinde çalışacak, windART 4.X isimli, en az % 65’i yerli bir rüzgar türbini üretim aşamasında bulunduğu göz önüne alındığında, ileride bu pazarda ülkemizin elinin güçlü olacağına dair izlenimler elde edilmektedir (URL – 1).

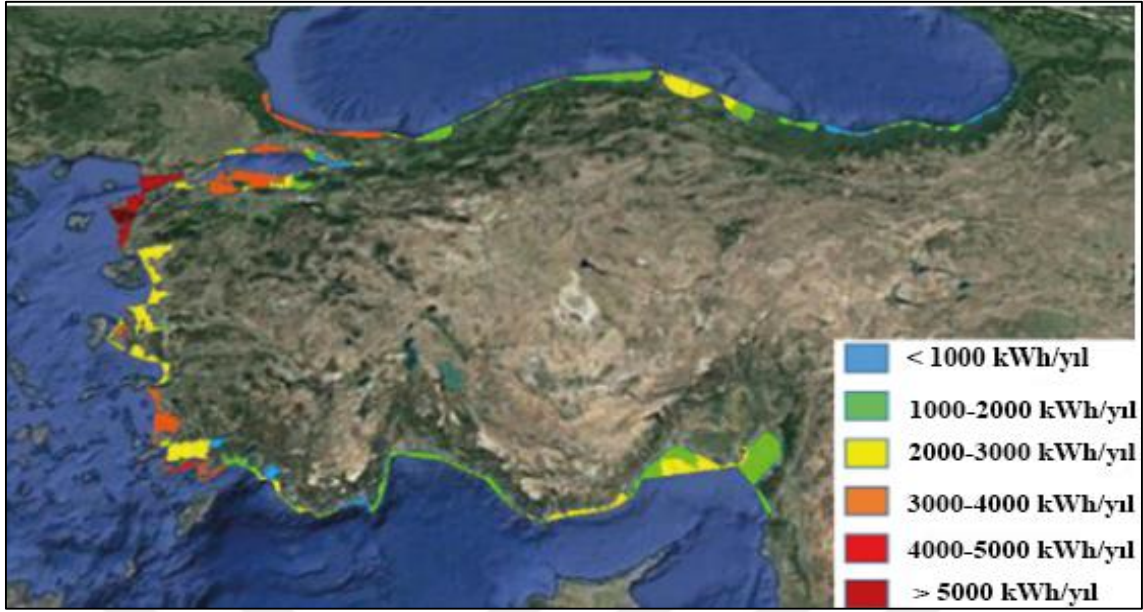
Söz konusu tüm bu gelişmeler ve ihtiyaçlara binaen, Türkiye’de 2018 yılında Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı Yenilenebilir Enerji Genel Müdürlüğü tarafından yayımlanan “Aday YEKA (Yenilenebilir Enerji Kaynak Alanları) İlan Metni” ile deniz üzeri rüzgar projesi için aday bölgeler Saros, Kıyıköy ve Gelibolu olarak belirlenmiştir. 2023 yılında ise bu bölgelere ek olarak Bozcaada, Bandırma, Gelibolu ve Karabiga ilan edilmiştir (URL – 2).

Dalga enerjisi

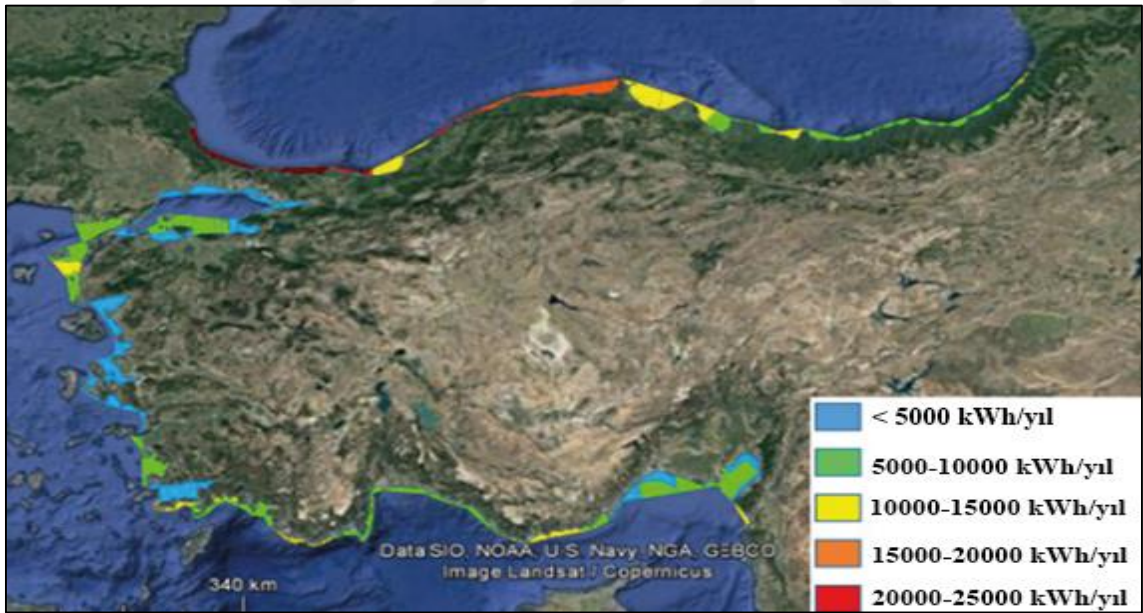
Yenilenebilir enerji alanında yapılan çalışmalar göstermiştir ki rüzgar dalgalarının sahip olduğu potansiyel güç ve enerji, diğer yenilenebilir enerji kaynaklarından 10 – 15 kat daha fazladır. Coğrafi konumuna bağlı olarak değişim gösterse de ortalama günlük güneş enerji akısı metre kare başına 100 W’dır. Buradan yola çıkarak, güneş enerjisinin elde edilmesinde; ideal şartlarda 1 kW elektrik üretimi için 10 metrekairelik bir alan gerekiyken, aynı miktarda elektrik üretimi için dalga enerjisi söz konusu olduğunda gerekli alan sadece 1 metre karedir (Sağlam ve Uyar, 2005). Dünya’da ilk ticari dalga enerji tesisi Limpet 500, 2000 yılında İskoçya’nın Islay adasında kurulmuş ve kurulu gücü 0,5 MW’dır (Uygur ve diğ., 2006).

NATO TU – WAVES projesi kapsamında Özhan ve Abdalla (2002) tarafından oluşturulan “Türk Kıyı Rüzgarları ve Derin Dalga Atlası” oluşturulmuştur. Söz konusu bu atlastan elde edilen dalga enerji seviyeleri incelendiğinde Karadeniz’in batı kesimleri, Ege Denizi ve Akdeniz dalga enerji potansiyeli olarak güçlü görülen bölgelerdir. Sağlam ve Uyar (2005) Türkiye’nin sahip olduğu toplam kıyı uzunluğunun beşte birinin denizden dalga enerjisi elde etmede kullanılabileceğini söylemişlerdir. Küçük dalga dönüştürücülerle, yıllık 4 – 17 kW/m arasında dalga gücü olan yerlerde, toplam olarak, yıllık en az 10 TWh enerji elde edilebilir. Dalga enerjisi için tasavvur edilen en iyi yerler Karadeniz’in batısında İstanbul Boğazı’nın kuzeyi ve Ege Denizi’nin güneybatı kıyıları açıkları; Marmaris ve Finike arasındadır (Sağlam ve Uyar, 2005). Uygur ve diğ. (2006) yapmış oldukları çalışmalarında ise dalgaların sahip oldukları özellikler bakımından en verimli alanın Karadeniz kıyı şeridi bölgesi olduğunu belirtmişlerdir. Türkiye ölçeğinde çok kriterli karar verme (ÇKKV – Multi Criteria Decision Making) yöntemlerinden biri olan analitik hiyerarşi prosesi (AHP – Analytical Hierarchy Process) ile yapılan çalışmalarında Caceoğlu (2023) Türkiye’nin kuzey batısında deniz üstü rüzgar enerji santrali için en iyi alternatif bölgeleri incelemişlerdir. Birçok kriterin göz önüne alındığı bu çalışma sonucunda deniz üstü rüzgar enerji santrali için Türkiye’de en elverişli bölgelerin Bozcaada ve Kızılköy olduğunu belirtmişlerdir (Caceoğlu, 2023).

Buyruk ve diğ. (2024) tüm Türkiye kıyıları göz önüne alarak yaptıkları çalışmada Karadeniz bölgesi için dalga enerjisi potansiyelinin en yüksek olduğu kıyı şeridinin Kırklareli olduğu sonucuna varılmıştır. Buyruk ve diğ. (2024) yapmış oldukları çalışmalarında 1970 ile 2021 yılları arasında ECMWF (European Centre for Medium Range Weather Forecasts – Avrupa Orta Vadeli Hava Tahminleri Merkezi) verilerini kullanarak Şekil 1.6 ve Şekil 1.7’deki haritaları elde etmişlerdir.



Şekil 1.6. Türkiye'nin kıyı su alanlarındaki yıllık rüzgar enerjisi potansiyelinin ECMWF ERA5 arşiv verilerine dayalı haritası (Buyruk ve diğ., 2024)



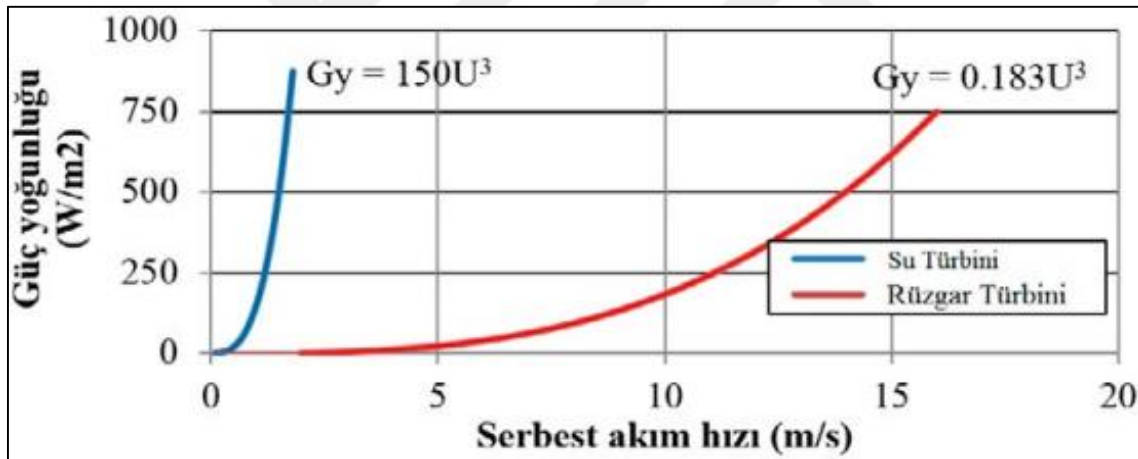
Şekil 1.7. Türkiye'nin kıyı su alanlarındaki yıllık dalga enerjisi potansiyelinin ECMWF ERA5 arşiv verilerine dayalı haritası (Buyruk ve diğ., 2024)

Hidrokinetik enerji

Akıntı enerjisi (hidrokinetik enerji), suyun hızından dolayı sahip olduğu kinetik enerjisinden yararlanılarak elde edilen enerjidir. Suyu potansiyel enerji kazandırılıp yararlanılan sistemlerin aksine bir depolama veya ortama herhangi bir dışarıdan etki yapılmaksızın elde

edilen bu enerji, dünya ölçeğindeki denizler ve okyanuslar düşünüldüğünde büyük bir potansiyele sahiptir. Bu yüzden hidrokinetik türbinler doğaları gereği serbest akım türbinleri olarak da adlandırılır ve nehir, okyanus, gelgit ve akıntı enerjisini elektrik enerjisine dönüştürmeyi sağlar (Muratoğlu ve Yüce, 2015).

Aynı boyutlara sahip rüzgar ve hidrokinetik türbinler karşılaştırılırsa, hidrokinetik türbinlerin çok daha fazla enerji üreteceği söylenebilir. Çünkü suyun yoğunluğu havanın yoğunluğunun yaklaşık olarak 800 katıdır (ρ_{su} ; 1000 kg/m³, ρ_{hava} ; 1,25 kg/m³). 2 – 3 m/s aralıktaki hızlarda çalışan bir hidrokinetik türbin aynı hızlarda çalışan bir rüzgar türbininin yaklaşık 4 katı enerji üretebilmektedir. Hidrokinetik türbinlerin çalışma hızları 1,5 – 3 m/s iken rüzgar türbinleri genellikle 11 – 13 m/s ile çalışmaktadır. Hidrokinetik ve rüzgar türbinlerinin güç yoğunluklarının karşılaştırılması Şekil 1.8’de gösterilmiştir (Muratoğlu ve Yüce, 2015).

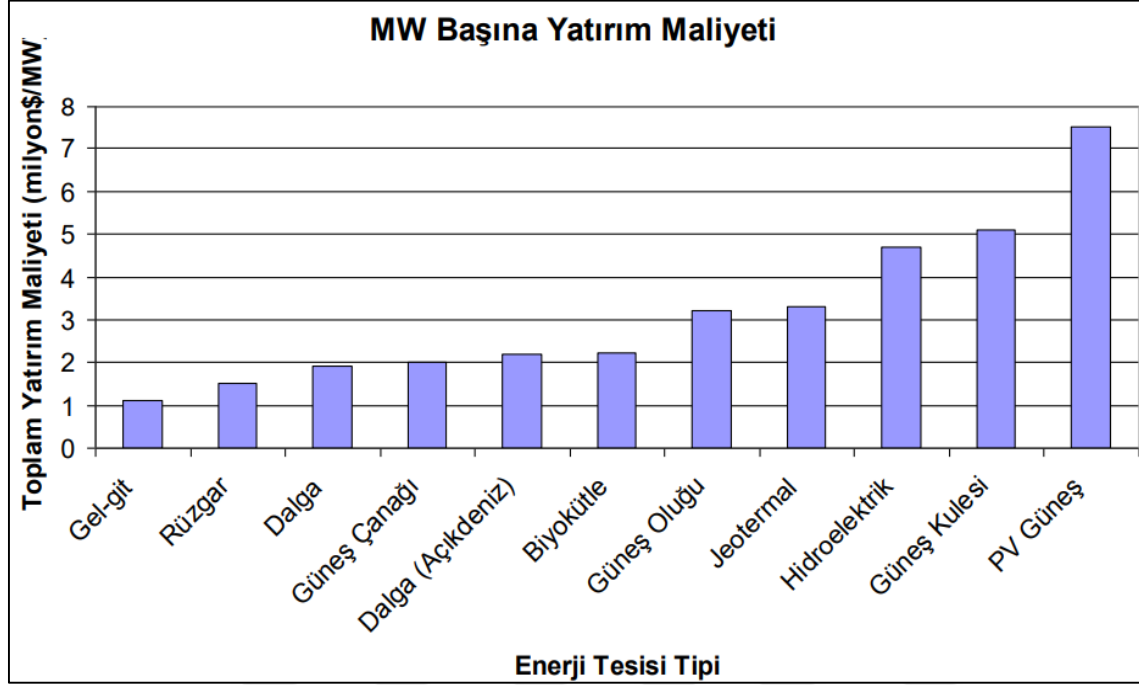


Şekil 1.8. Hidrokinetik ve rüzgar türbinlerinin güç yoğunluğu açısından karşılaştırılması (Muratoğlu ve Yüce, 2015)

Dünya ölçeğinde denizlerden elde edilebilecek yıllık enerji potansiyelinin Dünya'nın tükettiği yıllık elektrik miktarından fazla olabileceği belirlense de mevcuttaki teknolojinin bu miktarın ne kadarını gerçekten elektrik enerjisine dönüştürebileceği hususunda henüz bir mutabakat bulunmamaktadır (Samso ve diğ., 2023).

Samso ve diğ., (2023) yapmış olduğu çalışmalarında, potansiyel enerjinin ne kadarının elde edilebileceğini araştırmışlar ve bu miktarın her bir enerji elde etme türü için (rüzgar enerjisi, dalga enerjisi, gel – git enerjisi gibi) olabilecek potansiyelden çok daha az olduğu sonucuna

varmışlardır. Şekil 1.9’da MW başına yatırım maliyetinin en az olduğu yenilenebilir enerji kaynakları olarak gel – git, rüzgar ve dalgaın geldiği görülmektedir (Önöz, 2013).



Şekil 1.9. Enerji tesisi tipine göre MW başına yatırım maliyeti (Önöz, 2013)

Sonuç olarak yenilenebilir enerji kaynağı konusunda ülkemiz, özellikle Batı Karadeniz büyük bir potansiyele sahiptir. Ucuz maliyet, çevreye verdiği zararların minimum seviyede olması, yerli üretim imkanı gibi birçok olanağın bulunması önümüzdeki dönemde söz konusu enerji elde etme yöntemlerinin ülkemizde gündemde olmasını sağlayacaktır. Bu nedenle denizel alanların planlaması ülke ekonomisi için daha da önem kazanmıştır. Bu kapsamda tezde ülkemiz için yeni bir planlama modeli ortaya konmuştur. Bu planlama modelinin önceki çalışmalardan farkını ortaya koymak için Bütünleşik Kıyı Alanları Yönetimi (BKAY), Deniz Saha Planlaması (DSP) ve Mavi Vatan kavramları bir sonraki bölümlerde açıklanacaktır.

Bütünleşik kıyı alanları yönetimi (BKAY)

Literatürde BKAY için bir dizi tanım bulunmaktadır. Bu bağlamda, başlangıç noktası olarak BKAY protokolünün, UNEP / MAP / PAP (2008), sunduğu tanım kullanılabilir. Protokol, BKAY’ı şu şekilde tanımlamaktadır;

“BKAY, kıyı ekosistemlerinin ve peyzajlarının kırılganlığını, faaliyetlerin ve kullanım çeşitliliğini, bunların etkileşimlerini, belirli faaliyetlerin ve kullanımların deniz odaklı yönelimlerini ve hem deniz hem de kara üzerindeki etkilerini dikkate alarak, kıyı alanlarının sürdürülebilir yönetimi ve kullanımı için dinamik bir süreçtir.”

Kıyı bölgeleri istihdam yaratma, ekonomik büyüme ve yaşam kalitesi ile ilgili işlevlere hizmet eder. Bunlar aşağıdaki gibi sıralanabilir (Avrupa Komisyonu, 1999).

- Kıyı ovalarındaki tarımsal üretim – kıyı su kaynaklarının kullanımı
- Balıkçılık faaliyetlerinin çeşitlendirilmesi
- Enerji üretimi – hem petrol gibi geleneksel kaynaklar hem de rüzgar ve dalgalara dayalı yenilenebilir enerji kaynakları
- Lojistik ve ticaret – limanlar, iskeleler ve kıyı taşımacılık yolları, küresel ulaşım bağlantılarının kilit unsurları
- Kültürel miras deposu – hem yaşayan topluluklarda hem de arkeolojik alanlarda
- Turizm, eğlence, dinlenme ve estetik – plajlar, su sporları ve peyzaj
- İkincil konutlar
- Denizin yıkıcı güçlerine karşı savunma
- Kirletici deşarjı

Birleşmiş Milletler Çevre Programı (United Nations Environment Programme – UNEP) Dünya nüfusunun yaklaşık %37’sinin kıyıya 100 km mesafede yaşadığını ve bu bölgelerdeki nüfus yoğunluğunun Dünya ortalamasının iki katı olduğunu belirtmiştir. Artan nüfus ve bu nüfusun doğal ekosistem üzerinde oluşturduğu baskı kıyı bölgeleri üzerinde olumsuz etkilere sebebiyet vermektedir. Son araştırmalar, kıyıların % 34’ünün kıyı gelişimi nedeniyle yüksek risk altında olduğunu, % 17’sinin ise orta risk taşıdığını ortaya koymuştur. En çok tehdit altındaki bölgeler ise kıyı ekosistemlerinin % 86’sı risk altında olan Avrupa ve % 69’u risk altında olan Asya’dır. Dünya Bankası (World Bank) raporuna göre, insan etkileri kıyılarda ve okyanuslarda mangrovların¹ % 20’sini, deniz çayırı yataklarının % 30’unu ve mercan resiflerinin % 20’sini yok etmiştir (URL – 3). Avrupa Komisyonu (1999) kıyı alanlarındaki genel problemleri aşağıdaki gibi özetlemiştir.

¹ Mangrovlar, kıyı gelgit bölgesinde yaşayan bir grup ağaç ve çalıdır.

- Plansız gelişme
- Geleneksel, çevreyle uyumlu sektörlerin gerilemesi
- Kıyısal erozyon
- Uygun iletişim ve ulaşım ağlarının sektöre uğraması

Kıyı alanları yönetimi konusu ilk defa 1972 yılında ABD’nde yürürlüğe konulan Kıyı Alanları Yönetim Yasası (Coastal Zone Management Act) ile ortaya getirilmiştir (Değerli ve Erbaş, 2020). Duru (2003) Birleşmiş Milletlerin bu tarihlerindeki ilk yayınlarında kıyı bölgesi yöntemi (coastal zone management) kavramının oluştuğunu belirtmiştir (Şentürk, 2019). 1992 yılında Rio’da yapılan Birleşmiş Milletler Rio Çevre ve Kalkınma Konferansı’nın eylem planı olan *Gündem 21* raporunda ise “Bütünleşik Kıyı Yönetimi” kavramı işlenmektedir (Şentürk, 2019). 1976 yılında yürürlüğe giren Barselona Sözleşmesi’nin, 2008 yılında kabul edilen Akdeniz Bütünleşik Kıyı Alanları Yönetimi (Yılmaz Şimşek, 2024) protokolünün temel amacı Akdeniz’in kirliliğe karşı korunması ve kıyılarının sürdürülebilirliğini sağlamaktır (Atik, 2011; Şentürk, 2019).

Avrupa Komisyonu (1999) BKAY’ı, kıyı bölgelerinin sürdürülebilir şekilde yönetilmesini teşvik etmek amacıyla tasarlanmış dinamik, sürekli ve yinelemeli bir süreç olarak tanımlamıştır. BKAY, uzun vadede ekonomik kalkınmadan ve kıyı bölgesinin insan kullanımlarından elde edilen faydalar ile kıyı alanlarının korunması, muhafaza edilmesi ve yeniden kazanılmasından sağlanan faydaları, insan hayatı ve mülkiyet kayıplarının en aza indirilmesinden doğan faydaları, ayrıca halkın kıyı bölgelerine erişiminin sağlandığı faydaları, doğal dinamikler ve taşıma kapasitesi açısından belirlenen sınırlar çerçevesinde dengelemeyi hedefler (Avrupa Komisyonu, 1999). Yine Avrupa Komisyonu (1999) BKAY’ı her ne kadar “yönetim” olarak adlandırılrsa da aslında BKAY sürecinin, bilgi toplama, planlama, karar alma, yönetim ve uygulamanın izlenmesi gibi tüm döngüyü kapsadığını vurgulamışlardır. Bu bağlamda, “planlama” en geniş anlamda ele alınır ve yalnızca arazi kullanım planlaması veya diğer sektörel planlamalar değil, stratejik politika geliştirmeyi ifade eder. BKAY, kıyı bölgelerinde karasal planlama ile denizel planlamanın bütünleşik olarak ele alındığı ve kara ile deniz arasındaki geçiş bölgesinin stratejik olarak ele alındığı bir süreçtir. Bu bakımdan, BKAY kıyı alanlarının sürdürülebilir kullanımını ve korunmasını hedefleyen bir yaklaşımdır.

Hükümetler arası Okyanus Bilimsel Komisyonu (Intergovernmental Oceanographic Commission – IOC) hazırlamış olduğu Avrupa’daki BKAY değerlendirme raporunda iyi bir BKAY’ın sekiz prensibini aşağıdaki gibi sıralamışlardır (IOC, 2006);

- 1. Prensip: Kıyı alanlarını etkileyen doğal sistemlerin ve insan faaliyetlerinin birbirine bağımlılığını ve farklılıklarını dikkate alacak geniş bir genel bakış açısı (tematik ve coğrafi) oluşturulması.
- 2. Prensip: Mevcut ve gelecek nesillerin ihtiyaçlarını göz önünde bulundurarak, ihtiyat ilkesini de içeren uzun vadeli bir bakış açısının ele alınması.
- 3. Prensip: Kıyı bölgesinin değişimine dair sağlam bir bilimsel temele dayanan, sorunlar ve bilgi birikimi geliştikçe uyum sağlamayı kolaylaştıracak kademeli bir süreç boyunca adaptif yönetimin sağlanması.
- 4. Prensip: Avrupa kıyı bölgelerinin yerel özgünlüğünü ve çeşitliliğini koruyarak, bu bölgelerin pratik ihtiyaçlarına spesifik çözümler ve esnek önlemlerle yanıt vermeyi mümkün kılan bir yönetim anlayışının benimsenmesi.
- 5. Prensip: Doğal süreçlerle uyumlu çalışarak ve ekosistemlerin taşıma kapasitesine saygı göstererek insan faaliyetlerinin uzun vadede daha çevre dostu, sosyal açıdan daha sorumlu ve ekonomik açıdan daha sağlam hale getirilmesi.
- 6. Prensip: İlgili tüm tarafların (ekonomik ve sosyal ortaklar, kıyı bölgesi sakinlerini temsil eden kuruluşlar, sivil toplum örgütleri ve iş sektörü) yönetim sürecine dahil edilmesiyle paylaşımlı sorumluluğun tesis edilmesi.
- 7. Prensip: Ulusal, bölgesel ve yerel düzeyde ilgili idari mekanizmaların desteği ve katılımı ile çeşitli mevcut politikaların koordinasyonunun iyileştirilmesi ve uygun bağlantılar kurulması.
- 8. Prensip: Sektörel politika hedefleri ile planlama ve yönetim arasındaki tutarlılığı kolaylaştırmak için tasarlanmış araçların bir kombinasyonunun kullanılması.

Avrupa Komisyonu (1999) BKAY’ı bir süreç olarak tanımlamıştır. BKAY süreci, ilgili ve etkilenen taraflar arasında diyalogu ve görüş alışverişini kolaylaştıran, ortak endişelerin farkındalığıyla başlayan bir süreç olarak belirtilmiştir. Söz konusu bu farkındalığın taraflar arasındaki iş birliğini destekleyeceğini ve bunun da eylem ile gerekli koordinasyonunun temelini oluşturacağını dile getirmiştir. Dolayısıyla BKAY sürecini yönetenler veya yönetecek olanlar zamanla yönetimin bütünleşeceği beklentisine girmişlerdir.

BKAY’da kullanılan bütünleşik (integration) kavramı BKAY’ı doğru tanımlamak için üzerinde durulması gereken en kritik kelime olarak öne çıkmaktadır (Özügül ve Yerliyurt, 2017). Cicin – Sain ve diğ. (2000) bütünleşik kavramının boyutlarını aşağıdaki gibi ele almışlardır;

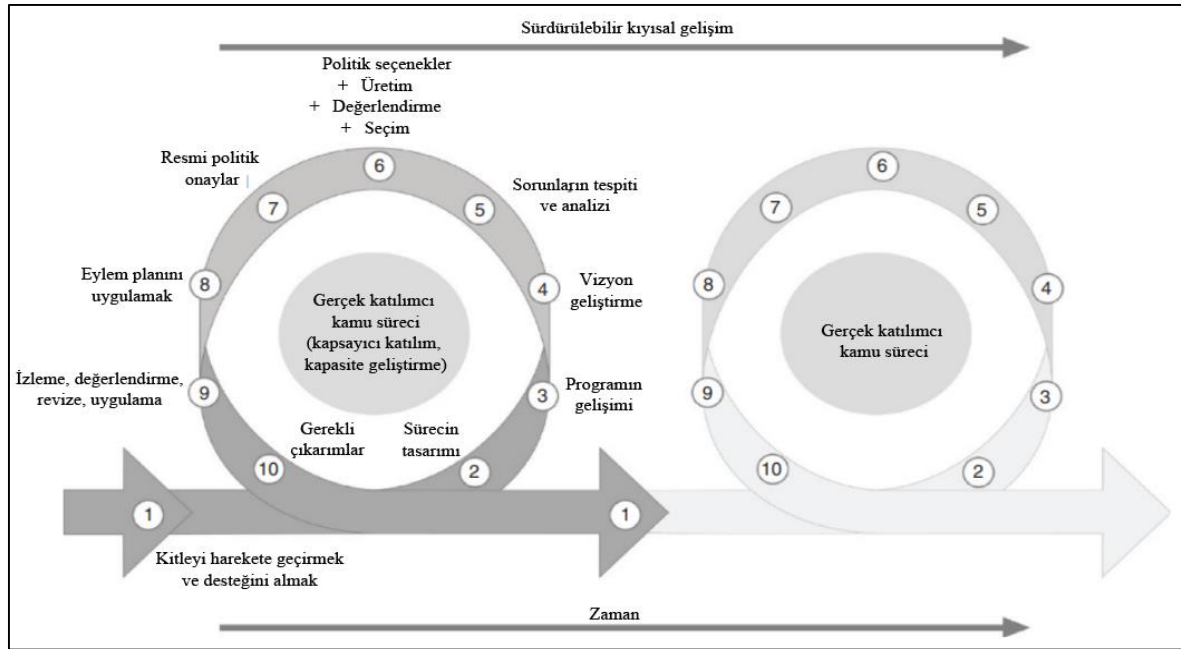
- Sektörler arası bütünleşme (farklı kıyı ve deniz sektörleri arasındaki bütünleşme, örneğin, balıkçılık, petrol arama gibi farklı kıyı ve deniz sektörleri arasındaki bütünleşme)
- Yönetimler arası bütünleşme (ulusal ve yerel yönetimler arası bütünleşme)
- Mekanlar arası bütünleşme (kıyı bölgesinin kara ve deniz tarafları arasındaki bütünleşme)
- Disiplinler arası bütünleşme (kıyı ve deniz yönetiminde önemli olan doğa bilimleri, sosyal bilimler ve mühendislik bilimleri arasındaki bütünleşme)
- Uluslararası bütünleşme (sınır ötesi kirlilik, deniz sınırlarının belirlenmesi, gemilerin geçişi ve diğer konular konusunda uluslararası anlaşmazlıkların olması durumunda uluslararası bütünleşmenin sağlanması)

Dolayısıyla BKAY’da bütünleşik ve bütüncül yaklaşımın (Şekil 1.10) önemli olduğu söylenebilir (Ağaçdiken, 2020).



Şekil 1.10. BKAY ve bütüncül yaklaşım (Ağaçdiken, 2020)

BKAY için yaklaşım seçiminde, hedef bölgede karşılaşılan tarihi, kültürel ve geleneksel bağlamın yanı sıra doğal koşullar ve fiziksel sorunlar da etkili olduğundan, farklı bölgeler için farklı yaklaşımlar geliştirilmesi gereklidir. Avrupa Komisyonu (1999) BKAY için yalnız tek bir doğru yaklaşımın olmadığını vurgulamıştır. Örneğin, Güney Afrika deneyimi, kıyı politikalarının oluşturulması ve uygulanmasının aşamalı ve adım adım ilerleyen doğasını vurgulamaktadır. Ancak, Güney Afrika bağlamında geçerli olan adımların niteliği ve dizisi daha önce belirtilenlerden farklıdır ve BKAY süreçlerinin belirli koşullara göre uyarlanması gerektiğini yeniden ortaya koymaktadır (Burbridge ve diğ., 2011). Glavovic (2008) tarafından insan odaklı katılımcı bir BKAY döngüsü Şekil 1.11’de verilmiştir.

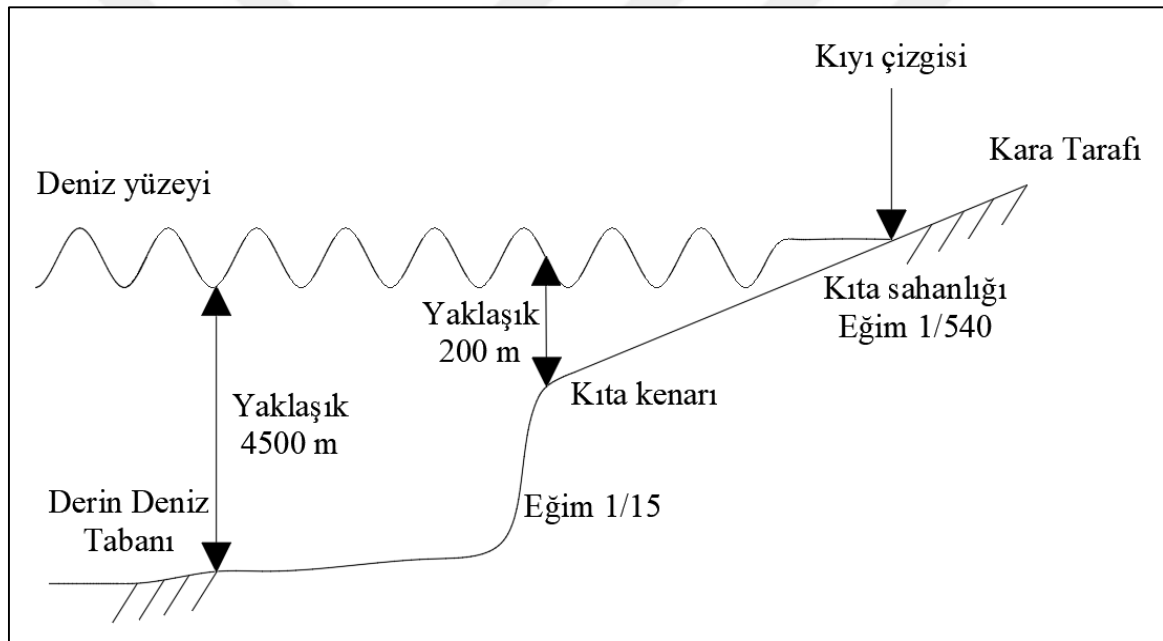


Şekil 1.11. İnsan odaklı katılımcı bir BKAY döngüsü (Glavovic, 2008)

Deniz saha planlaması (DSP) ve mavi vatan

Denizlerdeki enerji kaynakları başta olmak üzere deniz alanı içerisindeki ekonomik faaliyetlerin ülkeler tarafından ne derece kullanılabileceği, günümüzün en büyük sorunlarından biridir. Özellikle kıyıdaş devletlerin sayısının fazla olması ve bölgedeki deniz kaynaklarının niteliği, bu sorunu daha da önemli bir hale getirmektedir. Buna örnek olarak Türkiye ile Yunanistan gösterilebilir. Birden fazla kıyıdaş ülkenin varlığı durumunda ülkelerin deniz kaynaklarından ne derece faydalanacağına dair en önemli ilke kıta sahanlığı kavramı olarak karşımıza çıkmaktadır. Cenevre Deniz Hukuku Sözleşmesi ile resmileşen

kıta sahanlığı kavramı, yine uluslararası deniz hukukunun hakkaniyet, orantılılık, coğrafyanın üstünlüğü gibi prensipler doğrultusunda kıyıdaş devletlerin faaliyetlerini yasal bir zeminde gerçekleştirmelerine imkân vermektedir. Kıta sahanlığı ilkesine eşlik eden bir diğer kavram ise Münhasır Ekonomik Bölge olup tüm bu kavramlar, kıyıdaş devletler arasında oluşabilecek anlaşmazlıkları ortadan kaldırmayı hedeflemektedir (Yaycı, 2022). Su derinliği kıyı çizgisinden başlayarak giderek açık denize doğru, deniz tabanı eğiminin aniden dikleştiği bölgeye kadar artış gösterir, eğimin birden değiştiği bu konumdan itibaren derin deniz tabanına ulaşıncaya kadar su derinliğindeki artış çok hızlı olmaktadır. Bu eğimin ani artış gösterdiği konuma kadar olan bölge kıta sahanlığı olarak tanımlanmaktadır. Kıta sahanlığının gösterimi Şekil 1.12'deki gibidir (Ergin, 2019).



Şekil 1.12. Kıta sahanlığı (Ergin (2019)'dan uyarlanmıştır.)

Uluslararası hukuka kıta sahanlığı terimi ilk kez 1958 tarihli Cenevre Kıta Sahanlığı Sözleşmesi ile girmiştir. Sözleşmenin 1'inci maddesi kıta sahanlığını tanımlarken iki ölçüt kullanmıştır. Bunlar; iki yüz metre derinlik ölçütü ve işletilebilir derinlik ölçütüdür. BMDHS (Birleşmiş Milletler Deniz Hukuku Sözleşmesi) kıta sahanlığının hukuki tanımını yaparken, derinlik ölçütünü bir tarafa bırakıp genişlik ölçütünü kabul etmiştir. Sözleşme 76'ncı maddesindeki bu genişlik ölçütü aşağıdaki şekilde tanımlanmıştır;

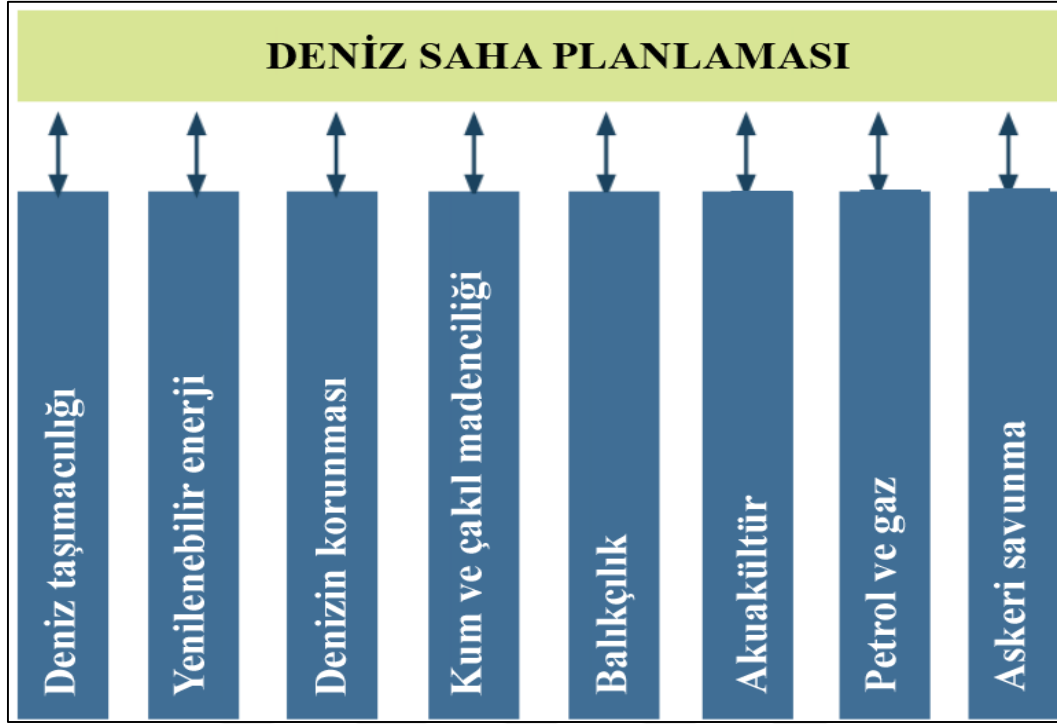
- Karasuların genişliğinin ölçülmesinde kullanılan esas hatlardan itibaren 200 deniz mili olarak,
- Kıta kenarının dış sınırının 200 deniz milinden öteye uzanması halinde, karasuları genişliğinin ölçülmesinde kullanılan esas hatlardan itibaren 350 deniz milini aşmayacak şekilde,
- 2500 metre eş derinlik eğrisinden itibaren 100 deniz milini aşmayacak şekilde, tespit edilmiştir (Yaycı, 2022).

BMDHS'ye göre kıta sahanlığı; kıyı esas hatlarından itibaren 200 ile 350 deniz mili mesafeye kadar olan deniz alanlarının deniz yatağı ve toprak altını araştırma ve canlı olmayan kaynaklarını işletme hakkıdır. Uluslararası hukukun yerleşmiş kuralları uyarınca, kıyıdaş devletlerin kendiliğinden ve kuralın meriyetinden itibaren kıta sahanlığı hakkı mevcuttur. Kıta sahanlığı için herhangi bir ilan mükellefiyeti yoktur. Yani herhangi bir kıyıdaş devletin bu alanı deklare etmesi gerekmez. Bir başka ifade ile kıta sahanlığı haklarını talep etmesine veya araştırma ve işletme faaliyetlerine girişmesine gerek olmaksızın, kıyıdaş devletler bu hakları kendiliğinden kazanır. Kıta sahanlığında, kıyı devletlerine açıkça tanınan haklar saklı, açık denizler rejimi uygulanır (Toluner, 1996). MEB (Münhasır Ekonomik Bölge) kavramı, uluslararası hukuka BMDHS ile girmiş olup, karasularının ölçülmeye başlandığı esas hatlardan itibaren 200 mil genişlikteki deniz alanlarının deniz yatağı ve toprak altı ile üzerindeki suların canlı ve canlı olmayan kaynakları işletme hakkıdır. Kıyıdaş devletin münhasır ekonomik bölge uygulaması yapacağı deniz alanının sınırlarına karar vermesi ve BMDHS'nin 75'inci maddesinde belirtildiği şekilde, bu sınırlara ilişkin haritaları veya coğrafi koordinatlara ilişkin listeleri uygun bir biçimde yayınlaması ve BM (Birleşmiş Milletler)'ye deklare etmesi gerekmektedir. Denize kıyısı olsun veya olmasın, bütün devletler münhasır ekonomik bölgede açık deniz serbestilerinden seyrüsefer, uçuş ve sualtı kablolarını ve boru hatlarını döşeme serbestilerini BMDHS'nin ilgili hükümleri çerçevesinde kullanacaklardır. Karadeniz gibi kapalı ve Akdeniz gibi yarı kapalı denizlerde karşılıklı kıyılar arasındaki mesafenin 400 milden daha az olması nedeniyle, kıta sahanlığının ve münhasır ekonomik bölgenin genişliği de 200 milden daha az olacaktır. Karşılıklı kıyılar arasındaki mesafe 400 milden az olan veya kıyıları yan yana olan devletler arasında münhasır ekonomik bölgenin ve kıta sahanlığının sınırlandırılması hakça bir çözüm bulmak üzere ikili veya çok taraflı anlaşmalarla yapılır. Antlaşma ile bir çözüm bulunamaması durumunda uzlaşma, hakemlik veya yargı yoluna gidilmektedir. Münhasır

Çizelge 1.1. Kıta sahanlığı ve münhasır ekonomik bölge arasında farklılıklar (Yaycı, 2022)

KARŞILAŞTIRMA	KITA SAHANLIĞI	MÜNHASIR EKONOMİK BÖLGE
Sınır	200 Deniz Mili (350 DM)	200 Deniz Mili
Egemen haklar	Deniz tabanı ve altındaki doğal kaynakların aranması ve işletilmesine egemen haklar	Deniz tabanı ve altındaki doğal kaynakların aranması ve işletilmesine yönelik egemen haklar + Su kütleindeki doğal kaynakların korunması ve işletilmesi + Enerji Üretimi (Rüzgar, akıntı, su vb.)
İlan gerekir mi?	Hayır	Evet
Suni adalar, tesisler, yapılar	✓	✓
Seyrüsefer ve üst uçuş serbestisi	✓	✓
Sahil bulunmayan ve coğrafi bakımdan elverişsiz devletlerinin hakları	✗	✓

UNESCO (United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization – Birleşmiş Milletler Eğitim, Bilim ve Kültür Kurumu) / IOC (Intergovernmental Oceanographic Commission – Hükümetler arası Okyanus Bilimsel Komisyonu) tarafından hazırlanan raporda Deniz Saha Planlaması (DSP), deniz alanlarının kullanımını ve bu kullanımlar arasındaki etkileşimleri daha rasyonel bir şekilde organize etmek, kalkınma taleplerini deniz ekosistemlerini koruma ihtiyacıyla dengelemek ve sosyoekonomik hedeflere açık ve planlı bir şekilde ulaşmak için pratik bir yol olarak tanımlanmıştır (IOC, 2009). Yine bu raporda DSP, deniz alanlarındaki insan faaliyetlerinin mekânsal ve zamansal dağılımını analiz sonucu tahsis ederek, genellikle siyasi bir süreçle belirlenen ekolojik, ekonomik ve sosyal hedeflere ulaşmayı amaçlayan bir kamu süreci olarak geçmektedir. DSP direkt olarak ekosistemi değil dolaylı yollarla ekosistemi etkileyen insan aktivitelerini yöneten bir süreçtir. DSP ile insan faaliyetleri belirli deniz alanlarında hedefe göre, örneğin gelişim veya koruma alanları, ya da belirli kullanımlara göre, örneğin rüzgar çiftlikleri, açık deniz kültür balıkçılığı veya kum ve çakıl madenciliği gibi (Şekil 1.14) tahsis edilebilir (IOC, 2009). DSP bütüncül yaklaşım açısından BKAY’a benzerlik göstermektedir.



Şekil 1.14. DSP ve sektörel planlamalar (IOC, 2009)

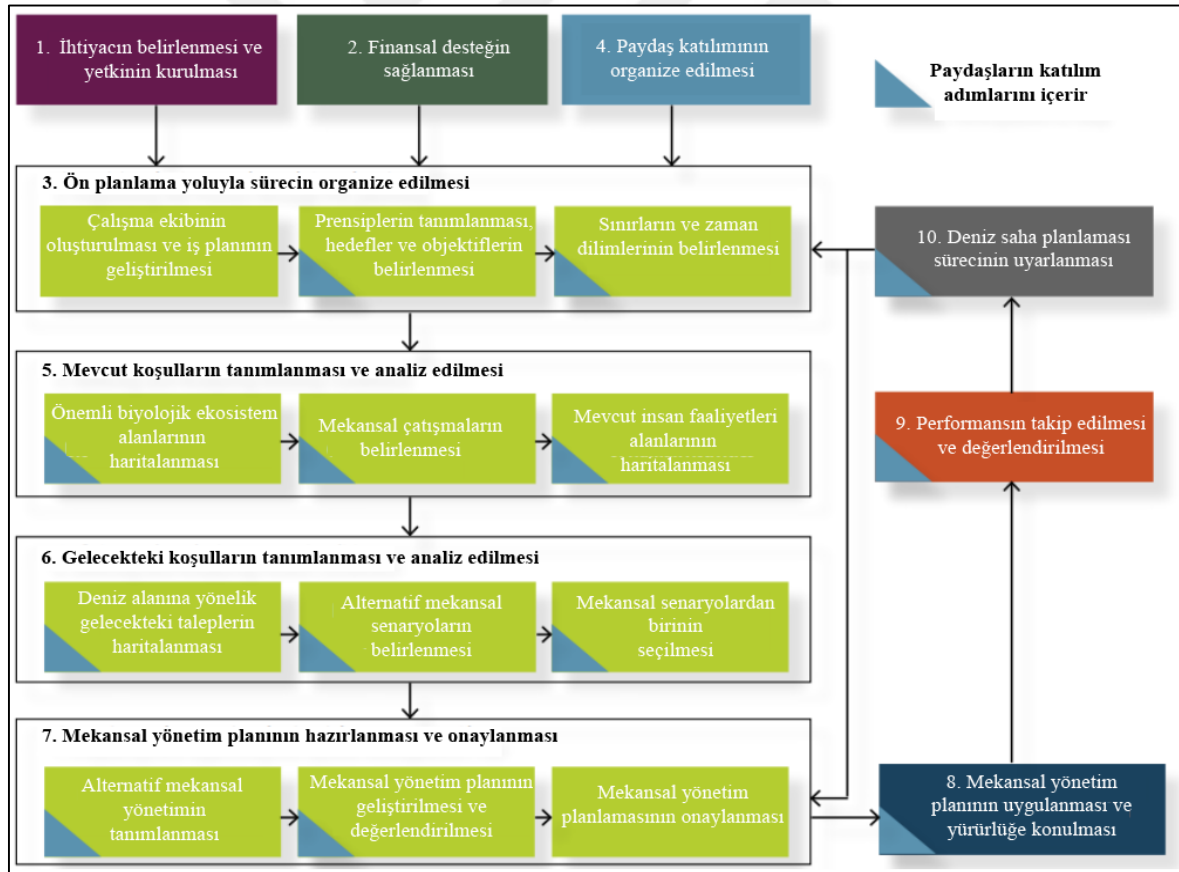
Mavi kitap (Blue Paper) ve AB (Avrupa Birliği) Bütünleşik Denizcilik Politikasına (European Union Integrated Maritime Policy) ilişkin eylem planında, DSP söz konusu bu eylem planının uygulanmasını destekleyen kesintisiz araçlardan biri olarak belirlenmiştir (Avrupa Komisyonu, 2011). 2014 yılında Avrupa Birliği tarafından kabul edilen Deniz Saha Planlaması (DSP) Direktifi (The EU Directive on MSP – Directive 2014/89/EU) ise korunması gereken kırılgan bir ekolojik alanda rekabet eden farklı sektörel önceliklere sahip faaliyetlerin karar alma süreçlerini koordine etmeyi amaçlamaktadır. Bu direktif, deniz havzalarındaki önemli yatırımların planlaması ve politika süreçlerinin uyumu için “sınır ötesi yaklaşımı” desteklemektedir (Balas, 2024).

2008 yılında, komisyon, DSP için bir dizi ana ilke öneren “Deniz Saha Planlaması Yol Haritası: AB’de Ortak İlkelerin Elde Edilmesi” adlı yol haritasını kabul etmiştir. Yol haritasında, 2009 yılında gerçekleştirilecek çalışmalar dizisi hakkında bir rapor hazırlanması ve daha fazla adım ve eylem planı hazırlanması taahhüt edilmiştir. Mevcut iletişim bu taahhüdü yerine getirmiş ve AB’deki DSP’nin mevcut bağlamını özetlemiştir (Avrupa Komisyonu, 2011).

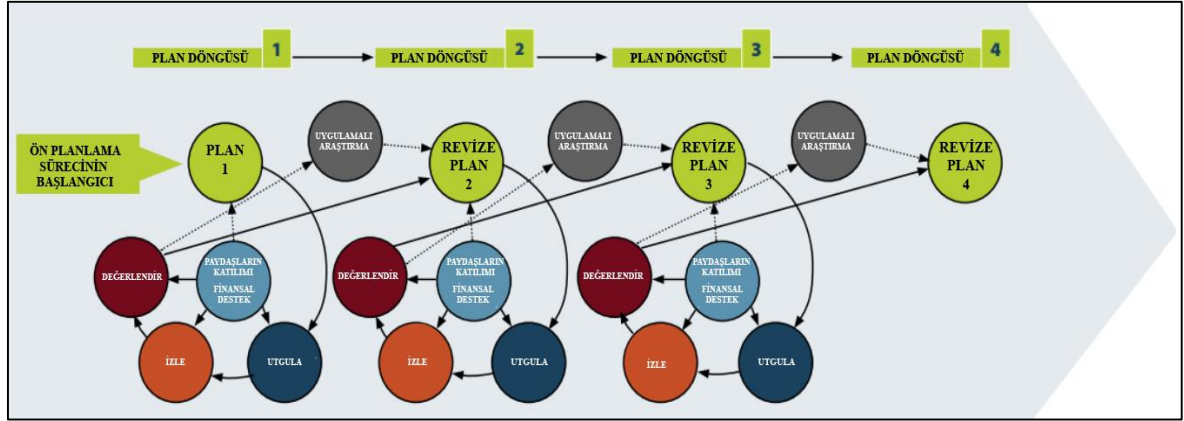
DSP’nin karakteristik özellikleri aşağıda verilmiştir (IOC, 2009).

- Ekosistem temelli, sürdürülebilir kalkınmaya yönelik ekolojik, ekonomik ve sosyal hedefleri engelleyici
- Bütünleşik, sektörler, kurumlar ve idareler arasında bütünleşmeyi sağlayan
- Mekana veya alana dayalı
- Deneyimlerden faydalanabilen, uyum sağlayabilen
- Stratejik ve öngörülü, uzun vadeye odaklı
- Katılımcı, paydaşların sürece aktif olarak dayalı olduğu

DSP’de BKAY gibi anlık değil uzun süreçli, sürekli ve iteratif planlar bütünüdür. Yine IOC (2009) raporuna göre DSP’nin uygulanması ve gelişimi için Şekil 1.15’deki basamaklar önerilmiştir. DSP’nin karakteristik olarak sürekli ve iteratif bir süreç olduğu ise Şekil 1.16 ile tanımlanmıştır (IOC, 2009).

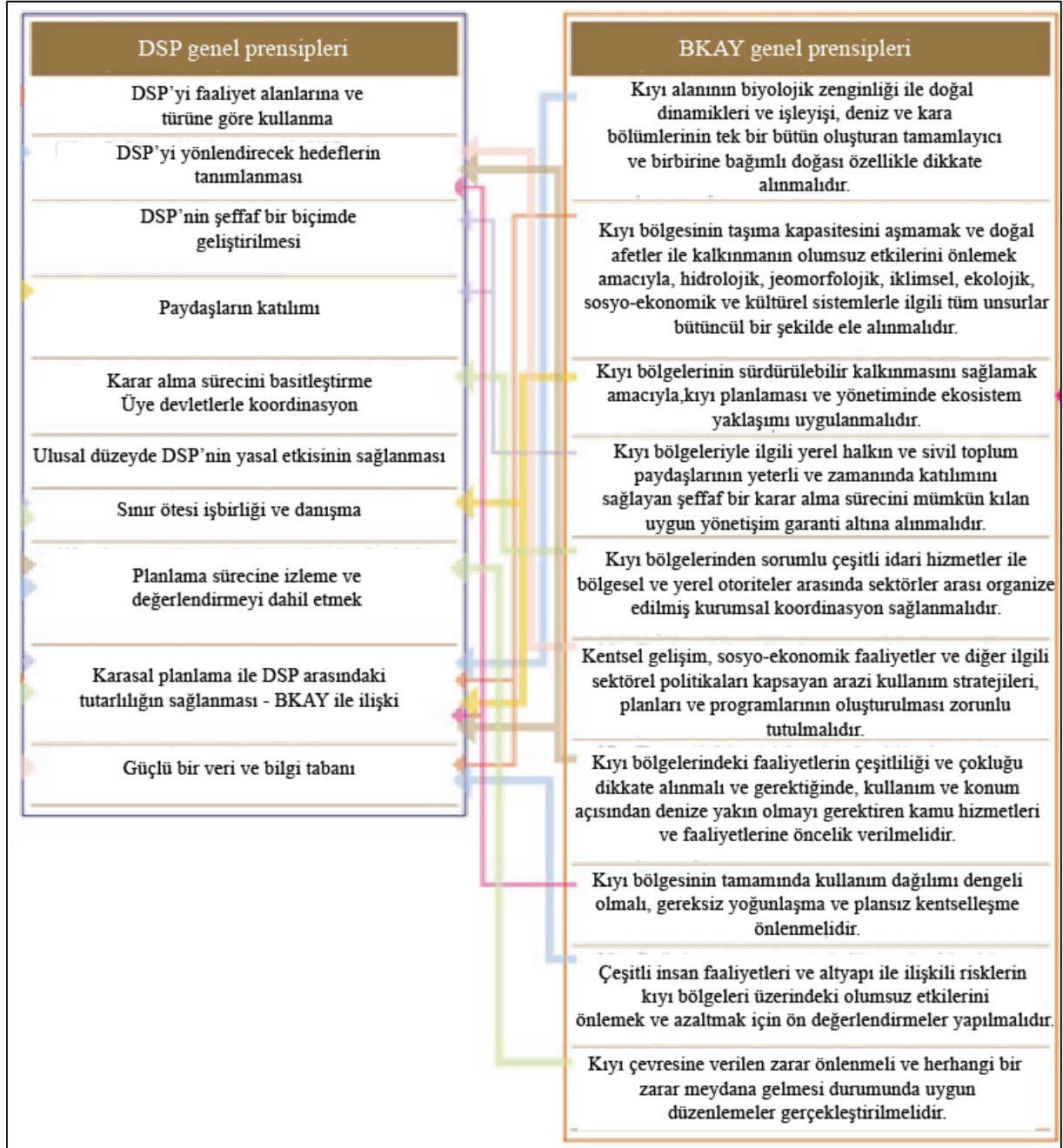


Şekil 1.15. Adım adım DSP yaklaşımı (IOC, 2009)



Şekil 1.16. Sürekli DSP döngüsü (IOC, 2009)

Şekil 1.16'daki sürekli DSP döngüsü ile Şekil 1.11'teki BKAY döngüsü birçok açıdan benzerlik göstermektedir. İkisinin orta noktasında da paydaşların katılımı olmakla beraber ikisi de döngüsel ve sürekli süreçlerdir. Daha önce de belirtildiği gibi benzer olarak BKAY prensipleri ile DSP'nin adımları arasında da birçok bağlantı vardır. Albotoush ve Shau hwai (2022) yapmış oldukları çalışmalarında BKAY ile DSP süreçleri arasındaki ilişkiyi literatürdeki tanımları analiz ederek ortaya koymayı hedeflemişlerdir. BKAY ile DSP arasındaki süreçsel ilişkinin bütünleşik mi yoksa bağlantılı mı olduğunu araştırmışlar ve çalışmanın sonunda bağlantılı olduğu sonucuna varmışlardır. Ramieri ve diğ. (2019) ise bu bağlantıları Şekil 1.17'deki gibi özetlemişlerdir.



Şekil 1.17. BKAY ve DSP arasındaki bağlantı (Ramieri ve diğ., 2019)

Şekil 1.17'deki DSP'nin temel prensipleri Avrupa Komisyonu (2011) tarafından hazırlanan rapordan alınmıştır (Ramieri ve diğ., 2019).

PAP / RAC (Priority Actions Programme Regional Activity Centre – Birleşmiş Milletler Çevre Programı Akdeniz Eylem Planı Öncelikli Eylem Programı Bölgesel Aktivite Merkezi) tarafından SUPREME (Supporting Maritime Spatial Planning in the Eastern Mediterranean – Doğu Akdeniz'de Deniz Saha Planlamasının Desteklenmesi) ve SIMWESTMED

(Supporting Maritime Spatial Planning in the Western Mediterranean Region – Batı Akdeniz Bölgesinde Deni Saha Planlamasının Desteklenmesi) kapsamında hazırlanan raporda DSP ve BKAY'ın birlikte planlamasıyla kara – deniz etkileşimi, KDE, (Land Sea Interaction – LSI) terimi ortaya çıkmıştır. KDE terimi genellikle deniz ve kıyı alanlarının planlanması ve yönetimi bağlamında kullanılır. Karasal ve deniz alanları arasındaki etkileşimler, örneğin, karasal bir tarım alanından bir tatlı su kaynağına, kıyı suları ile temas halinde olan kirlenmelerin bulaşması veya açık deniz rüzgar çiftliğini ulusal elektrik şebekesine bağlamak için deniz alanına deniz altı kablosu döşenmesi gibi durumları içerebilir (Ramieri ve diğ., 2019). KDE aslında DSP ve BKAY gibi bir yönetim süreci olmamakla beraber DSP ve BKAY süreçlerinin içinde bulunmaktadır. Dolayısıyla, KDE, DSP ve BKAY'da önemli bir bileşen olarak düşünülebilir.

AB'nin 2014/89/EU sayılı DSP direktifi, planlama sürecinin kara – deniz etkileşimlerini dikkate alması ve üye devletler arasında iş birliğini teşvik etmesi gerektiğini belirtir. Tanım sağlamamakla birlikte, söz konusu bu direktif KDE kavramına birkaç yerde atıfta bulunmaktadır (Ramieri ve diğ., 2019):

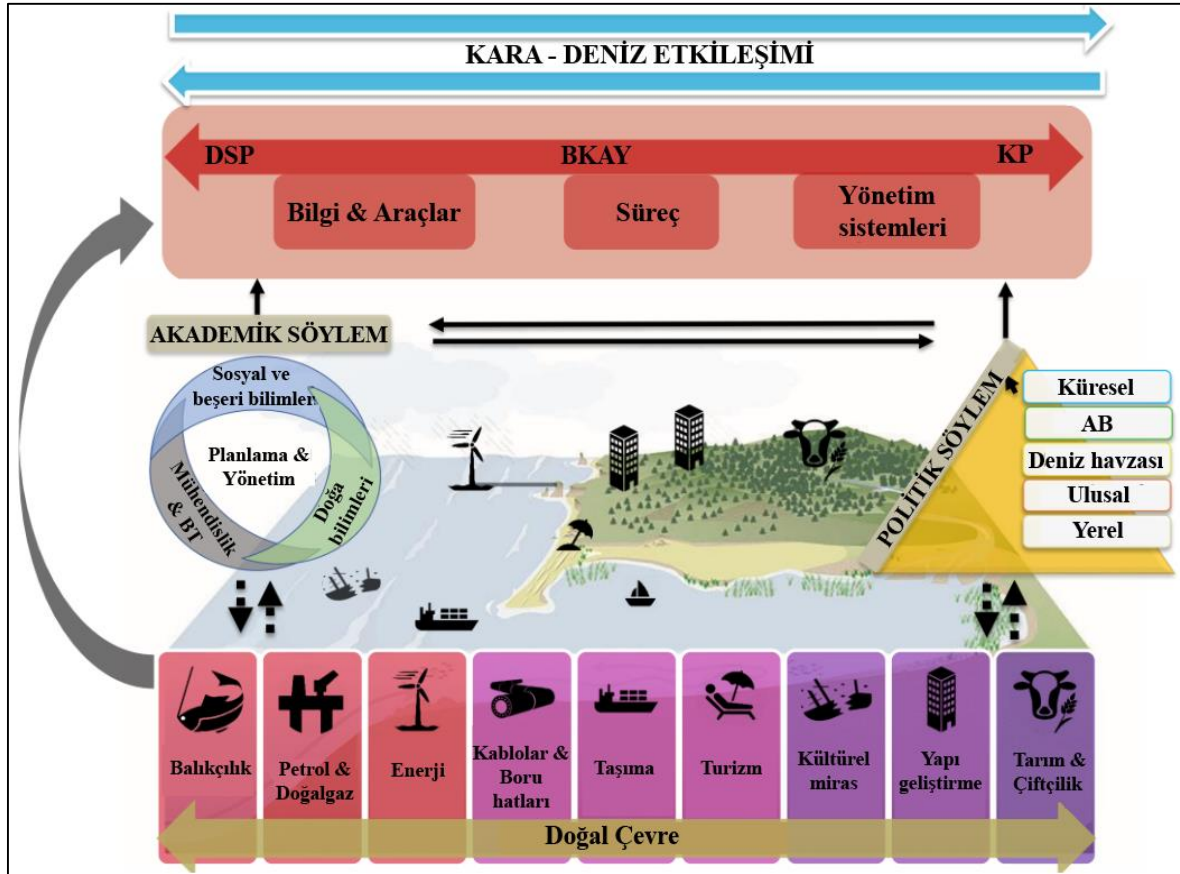
- Madde 1: Direktifin konusunda değinilmektedir.
- Madde 4: DSP'nin geliştirilmesi ve uygulanmasına atıfta bulunur. 2. paragraf, DSP sürecinin tamamında üye devletlerin KDE'yi dikkate almaları gerektiğini belirtir. 5. paragraf, deniz alanı planlaması yapılırken üye devletlerin deniz bölgelerinin özelliklerini, ilgili faaliyetleri ve mevcut ve gelecekteki kullanımların çevre ve doğal kaynaklar üzerindeki etkilerini ve KDE'yi dikkate almalarını gerektirir.
- Madde 6, Paragraf 2(a): DSP için asgari gereksinimlerden birinin üye devletlerin KDE'yi dikkate almaları olduğunu belirtir.
- Madde 7, Paragraf 1: KDE'nin doğasını ve diğer resmi veya gayri resmi süreçlerle, örneğin BKAY ile ilişkilerini tanımlar.
- DSP direktifinin gerekçeleri arasında 9, 16 ve 18. paragraflarda da KDE'ye atıfta bulunmaktadır.

AB Denizcilik İşleri ve Balıkçılık Genel Müdürlüğü (European Commission Directorate General for Maritime Affairs and Fisheries – EC DG MARE) tarafından geliştirilen KDE genel çerçevesinde, “KDE, kara – deniz sınırında hem doğal süreçleri hem de kıyı bölgesinde

gerçekleşen sosyoekonomik insan faaliyetlerinin etkisini içeren karmaşık bir olgu” olarak tanımlanmıştır (DG MARE, 2017).

Tüm bunlardan yola çıkarak KDE’nin, BKAY ve DSP sürecinin kilit bir unsuru olduğu söylenebilir. Ayrıca KDE kıyı hattını aşan ekolojik süreçleri, kara ve deniz kaynaklı sosyoekonomik faaliyetler ile insan toplulukları arasındaki etkileşimleri içerir. Haziran 2017’de Malta, AB’nin Denizcilik İşleri ve Balıkçılık Genel Müdürlüğü (EC DG MARE) ve Avrupa DSP Platformu tarafından organize edilen “Deniz Saha Planlaması Konferansı: Kara – Deniz Etkileşiminin Ele Alınması (KDE)”na ev sahipliği yaptığı konferansta DSP çerçevesinde KDE konusunu ele alarak katılımcılar arasında tartışma ve bilgi alışverişi için bir fırsat sunmuştur. Tartışma, kara ve deniz arasındaki etkileşimlerin ve çevresel, sosyoekonomik ve yönetim unsurları arasındaki karmaşıklığı ortaya koymuş ve kara ve deniz paydaşları arasında KDE sorunlarına dair geniş bir temel anlayış geliştirilmesi gereğini vurgulamıştır. Kara ve deniz arasında bütünleşik bir bölgesel yaklaşıma ihtiyaç olduğu ana mesaj olarak öne çıkmıştır (Ramieri ve diğ., 2019). Buraya kadar anlatılan tüm bilgiler ışığında Morf ve diğ. (2019) KDE’nin şematik gösterimini Şekil 1.18’deki gibi vermişlerdir.

Şekil 1.18’de KP ile gösterilen kısım karasal planlamayı temsil etmektedir. BKAY ve DSP yönetim alanı dikkate alarak düşünülürse, karasuları BKAY odaklı olup münhasır ekonomik bölge DSP odaklı denilebilir. Dolayısıyla iki yönetim bölgesi arasında örtüşen bölgeler ortaya çıkabilir. Bu nedenle, ortaya çıkan herhangi bir çatışmayı önlemek için örtüşen bölgeler uygun şekilde ele alınmalıdır (Albotoush ve Shau hwai, 2022). Buna, kıyının dinamik yapısı ve sınırların belirsizliği eklendiğinde iki yönetim bölgesinin açıkça tanımlanması daha zor bir durum halini alır. Üstelik, yönetim ve planlama çabalarının sınırları sıklıkla politik kaygılara dayalı olarak belirlenir ve ekolojik bir bakış açısından mutlaka anlamlı olmayabilir, çünkü etkilerin yönetim alanları sınırların dışından kaynaklanabilir (Alvarez – Romero ve diğ., 2011). Bu yüzden DSP sınır ötesi yaklaşımı da içermektedir. Tüm bu bilgiler ışığında Türkiye’nin, sınırlarını çevreleyen deniz kaynaklarını da toprak parçası kadar önemli birer vatan parçası kabul eden Mavi Vatan (Şekil 1.19) ifadesi ise, uluslararası ilişkiler literatüründe yer almaya başlamıştır (Yaycı, 2022).



Şekil 1.18. KDE'nin şematik gösterimi (Morf ve diğ., 2019)



Şekil 1.19. Mavi vatan doktrini kapsamında Türkiye'nin su sınırları, Mavi Vatan (Yaycı, 2022)

Doğu Akdeniz başta olmak üzere kıyıdaş olduğu denizlerde üstlendiği aktif rol, Türkiye'nin diğer kıyıdaş ülkeler ile gerçekleştirebilecek çatışma ve gerginlikler karşısında deniz hukukunda daha etkin bir konumda olmasını gerekli kılmaktadır. Bu doğrultuda ortaya atılan Mavi Vatan doktrini ise, ülkelerin artan ekonomik kaynak gereksinimleri doğrultusunda, sahip oldukları deniz kaynaklarının da tıpkı toprak parçası gibi anavatanı olduğu tezini savunmaktadır (Yaycı, 2022). 2021 yılında Türkiye deniz üstü rüzgar santrallerinin yatırımlarının yapılması, geliştirilmesi, devlet- özel sektör iş birliğinin uyumlu bir şekilde yürütülmesi açısından Deniz üstü Rüzgar Enerjisi Derneği (DÜRED) de Mavi Vatanın Enerjisi ilkesiyle kurulmuştur (URL – 4).

Sürdürülebilir mavi ekonomi eylem planı (mavi plan)

Mavi ekonomi en yalın haliyle deniz ile ilgili ekonomi olarak adlandırılabilir. Dünya Bankası'na göre, mavi ekonomi, “okyanus kaynaklarının ekonomik büyüme, yaşam standartlarının iyileştirilmesi ve istihdam yaratılması amacıyla sürdürülebilir kullanımı, aynı zamanda okyanus ekosisteminin sağlığının korunması”dır. Mavi enerji en yalın haliyle deniz ortamından elde edilen enerji olarak tanımlanmaktadır. Ama her kurum kendi açısından mavi enerjiyi tanımlarken farklılıklar getirmiştir. Avrupa Komisyonu, mavi ekonomiyi “okyanuslar, denizler ve kıyılarla ilgili birbirine bağlı geniş bir yelpazedeki sektörlerin tüm ekonomik faaliyetleri” olarak tanımlamaktadır. İngiliz Milletler Topluluğu, mavi ekonomiyi “okyanus veya ‘mavi’ kaynakların daha iyi yönetilmesini teşvik eden gelişmekte olan bir kavram” olarak görmektedir. Mavi Ekonomi Merkezi, mavi ekonominin Dünya genelinde yaygın olarak kullanılan bir terim olduğunu ve birbiriyle ilgisi olan ancak üç farklı anlama geldiğini belirtmektedir. Bunlar şöyledir,

- Okyanusların ekonomilere genel katkısı
- Okyanusların çevresel ve ekolojik sürdürülebilirliğini ele alma ihtiyacı
- Okyanus ekonomisinin hem gelişmiş hem de gelişmekte olan ülkeler için bir büyüme fırsatı olarak görülmesi

Birleşmiş Milletler temsilciliği yakın zamanda mavi ekonomiyi, “okyanus kaynaklarının sürdürülebilir olup olmadığını belirleyen çeşitli ekonomik sektörler ve ilgili politikaların bir araya gelmesiyle oluşan bir ekonomi” olarak tanımlamıştır. Mavi ekonominin önemli bir zorluğu, sürdürülebilir balıkçılıktan ekosistem sağlığına ve kirliliğin önlenmesine kadar

okyanus sürdürülebilirliğinin birçok yönünü anlamak ve daha iyi yönetmektir. İkinci olarak, mavi ekonomi bize okyanus kaynaklarının sürdürülebilir yönetiminin, sınırların ve sektörlerin ötesinde, daha önce ulaşılmamış bir ölçekte çeşitli ortaklıklar yoluyla iş birliği gerektireceğini hatırlatmaktadır. Ayrıca BM, mavi ekonominin BM'nin sürdürülebilir kalkınma hedeflerine ulaşmada yardımcı olacağını, bu hedeflerden birinin ise 14. hedef olan “Sudaki Yaşam” olduğunu belirtmektedir (URL – 5).

Ülkemizde de Türkiye Yüzyılı kapsamında sürdürülebilir mavi ekonomi eylem planı dikkate alınmaktadır. Bu kapsamda ülkemiz söz konusu bu plan çerçevesinde DSP ile denizel alanlarda yürütülecek etkinlikler bağlamında çatışmaları azaltmak ve farklı faaliyetler arasında sinerjiler yaratmak; öngörülebilirlik, şeffaflık ve yasal dayanaklar aracılığıyla yatırımları teşvik etmek; ülkeler arasında yenilenebilir enerjinin geliştirilmesi, nakliye hatlarının düzenlenmesi, boru hatları, denizaltı kabloları ve benzeri yatırımlar için sınır ötesi iş birliğinin artırılması; korunacak alanları tespit edip, ekosistemler üzerindeki etkilerin hesaplanmasıyla alanın birden çok kullanımı için fırsatların belirlenmesi gibi hedefler belirlemiştir. Plan ile kara ve denizel alanların kesişim noktası olan kıyı alanlarının potansiyelleri ortaya konularak koruma – kullanma dengesi çerçevesinde yönetimi ve planlanması sağlanacaktır (URL – 6).

Yine bu plan kapsamında ülkemizin vizyonu, denize dayalı ekonomik büyüme sağlanırken denizlerin ve deniz ekosistemlerinin korunmasına yönelik olarak 2053 Sürdürülebilir Mavi Ekonomi Eylem Planı hazırlanmasıdır. AB’de tamamlanan Deniz Saha Planlamasının Türkiye’de uygulanmasına ciddi bir ihtiyaç duyulmaktadır. Bu noktada Mavi Plan ile Deniz Saha Planlamasına yönelik altyapıyı oluşturmak ve bu amaçla bir yöntem ve yol haritası geliştirilmesi ülkemizin önemli ihtiyaçlarında birini oluşturmaktadır. Böylece deniz alanlarını kullanan sektörler ve ilgili kurum ve kuruluşlar arasındaki iş birliğinin geliştirilmesi de sağlanacaktır. Ayrıca, deniz saha planlamasının çevresel açıdan önemli katkılarından biri de deniz alanlarının planlanması ile karasal ve denizel biyoçeşitliliği korumak için Deniz Koruma Alanları ilan etmektir. Türkiye dört farklı deniz tarafından çevrelenmiş olup benzersiz deniz ekosistemlerini korumak için daha fazla deniz koruma alanlarına ihtiyaçları vardır. Ek olarak, Türkiye’de DSP çalışmalarının yürütülmesi ile denizlerimizin Mavi Ekonomi ve Yeşil Enerji potansiyelinin ortaya çıkarılmasına katkı sağlayacaktır. Türkiye kıyı alanları için hazırlanan BKAY planları da DSP ile bütünleşik hale

getirilmesi ve açık deniz alanlarının da üst ölçek ve sonrasında da alt ölçek planlamasının tamamlanması sağlanacaktır (URL – 6).

Mavi ekonominin bileşenleri olarak değerlendirilebilecek ve DSP sürecinde dikkate alınması gereken kara – deniz etkileşimi bulunan sekiz deniz sektörü Avrupa Komisyonu’nun 2018 yılında yayınladığı “Deniz saha planlamasında kara – deniz etkileşimleri” raporunda aşağıdaki gibi verilmiştir (Avrupa Komisyonu, 2018).

- Akuakültür²
- Desalinasyon³
- Balıkçılık
- Deniz kabloları ve boru hatları
- Mineraller ve madencilik
- Limanlar ve taşımacılık
- Turizm ve kıyisal rekreasyon
- Deniz üzeri enerji

Tüm bu sektörler düşünüldüğünde mavi ekonominin ne denli büyük bir ekonomi olduğu görülebilir. Maddi açıdan, mavi ekonomi büyük bir potansiyele sahiptir. 2021 itibarıyla okyanus tabanlı endüstriler, Dünya genelinde gayri safi yurt içi hasıla'nın (GSYİH) % 3,5'ini oluşturmakta ve 2030 yılına kadar bu değerin iki katına çıkması beklenmektedir. Bu, okyanus kaynaklarının sürdürülebilir şekilde kullanılmasıyla ekonomik büyüme, iş yaratma ve yaşam standartlarını artırma fırsatları sunmaktadır (URL – 7).

Bu sektörlerden daha önce bahsedilen deniz üzeri enerji söz konusu bu pastanın en büyük kalemlerinden biridir. Mavi enerji, deniz ve okyanuslardan elde edilen yenilenebilir enerji kaynaklarını ifade eder. Bu enerji türü, gerek açık deniz ortamındaki rüzgar enerjisi gerekse su kütlelerinden elde edilen enerji potansiyelini kullanarak elektrik üretimi veya diğer enerji ihtiyaçlarını karşılamak amacıyla geliştirilmiştir (URL – 7).

² Akuakültür, su ortamlarında su ürünlerinin, bitkilerin ve diğer canlıların kontrollü bir şekilde yetiştirilmesi ve üretimi sürecidir.

³ Desalinasyon, tuzlu suyun içme suyu veya tarımsal sulama için kullanılabilir hale getirilmesi sürecidir.

Çalışmanın amaçları

Yenilenebilir enerji ve mavi ekonomi için planlama stratejisi geliştirilmesi

Bu çalışma, Türkiye'nin açık deniz enerji potansiyelinden yararlanarak rüzgar, dalga ve akıntı enerjilerini entegre eden tekil kazıklı kombine bir yapı tasarlamayı amaçlamaktadır. Bu kapsamda geliştirilen model, sürdürülebilir bir enerji üretimi için çevresel ve ekonomik boyutları kapsamaktadır. Türkiye'nin 8200 km'lik kıyı şeridi ve 462 000 km²'lik deniz alanı düşünüldüğünde, bu model, ülkemizin yenilenebilir enerji alanındaki ulusal ve uluslararası hedeflerine ulaşmasında stratejik bir öneme sahiptir.

Güvenilirliğe dayalı kombine ADRES tasarım modeli geliştirilmesi

Çalışma, açık deniz rüzgar türbinleri ve kombine enerji sistemleri için güvenilirliğe dayalı tasarım süreçlerini detaylandırmaktadır. Tasarım süreci, meteorolojik, jeolojik ve çevresel verilerle entegre edilmiş bir akış şemasıyla, mühendislerin karar mekanizmalarını desteklemek için sistematik bir yol sunmaktadır. Kazık boyutlandırma, taşıma kapasitesi analizi, stabilite kontrolü ve uzun dönem davranış değerlendirmeleri gibi kritik aşamaları içeren bu model, sürdürülebilirliği ve ekonomik uygulanabilirliği ön planda tutmaktadır.

Bu çalışma, açık deniz enerji sistemleri için geliştirilen tekil kazıklı kombine yapı modeliyle katkı sunmaktadır. Model, zemin profili, dalga yükleri ve rüzgar etkilerini detaylı bir şekilde dikkate alarak kazık temellerin boyutlandırılması, taşıma kapasitesi analizi ve stabilite kontrolü gibi alanlarda güvenilirliğe dayalı bir yaklaşım getirmektedir. Güvenilirliğe dayalı tasarım ilkelerini temel alan bu model, deniz saha planlamasına girdi sağlamaktadır.

Mavi Vatan ve deniz saha planlaması için ÇKKV modeli geliştirilmesi

Bu çalışma, Türkiye'nin "Mavi Vatan" doktrini çerçevesinde deniz saha planlamasına yönelik öncü bir ÇKKV modeli geliştirmeyi hedeflemektedir. Özellikle Kıyıköy gibi yüksek potansiyele sahip bölgelerde kombine enerji sistemlerinin kurulumu için bir rehber oluşturan bu model, Türkiye'nin yenilenebilir enerji kapasitesini artırırken, çevresel sürdürülebilirliğe katkı sağlamayı amaçlamaktadır. Aynı zamanda, çalışmanın sunduğu bu özgün tasarım

modeli, gelecekte benzer sistemlerin tasarımında ve uygulamalarında referans olarak kullanılabilecektir.

Sürdürülebilir mavi enerji uygulaması

Geliştirilen model, rüzgar, dalga ve akıntı enerjisini aynı yapıda birleştirerek deniz mühendisliği alanında çok disiplinli bir yaklaşımı temsil etmektedir. Çalışma, farklı enerji türlerini bütünleşmiş bir şekilde değerlendiren bu tasarımıyla, deniz mühendislerinin çevresel sürdürülebilirlik ve enerji verimliliği odaklı sistemler tasarlamasına rehberlik etmektedir. Ayrıca, doğal frekans analizi ve uzun dönem davranış analizlerinde kullanılan yenilikçi yöntemlerle, deniz mühendisliğinin hesaplama ve simülasyon tekniklerini ileri taşımaktadır.

Bu çalışma, açık deniz enerji sistemlerinde sürdürülebilir tasarım ve uygulamaları teşvik eden bir model sunarak mühendislik bilimlerine önemli bir katkı sağlamaktadır. Geliştirilen akış şeması ve karar verme süreçleri hem inşaat hem de deniz mühendisliği uygulamalarında esnek, ölçeklenebilir ve tekrarlanabilir bir yöntem oluşturmaktadır. Çalışmanın sunduğu bu sistematik yaklaşım, mühendislerin çevresel etkileri minimize ederek enerji projelerinde daha sorumlu tasarımlar gerçekleştirmesine olanak tanımakta ve disiplinler arası iş birliğini desteklemektedir.

Araştırma soruları

Mavi ekonomi ve buna bağlı olarak mavi enerjinin gündemde ve sürekli gelişmekte olan bir sektörler bütünü olduğu söylenebilir. BKAY'ın DSP'ye entegre edilmesiyle birlikte bu sektörlerin sürdürülebilir ve birbirleriyle etkileşim içinde hareket etmeleri ekosistem için mutlaka gerekli bir olgudur.

Mavi enerji açısından konuyu ele aldığımızda, tekil kazıklı deniz üzeri rüzgar türbinleri tüm deniz üzeri rüzgar türbinlerinin en yaygın kullanılan temel tipi olup, % 75 – 80'lik bir dilimini oluşturmaktadır. 2023 sonu itibarıyla deniz üzeri rüzgar enerji kapasitesi toplamda 67 GW'ı bulmuştur ve bu kapasitenin büyük kısmını tekil kazık temelli türbinler meydana getirmektedir. Bunun nedeni, bu temel türünün sığ deniz bölgelerinde ekonomik ve kurulum açısından avantajlı olmasıdır (URL – 8). Son zamanlarda yapılan çalışmalar tek bir kazığın

sabitliğinin sağlanmasıyla farklı türbinlerin bir arada kullanılması gündeme gelmiştir. Bu sistemler kombine sistemler olarak veya hibrid sistemler olarak adlandırılmaktadır. Tekil kazıklı temellerin çözümünde ise literatürde birçok mevcut yöntem vardır. Yapılan çalışmalarda ise söz konusu bu yöntemlerden birinin seçimi ile çözümler yapılmıştır. Bu çalışmada tüm bu bilgiler ışığında aşağıdaki sorular cevaplanmaya çalışmıştır.

- Kırklareli – Kıyıköy bölgesi, rüzgar, dalga ve akıntı enerjilerini entegre eden kombine bir enerji sisteminin kurulumu için uygun koşullara sahip midir?
- Türkiye'nin denizel, meteorolojik, jeolojik ve hidrodinamik özellikleri dikkate alındığında, kombine sistemin tasarımında hangi özgün kriterler belirleyicidir?
- Kombine enerji sistemleri için kullanılan p – y yöntemi ve doğal frekans analizleri, tasarımın güvenilirlik açısından optimize edilmesine katkı sağlar mı?
- Farklı tasarım yöntemleri dikkate alındığında, güvenilirliğe dayalı analiz, tasarım için uygun bir model midir?
- Kombine ADRES sistemlerin uzun dönem davranışlarının analizi, sistem dayanıklılığı, enerji verimliliği ve fizibilite açılarından uygulanabilir bir proje mi?
- Kombine deniz üzeri rüzgar türbini, tekil deniz üzeri rüzgar türbinine kıyasla daha optimum bir tasarım sunmakta mıdır?
- Deniz Saha Planlaması bakış açısından bu çalışmanın önemi nedir ve bu alanda ne tür katkılar sunmaktadır?
- Türkiye'nin "Mavi Vatan" doktrini kapsamında, geliştirilen kombine enerji modeli mavi ekonomi hedeflerine nasıl bir katkı sunabilir?
- Tezde geliştirilen model, Deniz Saha Planlaması süreçlerinde sürdürülebilir enerji üretimi ve çevresel koruma dengesini nasıl sağlayabilir?
- Tezin sunduğu özgün planlama ve güvenilirliğe dayalı tasarım modeli, Türkiye'nin açık deniz enerji sistemlerinde ulusal ve uluslararası alanda rekabet gücünü nasıl artırabilir?
- Bu model, gelecekte kombine sistemlerin uygulanabilirliği ve mühendislik tasarım süreçleri için bir rehber niteliği taşıyabilir mi? “

Çalışmanın özgünlüğü

Türkiye'ye özgü mavi enerji tasarım ve planlama modeli

Bu çalışma, Türkiye'nin kıyı ve denizel potansiyelini kullanarak, rüzgar, dalga ve akıntı enerjilerini entegre eden özgün bir kombine mavi enerji yapısı modeli geliştirmektedir. Özellikle Kırklareli – Kıyıköy bölgesine odaklanarak, ülkemizin coğrafi özellikleri ve denizel koşullarına uygun ilk kombine mavi enerji sistem tasarımını sunmaktadır. Bu bağlamda, çalışma hem yerel hem de uluslararası literatürde eksik olan, Türkiye'ye özgü yerli ve milli bir model geliştirme hedefini gerçekleştirilmesiyle öne çıkmaktadır.

Güvenilirliğe dayalı tasarım ile interdisipliner yaklaşım

Çalışma, tekil kazıklı kombine sistemlerin tasarımında güvenilirlik analizi, doğal frekans değerlendirmesi ve uzun dönem davranış analizlerini birleştiren interdisipliner bir yaklaşım sunmaktadır. Bu yaklaşım, Türkiye'nin açık deniz mavi enerji projeleri ve Deniz Saha Planlaması (DSP) için literatürdeki boşluğu doldurmaktadır.

Mavi ekonomi ve deniz saha planlaması stratejisi

Geliştirilen model, Türkiye'nin "Mavi Vatan" doktrini çerçevesinde deniz saha planlaması ve mavi ekonomi hedeflerine özgün bir katkı sunmaktadır. Çalışma, sadece mühendislik tasarımıyla sınırlı kalmayarak, denizel alanların etkin ve sürdürülebilir kullanımına yönelik bir planlama modeli geliştirmekte ve mavi enerji yatırımları için bilimsel bir zemin hazırlamaktadır. Bu bağlamda, modelin hem enerji üretim kapasitesini artırması hem de çevresel sürdürülebilirliği desteklemesi, gelecekteki projeler için öncü ve yol gösterici bir nitelik taşımaktadır.

Sonuç olarak bu çalışma, DSP için mavi ekonomi odaklı yeni bir Çok Kriterli Karar Verme Matris uygulaması geliştirmekte, mavi enerji yatırımları için özgün bir Kombine ADRES tasarımı sunmaktadır. Kırklareli – Kıyıköy bölgesinde kombine rüzgar, dalga ve akıntı enerjisi sistemlerinin güvenilirliğe dayalı tasarımına odaklanarak, Türkiye'nin denizel enerji potansiyeline katkıda bulunmayı amaçlamaktadır. Türkiye'de tasarımı ele alınan ilk kombine mavi enerji sistemi olarak ön plana çıkmaktadır. Bu çalışmanın amacı Türkiye'ye

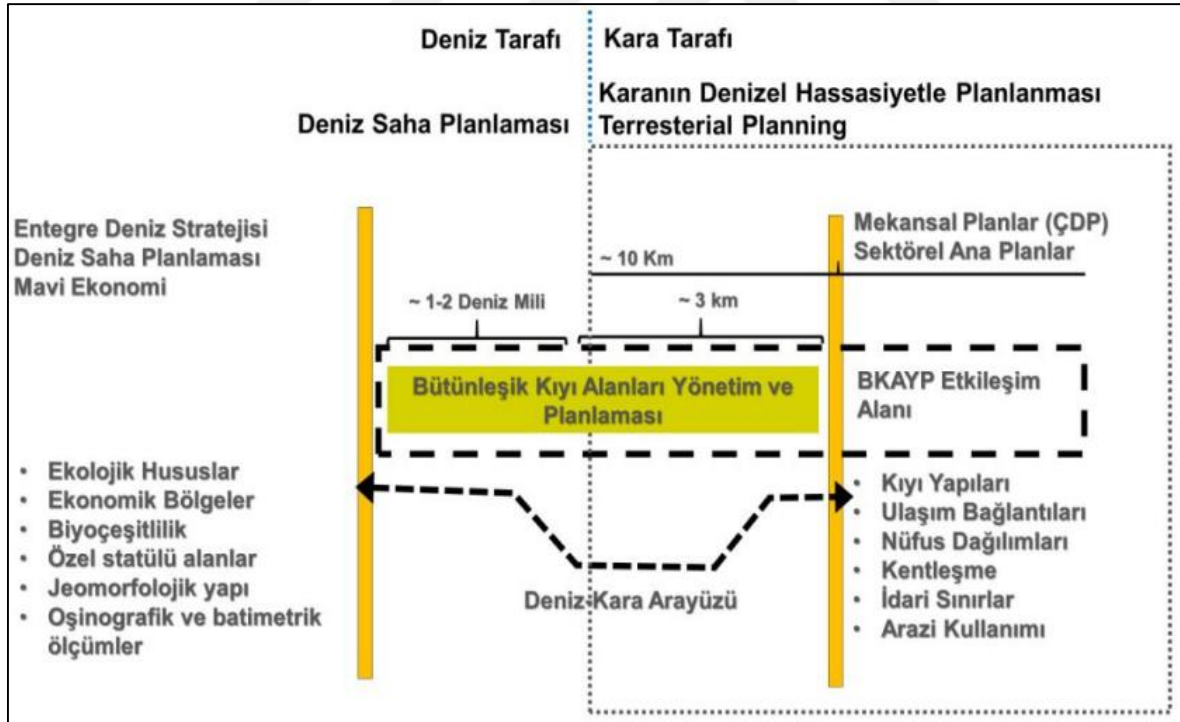
özgü Mavi Vatan temelli bir DSP planlama ve Mavi Ekonomi özelinde bir ADRES modeli geliştirmektir.

Özellikle tekil kazıklı kombine sistemlerin güvenilirlik analizine dayalı tasarımı üzerine yapılan bu çalışma, literatürdeki bu boşluğu doldurmayı hedeflemektedir. Ayrıca, kombine sistem şeklinde tasarlanan yapıların doğal frekans analizinin hesaplanmasında literatürde değinilmeyen bir yöntem ile bu alanda bilime önemli bir katkı sağlayacağı öngörülmektedir. Geliştirilen tasarım modeli, açık deniz rüzgar türbinleri ve kombine sistemlerin mühendislik süreçlerini detaylı bir şekilde ele alarak, tasarımın her aşamasını kapsayan bir yol haritası sunmaktadır. Modelin akış şeması, tasarım kriterlerinin belirlenmesinden başlayarak, meteorolojik ve jeolojik veri girişleriyle entegre edilen hesaplama adımlarını içermekte ve nihai tasarım kararlarının güvenilirliğe dayalı olarak optimize edilmesini sağlamaktadır. Akış şeması; kazık boyutlandırma, taşıma kapasitesi, stabilite kontrolü ve uzun dönem davranış analizi gibi kritik süreçleri birbiriyle ilişkilendirerek, karar verme mekanizmasını sistematik ve tekrarlanabilir bir hale getirmiştir. Bu yapı, mühendislerin tasarım sürecindeki belirsizlikleri minimize etmesine ve güvenilir sonuçlara ulaşmasına olanak tanımaktadır. Ayrıca, tasarımın kabul edilebilir olmadığı durumlarda yenileme döngüleri sunarak, modelin esneklik ve uygulanabilirlik açısından yüksek bir değer taşımasını sağlamaktadır.



2. LİTERATÜR TARAMASI

Türkiye’de BKAY süreci ve çalışmaları Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı (ÇŞİDB) tarafından sürdürülmektedir. Kıyı alanlarında, kara tarafının planlanmasını tanımlayan karasal plan ile denizel alanın planlamasını tanımlayan deniz saha planlaması kavramlarının örtüşme bölgesi olarak değerlendirilebilen, karasal alan üzerinde denizel alan etkileri gözetilerek kara – deniz etkileşiminin stratejik planlanmasını betimleyen ve bakanlıkça çalışmaları sürdürülen BKAY planları, Dünya örneklerinden farklılık gösteren tanımı, içeriği, ölçeği, plan kararları ve planlama yaklaşımı ile kendine özgü bir dile sahiptir. Bu planlar; yerel ve bölgesel ölçekte yapılabilen, bir tür karasal plan olarak tanımlanabilen bölgesel plan kararlarının, denizel alanın ötesine geçerek, bu alanların sahip olduğu kara – deniz etkileşimlerini içeren bir yaklaşımla planlandığı çalışmalardır (Söylemez ve diğ., 2018). DSP ve BKAY için sınırlar ve genel bir perspektif Söylemez ve diğ. (2018) tarafından Şekil 2.1’deki gibi verilmiştir.



Şekil 2.1. Türkiye’de BKAY ve planlaması (Söylemez ve diğ., 2018)

Türkiye’de BKAY’a ilişkin çalışmalar 1990’lı yılların başlarında başlamış, çalışmalar genelde acil müdahale edilmesi gereken küçük ölçekli kıyı alanlarına yönelik olarak hazırlanan yönetim plan ve projeleri olarak hayata geçmiştir. 2000’li yıllarda ise ölçek daha

geniştirilmiş, özel çevre koruma bölgeleri, lagünler gibi özellikli alanlara yönelik hazırlanmaya başlamıştır. Yapılan çalışmaların ana amacı kıyı alanlarının rasyonel ve sürdürülebilir yönetimini sağlamak için yasal, kurumsal ve idari yapılanmayı, kısa, orta ve uzun vade öncelikleri, hedefleri ve uygulama programını içeren strateji belgelerinin hazırlanması ile kıyı alan kullanımlarına yönelik prensip ve standartların belirlenmesi ile kamuoyu farkındalığının artırılmasıdır. Devam eden süreçte yine aynı amaç etrafında birbirlerinden doğrudan etkilenen kıyı alanlarının bütüncül şekilde planlanması sürecine girilmiş ve körfez kıyıları, il kıyıları ve hatta bölge kıyıları ölçeğinde plan çalışmalarına başlanmıştır. Bu çalışmada 2000 sonrası yapılan planlama çalışmaları tür, yöntem, dil ve içerik bakımından ele alınarak 3 nesil olarak (Çizelge 2.1) sınıflandırılmıştır (Söylemez ve diğ., 2018)

Çizelge 2.1. Merkezi idarelerce yapılmış bütünlük kıyı alanları plan ve projeleri (Söylemez ve diğ., 2018)⁴

Bütünlük Kıyı Alanları Planlama Çalışmaları	Hazırlanma Tarihleri	Sınıflandırma
İzmit Körfezi (Kocaeli –Yalova) Bütünlük Kıyı Alanları Planı	2008	1.NESİL
İskenderun Körfezi (Adana – Mersin – Hatay) Bütünlük Kıyı Alanları Planı	2009	1.NESİL
Samsun Bütünlük Kıyı Alanları Yönetimi ve Planlaması	2011	1.NESİL
Antalya Bütünlük Kıyı Alanları Yönetimi ve Planlaması	2011	1.NESİL
İzmit Körfezi (Kocaeli – Yalova) Bütünlük Kıyı Alanları Planı (Revizyon)	2014	2.NESİL
İskenderun Körfezi (Adana – Mersin – Hatay) Bütünlük Kıyı Alanları Planı (Revizyon)	2015	2.NESİL
Bursa İli Bütünlük Kıyı Alanları Planı	2015	2.NESİL
Aydın – Muğla İlleri Bütünlük Kıyı Alanı Planı	2018	3.NESİL
Balıkesir – Çanakkale İlleri Bütünlük Kıyı Alanları Planı	2018	3.NESİL
Edirne – Tekirdağ – Kırklareli İlleri Bütünlük Kıyı Alanları Planı	2023	3.NESİL
Ordu – Giresun – Trabzon İlleri Bütünlük Kıyı Alanları Planı	2023	3.NESİL

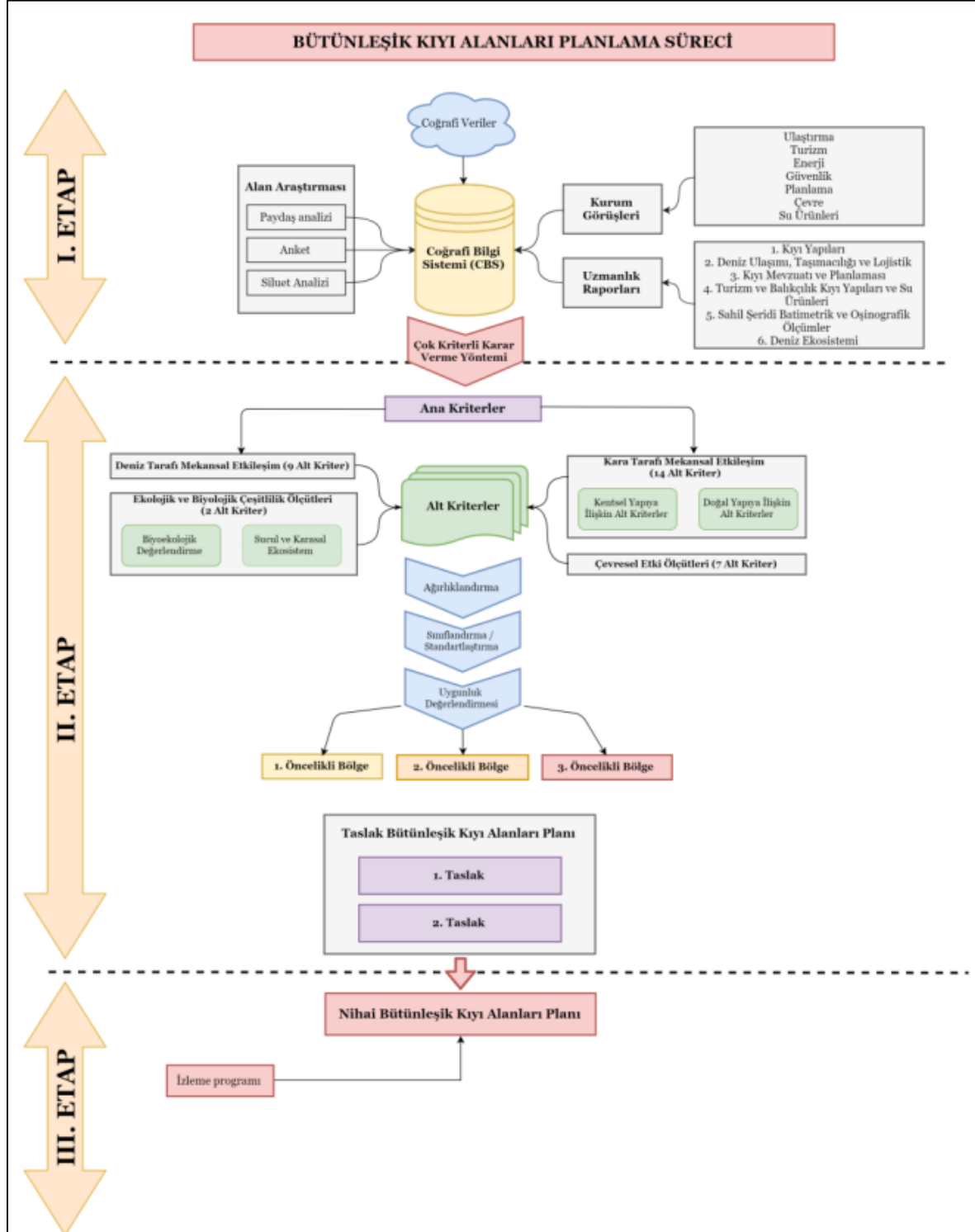
⁴ Yazar tarafından güncellenmiştir.

Çizelge 2.1'den de görüleceği üzere BKAY sürecindeki planların bazıları revizyona uğramıştır. Buradan BKAY sürecinin aslında bir önceki bölümde belirtildiği gibi döngüsel ve sürekli bir süreç olduğu söylenebilir. Nesiller arası planlama aslında adım adım BKAY'ın ülkemizde gelişim süreci olarak tanımlanabilir. 1. Nesil Planlarda kıyının mevcut durumu, eğilimler, talepler, kamu yararı, kıyının ekonomik potansiyeli, kent yaşamı, doğal ve kültürel değerler, yasal statüler, kazanılmış haklar vb. tüm verilere ve yapılan değerlendirmelere göre kararlar üretilmiştir. Ayrıca uluslararası BKAY yaklaşımları, ilke ve değerleri göz önüne alınmış; Avrupa Birliği'nin bu yöndeki çalışmaları incelenerek plana girdi sağlanmıştır. Ancak mevzuatta uygulamaya yönelik bir yeri olmayan söz konusu stratejik belge ve planlar geliştirilen dil ve yönetim modeli ile alt ölçekli planları yönlendirme aşamasında yetersiz kalmıştır (Söylemez ve diğ., 2018).

2. nesil planlarında mekânsal planlar yapım yönetmeliğinin mevzuata girmesi ile ilk nesilden farklı olarak uygulamada karşılaşılan sorunlara çözüm aranmış, dili ve yönlendirmeleri ülke plan pratiğine entegre edilmiştir. İlk neslin mecbur edici dili meri mevzuat gerçekleri doğrultusunda yeniden değerlendirilmiş gerektiğinde zorlayıcı bir dil kullanılarak yol gösterici yönü ile ön plana çıkmıştır. bununla birlikte plan içeriklerinde yeni kavramlar yer almaya başlamıştır. kıyı danışma birimi kurulması önerilerek yerelin üst ölçekli bu planın yönlendirmeleri ışığında uygulamada etkin rol oynaması sağlanmış, kıyı taşıma kapasitesi kavramı hayata geçirilerek yapılan araştırma çalışmaları kapsamında belirlenen kapasitenin aşılmaması sağlanmış, planın etki alanı genişletilerek yük elleçleme boyutunda kısıtlayıcı kararlar verilmiş, liman toplulaştırması kavramı ile ise ortak alt yapının sağlanması ve kıyı alanlarının gereksiz tahribinin engellenmesi sağlanmıştır (Söylemez ve diğ., 2018).

3. nesil planlarının temeli kıyı alanlarında yaşanan sektörel, yetkisel ve yönetsel sorunlara yönelik çözüm arayışıdır. kurumlar arasında yaşanan yönetsel sorunlar, paydaşların sürecin içinde olamayışı, kurumlar arası iletişim ve koordinasyon eksikliğine yönelik geliştirilen karar ve stratejiler şimdiye kadar yaşanan sorunlara yönelik bütünleşik kıyı alanları planlama yaklaşımını etkili bir araç haline getirme potansiyelini taşımaktadır. 3. nesil planlarda araştırma raporu ve uzman değerlendirme raporları sonuçları doğrultusunda plan kararlarının üretilmesi ve planlama alanında kıyı yapılarının yer seçimine dayanak oluşturacak bilimsel verinin üretilmesi amacıyla Coğrafi Bilgi Sistemleri (CBS) tabanlı çok kriterli karar verme yöntemi kullanılmıştır (Söylemez ve diğ., 2018; Balas, 2024).

Söylemez ve diğ. (2018) tarafından 3. Nesil BKAY planları için planlama süreci Şekil 2.2'deki gibi verilmiştir.



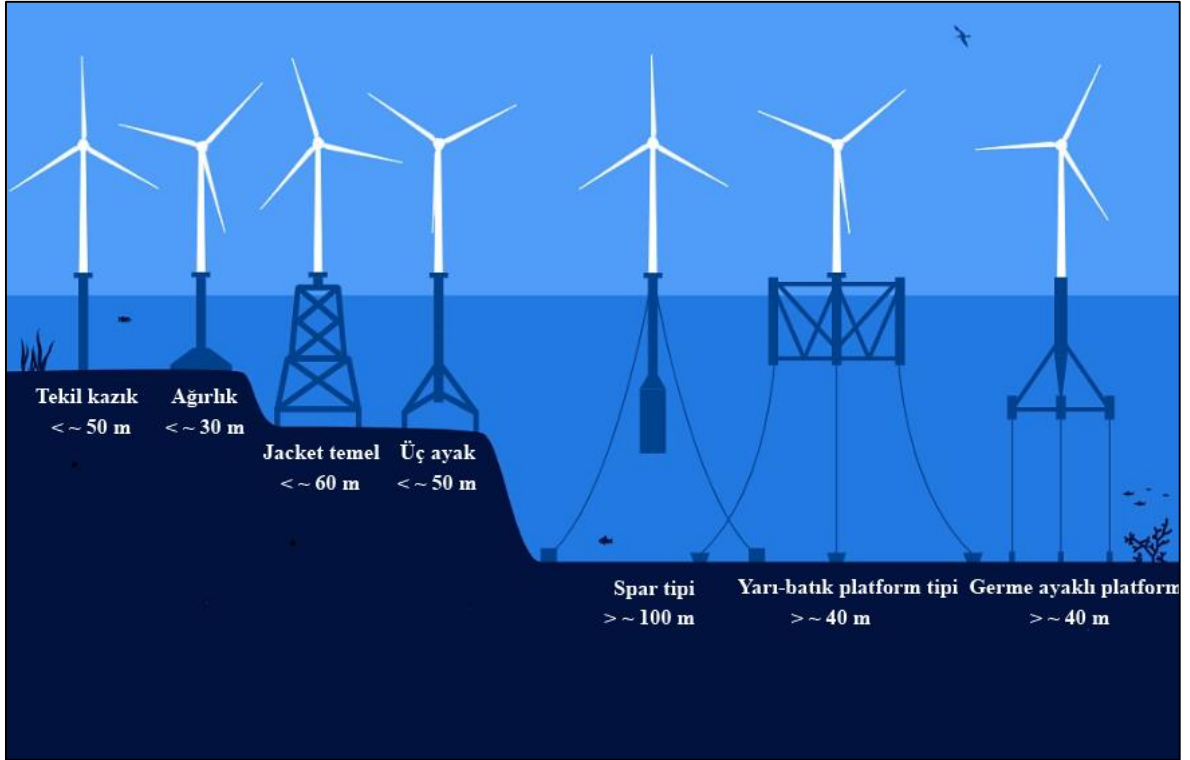
Şekil 2.2. 3. nesil BKAY planlama süreci (Söylemez ve diğ., 2018)

Şekil 2.2’den de görüleceği üzere 3.nesil BKAY planlama sürecinde daha önceki bölümde anlatıldığı üzere paydaş katılımı, sektörlerin etkileşiminin dikkate alınması, Coğrafi Bilgi Sistemleri’nin kullanılması gibi BKAY prensiplerini kapsamaktadır. İzleme süreci ve ülkemizde planların revizyonu düşünüldüğünde 3.nesil BKAY planlamalarıyla ülkemizin uluslararası konjonktüre uyum sağladığı görülmektedir.

Ülkemizde Deniz Saha Planlaması ise Türkiye Yüzyılı kapsamında ele alınan mavi plan ile gündeme gelmiştir. Bu kapsamda balıkçılık ve su ürünleri yetiştiriciliği, deniz turizmi, deniz kaynaklarının çıkarılması, deniz taşımacılığı, deniz biyoteknolojisi, gemi inşası, kıyı gelişimi ve yenilenebilir deniz enerjisi faaliyetlerini kapsayan mavi ekonomi ile ekolojik, ekonomik ve sosyal hedeflere ulaşmak için yürütülen kamusal bir süreç olan deniz saha planlaması hususlarına yönelik çalışmaların yürütülmesi planlanmaktadır (URL – 9).

Mavi ekonominin en önemli unsurlarından birisi Deniz üstü Rüzgar Enerji Santralleridir (DRES). Küresel Rüzgar Enerjisi Konseyi (Global Wind Energy Council – GWEC) tarafından hazırlanan Küresel Rüzgar Raporu 2022’ye göre, Türkiye deniz üstü rüzgar potansiyeli yüksek 4 ülke arasında yer almaktadır (URL – 10). Buna rağmen mavi enerji açısından Türkiye özelinde bir bakış açısı geliştirmek gerekirse birçok akademik araştırma olmasına rağmen hala kurulu bir enerji tesisi bulunmamaktadır. Ancak Ordu’da Türkiye’nin ilk Dünya’nın ise en büyük dalga enerji santralini inşası planlanmaktadır. Eco Wave Power Ordu’da 9 yerde ölçüm yapmış ve 77 MW’lık potansiyel tespit etmiştir. İlk etapta 4 MW’lık pilot bir tesis için anlaşma yapılmış ve “yap – sahiplen – işlet – devret” modeliyle kurulacak pilot tesisten sonra 73 MW’lık kısmın inşasına nasıl devam edileceği hususunda bir değerlendirme yapılacağı belirtilmiştir (URL – 11). Yine ilan edilen YEKA sahaları ile Türkiye’nin yakın zamanda bu konu ile ilgili önemli girişimlerde bulunacağı söylenebilir.

Deniz üzeri rüzgar türbinleri Şekil 2.3’teki gibi değişen deniz derinliklerine göre farklı tiplerde inşa edilirler (URL – 12).



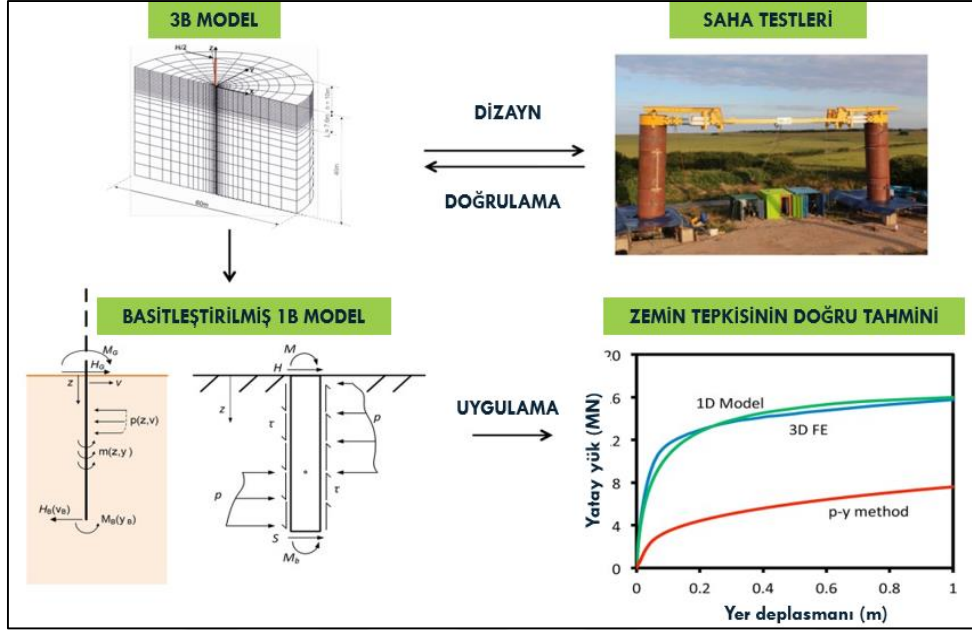
Şekil 2.3. Deniz üzeri rüzgar türbini temel türleri ve uygulanabilir su derinlikleri (URL – 12)

Şekil 2.3'ten görüleceği üzere küçük su derinliklerinde sabit temel tercih edilirken, daha büyük su derinliklerinde yüzer temel kullanılmaktadır. Genellikle bu sınır literatürde 50 metre olarak kabul edilmiştir. Söz konusu bu sınır halihazırdaki projeler incelendiğinde de görülmektedir. Norveç'in Kuzey Denizi'nde yaklaşık 140 kilometre açıklıkta bulunan Hywind Tampen deniz üzeri rüzgar türbini çiftliği toplamda 11 adet 8 MW Siemens Gamesa türbini ile toplamda 88 MW kurulu güce sahiptir. Bu proje, açık deniz petrol ve gaz platformlarına güç sağlamak üzere tasarlanmış ilk yüzer rüzgar çiftliğidir ve Snorre ile Gullfaks sahalarına elektrik sağlamaktadır. Su derinlikleri 260 m ile 300 m arasında değişkenlik göstermektedir (URL – 13). Birleşik Krallık'ın Yorkshire sahilinin yaklaşık 89 km açığında bulunan Hornsea 2 projesi ise en büyük sabit temelli deniz üzeri rüzgar türbini çiftliği projesidir. 165 adet 8 MW Siemens Gamesa türbini toplamda 1320 MW kurulu güç sağlamaktadır. Türbinlerin inşa edildiği derinlikler 30 m ile 40 m arasında değişmektedir. (URL – 14). Dolayısıyla su derinliğinin görece az olduğu yerlerde, 50 metreden daha az, deniz üzeri rüzgar türbinleri genellikle tekil bir kazık şeklinde temele sahiptir. DRES modelinin en önemli unsuru bu nedenle temel yapısıdır.

Kazığa gelen yükler büyük oranda yanal olarak etkidiğinden problem aslında temelinde yanal yüklü kazık problem olarak düşünülebilir. Bu kapsamda geliştirilen Winkler yay modeli, zemin – yapı etkileşimini modellemek için kullanılan en yaygın yaklaşımlardan biridir. Bu model, zemini, birbirinden bağımsız, sürekli olmayan ve yalnızca düşey doğrultuda çalışan elastik yaylar dizisi olarak temsil eder. Yani, her noktanın tepki kuvveti sadece o noktadaki deformasyona bağlıdır ve komşu noktalar arasında bir etkileşim bulunmaz. Winkler yay modelinin gelişmiş bir versiyonu olan $p - y$ eğrilerinde zemin birbirinden bağımsız birden fazla yayla modellenmiş olup her bir yay için gerekli yay sabiti zemin parametreleri dikkate alınarak elde edilmiştir (Reese, 1997). Bu yöntemin yanal yüklü kazıkların tasarımında kullanılması DNV (2014) ve API (2014) (American Petroleum Institute – Amerikan Petrol Enstitüsü) tarafından önerilmiştir. $p - y$ modelinin güvenilirliği deneylerle doğrulanmasından ileri gelse de doğrulama için yapılan deneylerde kullanılan kazık çapları günümüzde kullanılan kazık çaplarına göre oldukça küçük kalmaktadır ($D = 0,61$ m). Artan kazık boyları ve kazık çapları göz önüne alınarak araştırmacılar tarafından $p - y$ yöntemi yenilenmiştir (Wiemann ve diğ., 2004; Sorensen ve diğ., 2010; Kallehave ve diğ., 2012; Thieken ve diğ., 2015).

Son yıllarda rüzgar türbinlerinin güçleri artmakla beraber söz konusu bu türbinleri taşıyan kazıkların çapları da büyümektedir. Bunu göz önüne alan Bryne ve diğ. (2015) yapmış oldukları çalışmalarında büyük çaplı kazıklarla saha deneyleri yapmışlardır. Bryne ve diğ. (2015) birçok endüstriyel kuruluşun da konsorsiyum olarak içinde bulunduğu çalışmada, PISA (Pile Soil Analysis – Kazık Zemin Analizi), deniz üzeri rüzgar türbinlerinin kazıklarının da içinde bulunduğu büyük çaplı kazıklar için yeni bir tasarım yöntemi önermişlerdir. Saha testleri için belirli bir ölçek belirleyerek üç farklı çapta ($D = 0,273$ m; $D = 0,762$ m ve $D = 2,0$ m) kazık kullanılarak 28 adet saha deneyi yapmışlardır. Bu deneylerde gerçek yükleme şartlarının sağlanması için kazıklar zemin kotundan 10 metre yukardan yanal olarak yüklenmişlerdir. Saha deneylerini İngiltere'nin Cowden bölgesinde sert buzul killi toprakta ve Fransa'nın Dunkirk bölgesinde yoğun deniz kumunun olduğu ortamlarda gerçekleştirmişlerdir (Bryne ve diğ., 2019). Bu çalışmadan elde ettikleri sonuçlar ışığında DNV (2014) ve API (2014) tarafından zemin tepkileri için önerilen $p - y$ eğrilerinin büyük çaplı kazıklar için doğru olmayacağını saha deneylerinden elde ettikleri sonuçlarla saptamışlardır. Bu durumun sebepleri üzerinde durarak en büyük sebep olarak kazık cidarında oluşan kayma gerilmelerinin kesit üzerinde oluşturduğu momentin varlığının $p - y$ eğrilerinde dikkate alınmadığı sonucuna varmışlardır. Zdravkovic ve diğ. (2015) PISA

araştırmasının sonuçlarına dayanarak nümerik bir model oluşturup elde edilen sonuçların kalibrasyonunu yapmışlardır. Hem küçük hem de büyük yer değiştirmelerde, 1 boyutlu yeni önerdikleri yöntem ve 3 boyutlu sonlu elemanlar yaklaşımının güvenilirliğinin $p - y$ yönteminden çok daha iyi olduğu bu çalışmayla ispatlanmıştır (Şekil 2.4).

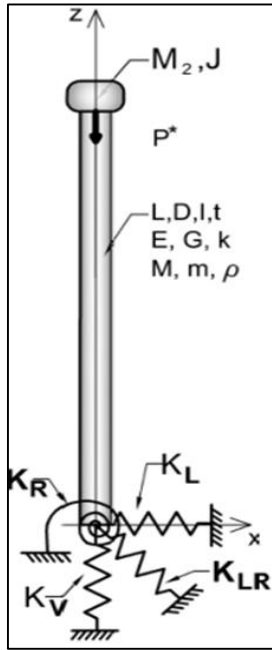


Şekil 2.4. PISA projesinin temel yapıtaşları (Bryne ve diğ., 2019)

Bryne ve diğ. (2017) PISA projesinden elde ettikleri bu sonuçları ve yeni geliştirdikleri 1 boyutlu yöntemi 2018 yılında PLAXIS ile yapmış oldukları ortaklık sonucu bir eklenti olarak MoDeTo (Monopile Designer Tool – Tekil Kazık Tasarım Aracı) ismiyle kullanıma sunmuşlardır. Panagoulas ve diğ. (2018) ise MoDeTo eklentisini kullanarak yatay yüklü bir kazığın analizini yapmışlar ve de elde edilen sonuçların $p - y$ eğrilerinden elde edilen sonuçlardan daha güvenilir olduğunu kanıtlamışlardır. Kaltekis ve diğ. (2019) yapmış oldukları çalışmalarında $p - y$ yöntemi ile PISA projesi kapsamında hazırlanan 1 boyutlu yöntemi kıyaslamışlardır. $p - y$ yönteminin tekil kazık tasarımında kullanılmasının, beklendiği gibi daha düşük nihai taşıma kapasitesi ile sonuçlandığını belirtmişlerdir. Minga ve Burd (2019) MoDeTo'nun 1 boyutlu modelinin sıkı kum ortamındaki doğrulamasını yapmışlardır. Brinkgreve diğ. (2020) çalışmalarında kumlar için parametrik bir model olan genel Dunkerque kum modeli (GDSM – General Dunkerque Sand Model) üzerine PISA araştırma projesi önerisine dayanan bir doğrulama çalışmasını sunmuşlardır. Ayrıca, PISA tasarımının geleneksel API tasarımı ile karşılaştırıldığında kumlu ve tabakalı zemin üzerinde tekil kazık temelli bir açık deniz rüzgar türbini projesine yönelik aracın uygulanmasını da

içermektedir. Dolayısıyla PISA projesi kapsamında gerçekleştirilen çalışmaların görece büyük kazıkların tasarımında yol gösterici olduğu söylenebilir.

Arany ve diğ. (2017) yapmış oldukları çalışmalarında deniz üzeri rüzgar türbinlerinin tasarımı için on basamaktan oluşan bir yöntem önermişlerdir. Arany ve diğ. (2017) çalışmalarında zemini bağlı yaylarla modellemişlerdir (Şekil 2.5).



Şekil 2.5. Zemin modeli (Arany ve diğ., 2017)

Burada, K_L ; zemin yanal rijitlik katsayısı, K_R ; zemin dönme rijitliği katsayısı, K_V ; zemin dikey rijitlik katsayısı ve K_{LR} ; zemin çapraz rijitlik katsayısıdır. Arany ve diğ. (2017) çalışmalarında söz konusu bu rijitlik katsayılarını Poulos ve Davis (1980)'in çalışmalarından elde etmişlerdir.

Murphy ve diğ. (2018) konik penetrasyon testi (CPT – Cone Penetration Test) verilerini kullanarak tekil kazık davranışını doğru bir şekilde modellemek için bir metodoloji sunmuştur. Metodoloji, modelin davranışını çeşitli kazık geometrileri üzerinde yapılan saha testleriyle karşılaştırarak doğrulamıştır. Ayrıca, makalede, sonlu elemanlar modelinden her bir kazık elemanındaki gerilmeleri çıkararak zemin – kazık reaksiyon eğrilerinin nasıl elde edilebileceği gösterilmiştir.

Psaroudikas ve diğ. (2021) tarafından yapılan çalışmada, yatay yükleme altında bir tekil kazığın davranışı analiz edilmiştir. Özellikle, bu çalışma, homojen veya çok katmanlı, rastgele geometri ve rastgele mekanik özelliklere sahip bir zemine dikey olarak gömülü bir tekil kazığın incelenmesine odaklanmıştır. Problemin çözümü için, Winkler teorisine dayanan yarı – analitik, kapalı formda bir çözüm geliştirilmiştir. Bu modelde, zeminin mekanik davranışının simülasyonu, kazığın eksen boyunca konumlandırılmış doğrusal olmayan $p - y$ yayları ile sağlanmakta ve kazığın yatay hareketini tanımlayan fonksiyonlar ile kullanılmaktadır. Önerilen yöntem iteratif olarak uygulandığında, kazık başındaki deformasyonlar tatmin edici bir doğrulukla hesaplanmıştır. Hu ve diğ. (2021) büyük çaplı kazıkların yanal yüklemesini üç boyutlu sonlu elemanlar yöntemiyle analiz etmişlerdir. Wang ve diğ. (2023) büyük çaplı kazıkların yanal yüklenmesi durumunda deformasyonları hesaplayan yeni bir yöntem önermiştir. Bu çalışmada kum zeminlerde yanal tekil kazıklar üzerine yapılan son ve yeni araştırmaların bir sentezini sunmuştur. Bu çalışma yayının yapıldığı zamana kadar olan saha testlerini, santrifüj model testlerini ve sonlu elemanlar simülasyonlarını içermektedir. Çalışma, kazık tabanının dirence katkısı, API $p - y$ modelinin büyük çaplı kazıkların yanal yüklemesindeki geçersizliği ve ön tasarım aşamasında zemin – yapı etkileşimi analizlerinde kullanılabilecek basit bir yaklaşım ihtiyacıyla ilgili sorulardan ilham almıştır.

Arany ve diğ., (2016) yapmış oldukları çalışmalarında tekil kazıklı rüzgar türbininin doğal frekans değerini elde etmişler ve literatürle kıyasladıkların buldukları yöntemin geçerli sonuçlar verdiklerini belirtmişlerdir. Strathclyde Üniversitesinde bir grup araştırmacı tarafından yapılan çalışmada, NREL (National Renewable Energy Laboratory – Ulusal Yenilenebilir Enerji Laboratuvarı) tarafından geliştirilen 5 MW kurulu gücündeki açık deniz rüzgâr türbini kullanılmıştır. Rüzgâr türbini, kule ve tekil kazığın boyutları ve özellikleri OC 3 (Offshore Code Comparison Collaboration – Açık Deniz Kod Karşılaştırma Birliği) 2. Faza göre seçilmiştir (Jonkman ve diğ., 2009; Jonkman, 2010). Çalışmanın amacı kapsamında, teorikte hem rüzgar hem akıntı türbinine sahip bir deniz üzeri rüzgar enerji santralinin deformasyon, doğal frekans ve de fizibilite analizi yapılmıştır. Deformasyon ve doğal frekans analizleri ANSYS ortamında gerçekleştirilmiştir. Løken (2017) deniz üzeri rüzgar türbinlerinin frekansını bulmak için gelişmiş görünür sabitlik yöntemini önermişlerdir. Bu yöntemde kazık, zemin etkisini dikkate alacak biçimde, belli bir uzunlukta uzatılarak ankastre mesnet gibi çözümlenerek doğal frekans değeri elde edilmiştir. Alkhoury ve diğ. (2020) DTU 10 MW rüzgar türbininin doğal frekans analizini ANSYS ortamında

hesaplamışlar ve Bak ve diğ. (2013) ile aynı sonuçları elde etmişlerdir. Ayrıca gevşek zemin profili için doğal frekans değerini bulup sonuçları mukayese etmişlerdir. Amel ve diğ. (2022) farklı araştırmacılar tarafından yenilenen $p - y$ yöntemlerini deniz üzeri rüzgar türbinlerinin birinci doğal frekansını hesaplamadaki farklılıklarını ele almıştır. Ölçülen birinci doğal frekans değerleri ile yapılan karşılaştırmalar, bir $p - y$ modeli hariç, önerilen diğer hiçbir Winkler yönteminin bu parametreyi doğru bir şekilde tahmin edemediğini göstermiştir. Yang ve diğ. (2022) açık deniz rüzgar türbinlerinin dinamik davranışının doğru tahmini, güvenli ve verimli bir şekilde çalışması açısından önemli bir rol oynayacağını belirterek zemin – kazık etkileşiminin modellemesine özel bir önem verilmesi gerektiğini söylemişlerdir. Çalışmalarında, üç modelleme yaklaşımını, birleşik rastgele rüzgar ve dalga yüklemesi altında yer değiştirme, doğal frekans ve iç kuvvet tepkilerine özel bir dikkatle karşılaştırmayı amaçlamışlardır. Nasab ve diğ. (2022) yapmış olduğu çalışmalarında yine Arany ve diğ., (2017) tarafından yapılan çalışmayı göz önüne alarak hem akıntı hem rüzgar türbininden oluşan kombine sistemin analizini gerçekleştirmişler fakat doğal frekans analizinde akıntı türbinini dikkate almamışlardır Liang ve diğ. (2023) açık deniz üzeri rüzgar türbinlerinin dinamik analizi için basit bir model oluşturmuşlar ve bu modeli DTU 10 MW referans türbini için var olan sonuçlarla kıyaslayıp doğruluğunu ispat etmişlerdir. Jiang ve diğ. (2023) yapmış oldukları çalışmalarında deniz üzeri rüzgar türbininin doğal frekansını hesaplamak için zemin etkisini dikkate alan analitik bir yöntem önermişlerdir ve sonuçlarının literatür ile uyumlu olduğunu gözlemlemişlerdir. Cui ve diğ. (2024) çalışmalarında kombine deniz üzeri rüzgar türbinin doğal frekans değerini incelemişler fakat kombine yapıyı birinci dereceden serbestliğe sahip sistem gibi çözmüşlerdir. Literatürde birden fazla türbin içeren kombine sistemlerin hepsi tek dereceden serbestliğe sahip ve sönümsüz bir sistem olarak ele alınmış ve doğal frekans değerleri incelenmiştir. Oysaki gelişen teknoloji ile beraber türbin kütlelerinin ve türbinlere gelen kuvvetlerin büyüklükleri dikkate alındığında bu sistemlerin ikinci dereceden serbestliğe sahip sistem olarak çözülmesi gerekli olabilir ki böyle çözüme henüz literatürde rastlanılmamaktadır.

Deniz üzeri rüzgar türbinlerinde güvenilirliğe dayalı tasarım konusu son 10 yılda araştırmacıların dikkatini çekmiştir. Andersen ve diğ. (2012) yapmış oldukları çalışmalarında kil zeminlerde $p - y$ yöntemiyle inceledikleri tekil kazık temelli rüzgar türbinin doğal frekans değerini güvenilirliğe dayalı tasarım yöntemiyle araştırmışlardır. Bak ve diğ. (2013) DTU (Danmarks Tekniske Universitet – Danimarka Teknik Üniversitesi) 10 MW referans deniz üzeri rüzgar türbininin doğal frekans analizini yapmışlardır. Carswell ve

diğ. (2015) MCS ile deniz üzerindeki rüzgar türbinlerini, kazık yükleri ve zemin parametrelerindeki değişiklikleri dikkate alarak analiz etmişlerdir. Haldar ve diğ. (2019) killi zeminlerde tekil kazık temelının güvenilirliğe dayalı tasarımını yapmışlardır. Yeter ve diğ. (2019) ANSYS ortamında deniz üzerindeki rüzgar türbinlerini zemin ve kazık parametrelerindeki stokastik değişkenliği dikkate alarak analiz etmişlerdir. Wilkie (2020) ise yazmış olduğu tezde yine tekil deniz üstü rüzgar türbini için Arany ve diğ. (2017) tarafından önerilen yöntemle güvenilirlik analizi gerçekleştirmiştir.. Reale ve diğ. (2021) çalışmalarında geoteknik verilerin belirsizliğinin tekil kazıklı deniz üzeri rüzgar türbinlerinin ön tasarımına etkisini incelemişlerdir. Zemin verilerindeki belirsizlik, tasarım model seçimi ve mevcut tasarım yaklaşımlarının yapısal davranış üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Belirsizliklerin bulunduğu ve tasarımcıların kullanabileceği çok çeşitli alternatif modellerin mevcut olduğunun unutulmaması gerektiğini ve elde edilen sonuçların bu nedenle niteliksel olarak yorumlanması gerektiği üzerinde durmuşlardır. Orakçı ve diğ. (2023) Danimarka'daki bir rüzgar türbini üzerinde $p - y$ eğrileri yöntemini kullanarak ve zemin özelliklerindeki değişkenliği dikkate alarak MCS (Monte Carlo Simulation – Monte Carlo Simülasyonu) ile incelemişlerdir.

Tekil kazık etrafındaki kum zeminin gevşemesi ve sıkılaşması için yeterli simülasyonunu sağlamak için Liu ve diğ. (2019) tarafından önerilen SANISAND – MS (Simple ANIsotropic SAND model with Memory Surface – Basit ANİzotropik Kum Modeli ile Bellek Yüzeyi) modeli benimsenmiştir. Yerel zemin davranışı ile döngüsel yüklere karşı kazık ve zemin tepkisi arasındaki ilişki, model tahminlerinin detaylı analizi aracılığıyla tartışılmıştır. Genel olarak, sayısal parametre çalışmalarının sonuçları, önerilen üç boyutlu sonlu elemanlar ile modelleme çerçevesinin kazık – zemin etkileşimi ile ilgili mühendislik tasarım yöntemlerinin gelecekteki iyileştirilmelere destek sağlayabileceğini doğrulamışlardır. Liu ve diğ. (2021) yapmış oldukları çalışmalarında tekil kazıklı deniz üzeri rüzgar türbinleri için servis limit durumu kriterleri, tekrarlanan operasyonel yükler altında uzun vadeli, kalıcı eğilimin tahminini göz önüne almışlardır. Bu çalışma, kumda tekil kazığın yanal yükleme durumuna odaklanarak, adım adım, üç boyutlu sonlu eleman modellemesinin, döngüsel zemin – kazık etkileşimi ve ilgili zemin deformasyon mekanizmalarının analizinde nasıl etkili bir şekilde uygulanabileceğini göstermiştir. Nigitha ve diğ. (2021) tekil kazıklı deniz üzeri rüzgar türbininin döngüsel yükleme altındaki davranışını değerlendirmek için iki boyutlu sonlu elemanlar analizini gerçekleştirmişlerdir. Liu ve Kaynia (2022) SANISAND – MS modelini kullanarak drenajsız kum durumunda tekil kazıkların hem monotonik hem

de tekrarlı yükler altındaki davranışlarını incelemişlerdir. Williams ve diğ. (2022) döngüsel yükleme koşullarına maruz kalan açık deniz rüzgar türbinlerini analiz etmişlerdir. North Hoyle rüzgar çiftliğinden bir deniz üzeri rüzgar türbini de modellenmiş ve çalışma frekansı ile rezonans frekansı arasındaki fark azaldıkça ratcheting tepkisinin arttığı bulunmuştur. Zeminde ratcheting, döngüsel yüklemeler altında zemin yapısının zamanla birikimli deformasyonlar yaşaması durumudur. Her döngüde, zemin yapısı bir miktar deformasyona uğrar ve bu deformasyonlar zamanla birikir. Zamanla olan bu birikme servis limit durumu için belirli bir deformasyon miktarından sonra yapı üzerinde büyük hasarlara sebebiyet verir. Alkhoury ve diğ. (2022) yapmış oldukları çalışmalarında kumlu zeminde, tamamen drenajlı koşullar altında kurulmuş büyük çaplı tekil kazık destekli çok megavatlık bir açık deniz rüzgar türbini için doğrusal olmayan dinamik bir analiz gerçekleştirmişlerdir. Analizde ayrıntılı bir üç boyutlu sonlu eleman modeli kullanılmıştır. Çalışmada SANISAND modeli benimsenmiştir. Jostad ve diğ. (2022) makalelerinde, Kuzey Denizi'ndeki DTU 10 MW referans rüzgar türbini için, temsili bir pik fırtına geçmişine maruz kalan büyük çaplı tekil kazık temelin, homojen yoğun kum üzerindeki döngüsel yüklemenin kapasitesi üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Andersen ve diğ. (2023) var olan veri tabanını inceleyerek zeminin döngüsel yükleme altındaki parametrelerini belirlemişler ve buna bağlı olarak eşitlikler sunmuşlardır. Shi ve diğ. (2023) tarafından yapılan çalışmada geliştirilmiş Tajimi formülasyonu ve dinamik prensiplere dayanan makalelerinde yapının dinamik tepkisini tahmin etmek için üç aşamalı bir zemin – kazık modeli kurmuşlardır. Farklı rüzgar hızları altında yapının yer değiştirmeleri elde edilmiştir. Çözümün doğruluğunu ispatlamak için sonlu elemanlar yöntemini kullanmışlardır.

Katsikogiannis (2024) yapmış olduğu doktora tezinde büyük kazık çapına sahip deniz üzeri rüzgar türbinleri için ekstrem yükler altında uzun dönemli yorulma analizi ve bu yüklere vermiş olduğu tepkileri analiz etmiştir. Abadie ve diğ. (2024) PISA tasarım modelini ve HARM (Hyperplastic Accelerated Ratcheting Model – Hiperplastik Hızlandırılmış Ratcheting Modeli) çerçevesini birleştirerek, tekil kazıkların monotonik ve döngüsel yan yüklemelere, çok büyük döngü sayıları için tepkisini modellemek amacıyla bir sayısal yöntem önermişlerdir. Bu yaklaşım, katmanlı bir zemine gömülü tipik bir tekil kazık temelli açık deniz rüzgar türbininin 25 yıllık servis yüklemesini temsil eden bir yüklemeye maruz kalmasını ve ardından şiddetli bir fırtınaya tabi tutulmasını değerlendirmek için kullanılmıştır. Sonuçlar, temel tepkisi üzerindeki ratcheting etkisini belirlemektedir.

Lande – Sudall ve diğ. (2019) yapmış oldukları çalışmalarında deniz üstü rüzgar türbinlerinin akıntı türbiniyle beraber kombine bir şekilde çalıştığında ilk maliyetin bir miktar arttığını fakat buna karşın üretilen elektrik miktarının bu ekstra maliyeti karşıladığını belirtmişlerdir.

Yıldırım (2022) tezinde Kırklareli – Kıyıköy bölgesi için kıyıdan daha uzak mesafede, 90 metre derinlikte, DTU 10 MW referans türbininin yüzer platformlu halini tasarlamıştır.

Shahulhameed ve diğ. (2024) dalga enerji dönüştürücülerini kullanarak rüzgar – dalga – batarya şeklinde bir hibrit enerji üretim sistemini analiz etmişlerdir. Bu hibrit sistemde dalgadan elde edilen enerji elektrolizde kullanılarak hidrojen elde edilmekte ve böylece enerji depolanabilir hale gelmektedir.

Buraya kadar verilen literatür taramasından da görülüyor ki gerek DSP gerek BKAY gerekse de DRES göz önünde olan konular olarak gündemdeki yerini korumaktadır. Arany ve diğ. (2017) çalışmalarında “Deniz rüzgarı endüstrisi henüz büyük ölçekli gelişimin erken aşamasında olduğu için, bireysel projeler teknoloji ilerlemesine göre daha uzun süre almaktadır” ifadesiyle aslında sektörün ne kadar dinamik ve gelişiminin ne kadar hızlı olduğunu belirtmişlerdir.

Bu kapsamda en güncel literatür taramasından da görülüyor ki gerek DSP gerekse BKAY özelinde Mavi Vatan için geliştirilmiş bir “Stratejik Planlama” modeli yoktur. Tezde “Çok Kriterli Karar Verme Stratejik Planlama Modeli” (SPM) geliştirilmiştir. Bu tez çalışmasında sunulan yeni stratejik planlama modeli SPM, mavi ekonomiyi ülkemiz denizel planlama çalışmaları kapsamında değerlendiren özgün bir modeldir. Modelde etkili parametrelerin hassasiyet analizi Monte Carlo Benzeşimi ile belirlenmiş ve mavi vatan için en önemli planlama unsurları ortaya konmuştur. Mavi ekonominin ana unsuru olan ülkemize özgün kombine DRES yapısı geliştirilerek, en elverişli nokta özelinde tasarım kriterleri tezde sunulmuştur.

Bu çalışmanın ikinci aşamasında ise ülkemize özgün yerli ve milli kombine DRES yapısının güvenilirlik model geliştirilerek tasarım için yeni bir risk modeli (DRES Risk) ortaya konmuştur.

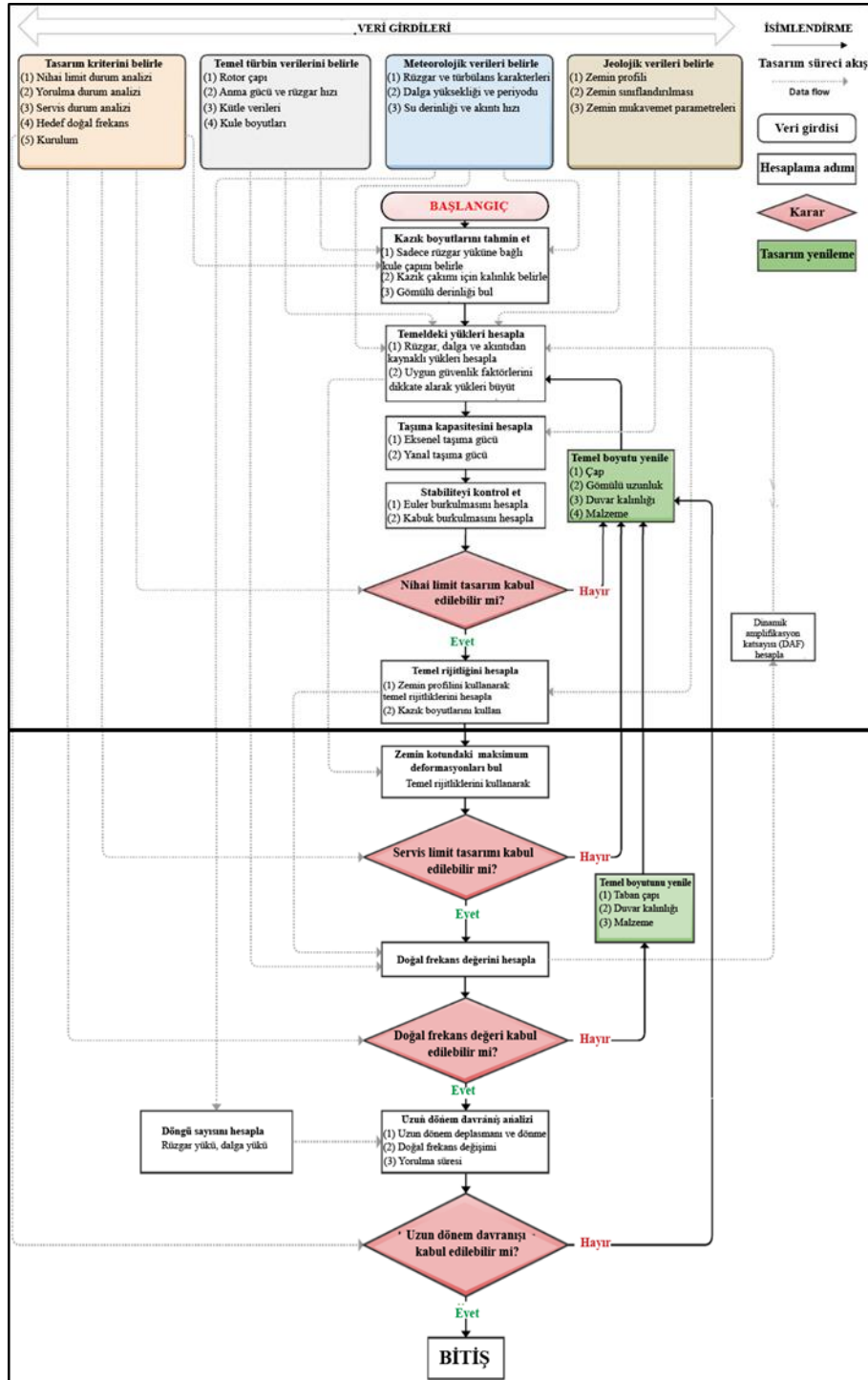
Türkiye'nin 8200 km'lik kıyı şeridi ve 462 000 km²'lik Mavi Vatan alanı, ülkemizi yenilenebilir enerji üretimi için eşsiz bir potansiyele sahip kılmaktadır. Geliştirilen bu model, rüzgar, dalga ve akıntı gibi mavi enerji kaynaklarından sürdürülebilir şekilde faydalanmayı hedefleyen yenilikçi bir yaklaşımı temsil etmektedir. Model, enerji üretiminde sadece rüzgar türbinlerini değil, dalga ve akıntı enerjisi gibi diğer yenilenebilir kaynakları da entegre ederek, enerji verimliliğini artırmayı amaçlamaktadır. Bu bağlamda, geliştirilen model, Türkiye'nin denizel enerji alanında ulusal ve uluslararası düzeyde rekabetçi bir konuma gelmesine katkı sağlayacak önemli bir adımı temsil etmektedir. Gelecekte gerçekleştirilecek deniz saha planlamalarında ve projelerinde bir rehber olarak kullanılabilecek bu model hem enerji üretim kapasitesini artıracak hem de çevresel sürdürülebilirliği destekleyecektir.

Çalışmaya 2011 yılında kapatılan ama yaptığı işlerle günümüzde bile bıraktığı izlerle adından söz ettirmeye devam eden Devlet Planlama Teşkilatı (DPT) bakış açısından yaklaşılması gerekirse, tez başlangıcındaki Türkiye'nin Deniz Saha Planlaması nicel verilere dayanarak yapılmalıdır. Söz konusu bu planlamada daha sonra detaylarına inileceği üzere mavi enerji olanakları ve açık deniz rüzgar enerji potansiyelinin optimal olduğu yerler belirlenerek, akabinde, yine çalışma kapsamında bahsedilecek olan kombine hibrid sistemin bu bölgeler için planlanması gereklidir. Bu yaklaşım ülkemizin enerji konusunda dışa bağımlılığından kurtulması ve sahip olduğu deniz sınırları düşünüldüğünde optimum olarak mavi enerji elde edilmesi açısından büyük bir fırsat olarak öne çıkmaktadır.



3. KOMBİNE ADRES TASARIM MODELİ

Bu çalışmada akış şeması olarak Arany ve diğ. (2017) tarafından verilen adımlara paralel bir akış şeması takip edilecektir (Şekil 3.1).



Şekil 3.1. Kombine ADRES tasarım modeli akış şeması (Arany ve diğ., 2017'den uyarlanmıştır)

Bu akış şeması, Türkiye'ye özgü Kombine ADRES tasarım modelinin adımlarını sunmaktadır. Tasarım sürecinin model detayları sunulmaktadır.

Kombine ADRES Tasarım Alt modellerinin temel yapısı aşağıda sunulmuş olup, ilk aşama tasarımın hedefleri ve sınırlarının tanımlanmasıdır. Ön tasarım döngüsüne bağlı olarak geri dönülen ilk aşamada, döngünün sonraki adımlarında elde edilen aşağıdaki analizlerin sonuçları değerlendirilir ve veri girişi kontrolü yapılır.

3.1. Tasarım Kriterlerinin Belirlenmesi

- Nihai limit durum analizi, yapının maksimum yük kapasitesine kadar dayanıklılığı değerlendirilir ve kriteri belirlenir.
- Yorulma durum analizi, yapının uzun vadeli tekrarlayan yüklere dayanıklılığı değerlendirilir ve kriteri belirlenir.
- Servis durumu analizi, yapının servis sırasında karşılaşılabilecek yüklerin altındaki performansı değerlendirilir ve kriteri belirlenir.
- Hedef doğal frekans analizi, yapının rezonans problemlerini önlemek için doğal frekansı değerlendirilir ve kriteri belirlenir.
- İnşa kriterleri, yapının inşası ve enerji hatlarının kurulumu için gerekli çevresel ve lojistik şartlar değerlendirilir.

3.2. Temel Türbin Verilerinin Belirlenmesi

Bu adım, rüzgar türbinine özgü fiziksel ve performans parametrelerini içerir.

- Rotor çapı, türbinin enerji üretim kapasitesini etkileyen temel boyuttur.
- Ağırlık ve rüzgar hızı, türbinin genel yük karakteristiklerini etkiler.
- Kütle verileri, türbinin genel stabilite ve temel tasarımına etki eder.
- Kule boyutları, yapının geometrik ve fiziksel ölçülerini temsil eder.

3.3. Çevresel Verilerin Belirlenmesi

Rüzgar enerjisi projelerinde çevresel faktörler kritik bir role sahiptir.

- Rüzgar ve türbülans karakteristikleri, bölgedeki rüzgar hızları ve türbülans etkilerini temsil eder.
- Dalga yüksekliği ve periyodu, deniz koşullarının türbin üzerindeki etkilerini belirler.
- Su derinliği ve akıntı hızı, açık deniz projelerinde temel tasarımını etkileyen parametrelerdir.

3.4. Jeolojik Verilerin Belirlenmesi

Zemin özelliklerinin doğru şekilde tanımlanması yapı stabilitesi için kritik öneme sahiptir.

- Zemin profili, zemin tabakalarının yapısı ve özellikleri belirlenir.
- Zemin sınıflandırılması, zemin türü ve davranış özellikleri analiz edilir.
- Zemin mukavemet parametreleri, zemin dayanıklılığı ve deformasyon özellikleri değerlendirilir.

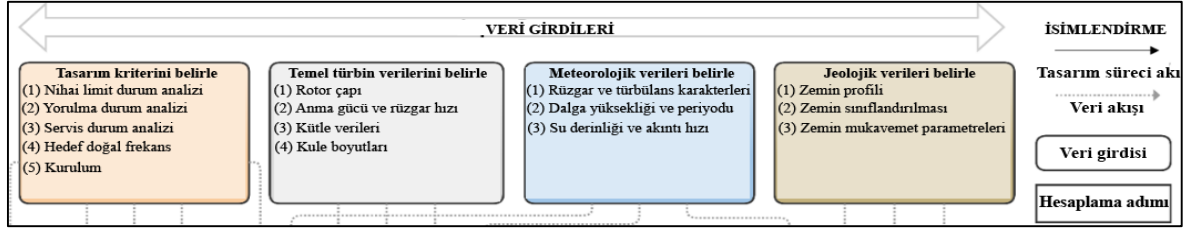
Bu veri girişleri, tasarım sürecinin ilerleyen aşamalarında yapılan hesaplamaların doğruluğunu sağlar ve yapının güvenli, uzun ömürlü ve ekonomik bir şekilde tasarlanmasına olanak tanır. Doğru veri toplama ve analiz, nihai tasarım kararlarının temelini oluşturur.

3.5. Veri Girdileri Alt Modeli

Tasarım süreci, verilerin modele girişiyle başlar. Bu veriler şunlardır;

- Tasarım kriterleri belirleme, nihai limit durum analizi, yorulma durum analizi, servis durum analizi kriterleri belirlenir.
- Türbin boyutları, rotor çapı, ağırlık, kule boyutları gibi türbine özgü boyut özellikleri ön tasarımda seçilir.
- Meteorolojik ve hidrodinamik veriler, uç değer istatistiği rüzgar hızları, dalga yüksekliği ve periyotları ile akıntı iklimi gibi çevresel yükler HYDROTAM 3D modeli ile belirlenir.
- Jeolojik veriler, zemin profili, zemin sınıflandırması ve zemin mukavemet parametreleri gibi zemin özellikleri geoteknik ve jeolojik saha çalışmaları ile elde edilir.

Tasarım sürecinin en önemli aşaması veri girdilerinin elde edilmesidir. Veri girdileri alt modelinin akış şeması Şekil 3.2’de sunulmuştur.



Şekil 3.2. Veri girdileri alt modelinin akış şeması (Arany ve diğ., 2017’den uyarlanmıştır)

Veri girdilerinin güvenilirliği, tasarım modelinin temel taşı oluşturur ve bu aşama doğru tasarım sonuçlarının elde edilmesinde kritik öneme sahiptir. Şekil 3.2’de sunulan alt model akış şemasına göre, veri girdileri dört ana başlıkta toplanmaktadır:

Ön tasarım alt modeline geçiş için tasarımın hedefleri ve sınırları tanımlanır. Ön tasarım döngüsüne bağlı olarak geri dönülen bu aşamada, döngünün sonraki adımlarında elde edilen aşağıdaki analizlerin sonuçları değerlendirilir ve veri girişi kontrolü yapılır.

3.6. Ön Tasarım Alt Modeli

- Yalnızca rüzgar yüklerine bağlı olarak başlangıç çapı tahmini yapılır.
- Kazık derinliği ve kalınlıkları statik analizle belirlenir.
- Gömülü derinlik tayin edilir.

3.7. Temel Analizi Alt Modeli

- Rüzgar, dalga ve akıntıdan kaynaklanan yükler hesaplanır.
- Güvenlik faktörleri dikkate alınarak boyutlar optimize edilir.

3.8. Taşıma Kapasitesi Alt Modeli

- Eksenel taşıma gücü hesaplanır.
- Yanal taşıma kapasitesi değerlendirilir.

3.9. Stabilité Kontrol Alt Modeli

- Euler burkulması hesaplanır.

- Kabuk burkulması (Shell buckling) incelenir.

3.10. Limit Tasarım Alt Modeli

Bu aşamada, nihai limit tasarım elde edilir.

Limit tasarım kabulü

- Kabuk burkulması (Shell buckling) incelenir.
- Zemin profili kullanılarak temel rijitliği hesaplanır.

Tasarım kabul edilmezse

- Temel boyutları (çap, gömülü uzunluk, duvar kalınlığı, malzeme) yeniden belirlenir.
- Tasarım döngüsü devam eder.

Ön tasarım modeli; temel rijitliğin, yük taşıma kapasitelerinin ve stabilite kontrollerinin optimizasyonuna dayalıdır. Nihai karar, tasarımın bütünlük bir şekilde güvenilirlik ve işlevsellik açısından uygun olup olmadığını belirler.

Ön tasarım modelinde, Türkiye'nin rüzgar enerji sistemleri için bölgesel zemin koşullarını ve çevresel yükleri değerlendiren alt modüller geliştirilmiştir. Açık deniz rüzgar enerji santralleri için tasarım modelinin ikinci bölümündeki süreç, tasarımın servis limit durumu, doğal frekans analizi ve uzun dönem davranışlarının standartlar açısından kabul edilebilirliğini değerlendiren bir dizi model adımı içerir. Aşağıda bu kısım detaylı olarak açıklanmıştır.

3.11. Servis Limit Tasarım Alt Modeli

Zemindeki maksimum deformasyonların belirlenmesi

- Temel rijitlikleri kullanılarak, yapının zemine etkisi analiz edilir ve maksimum deformasyon değerleri elde edilir.

Servis limit tasarımının kabul edilebilirliği

Eğer tasarım standartlara uygun değilse, temel boyutları yenilenir.

- Taban çapı.
- Duvar kalınlığı
- Malzeme seçimleri

3.12. Doğal Frekans Analizi Alt Modeli

Doğal frekans değerinin hesaplanması

- Yapının doğal frekansı, yapının rezonansa girme olasılığını değerlendirmek için hesaplanır.

Doğal frekans değerinin kabul edilebilirliği

- Eğer değer standartlara göre kabul edilebilir değilse, tasarımın malzeme özellikleri veya yapısal parametreleri yenilenir.

3.13. Uzun Dönem Davranışı Analiz Alt Modeli

Uzun dönem davranış parametreleri

- Uzun dönem deplasman ve dönme, yapının uzun süreli stabilitesini etkileyen hareketler analiz edilir.
- Doğal frekans değişimi, zamanla yapının doğal frekansında meydana gelen değişiklikler incelenir.
- Yorulma süresi, yapının ömrünü etkileyen yorulma mekanizmaları değerlendirilir.

Uzun dönem davranışının kabul edilebilirliği

- Eğer uzun dönem davranışı standartlara uygun değilse, temel boyutları ve malzeme özellikleri tekrar optimize edilir..

Doğal frekans değerinin kabul edilebilirliği

- Eğer değer standartlara göre kabul edilebilir değilse, tasarımın malzeme özellikleri veya yapısal parametreleri yenilenir.

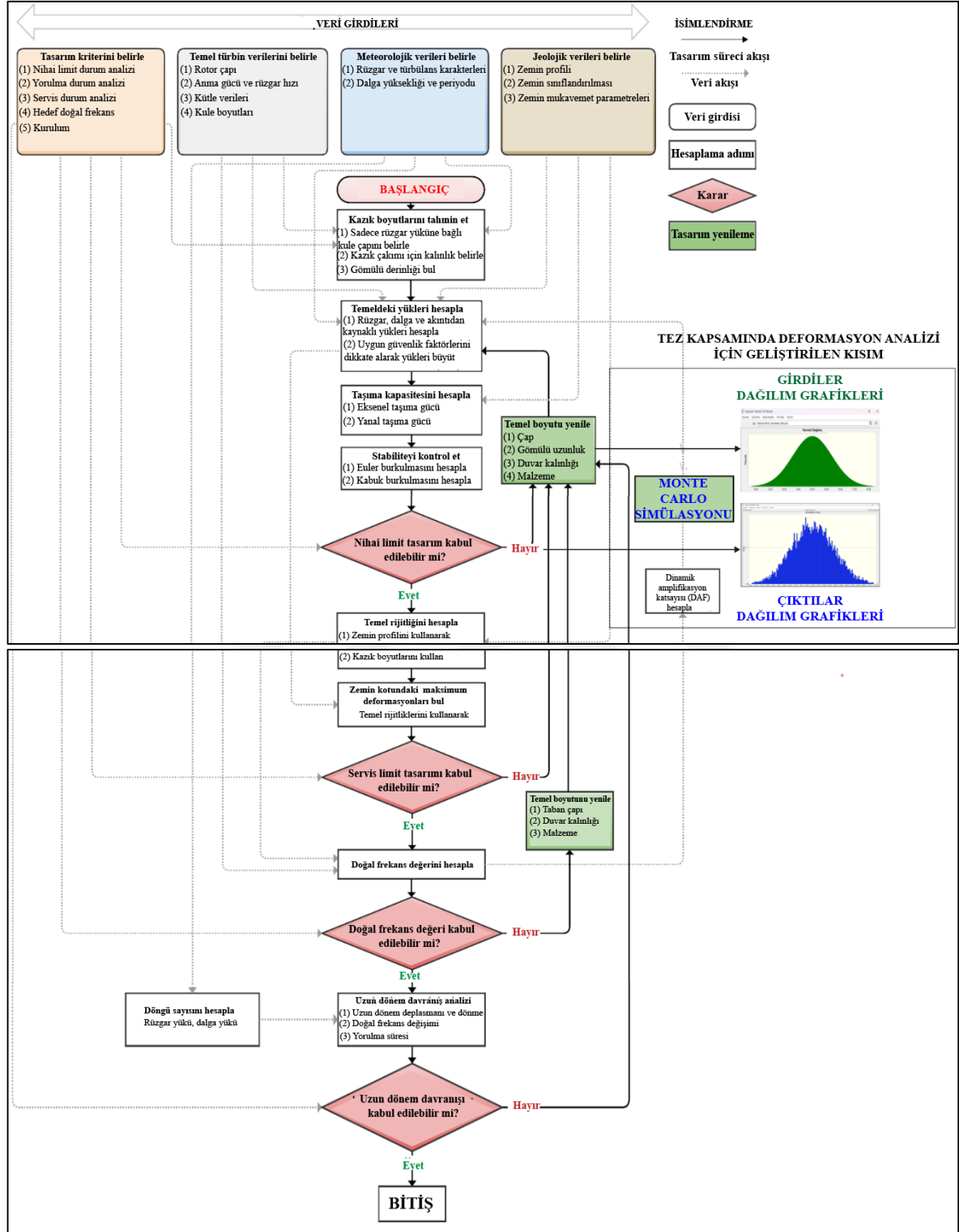
3.14. Taşıma Kapasitesi Alt Modeli

- Döngüsel rüzgar ve dalga yüklerinin etkisi analiz edilerek, sistem üzerindeki sürekli ve tekrarlayan yükler değerlendirilir.

Tasarım süreci modeli, açık deniz rüzgar enerji santralinin uzun dönem yapısal dayanımını ve limit durum performansını değerlendirir. Her aşamada tasarımın kabul edilebilirlik durumu standartlara göre kontrol edilir ve gerektiğinde tasarım revizyonları yapılır. Süreç sonunda, tasarımın hem kısa dönem hem de uzun dönem tasarım kriterlerini sağlaması hedeflenir.

Arany ve diğ. (2017) yapmış oldukları benzer çalışmalarında, açık deniz rüzgar endüstrisinin büyük ölçekli bu gelişiminin henüz erken bir aşamada olduğu için, tekil fonksiyon projelerinin yapım sürecinin, teknolojinin ilerleme hızından daha uzun zaman aldığını belirtmişlerdir. Dolayısıyla bu tez çalışmasında Türkiye'ye özgü geliştirilen modelin ana hedefi inşa edilebilir ve güvenilir bir kombine ADRES tasarlanmasıdır.

Güvenilirliğe dayalı analiz için tez kapsamında geliştirilen modifiye edilen akış şeması kısmı ise Şekil 3.3'te verilmiştir.



Şekil 3.3. Çalışma kapsamında deformasyon analizi için geliştirilen akış şeması (Arany ve diğ., 2017’den uyarlanmıştır)

Şekil 3.3’ten görüleceği üzere çalışma kapsamında deformasyon ve dönme analizi için MCS analizi eklenerek Şekil 3.1’de Arany ve diğ. (2017) tarafından verilen akış şeması yenilerek uyarlanma yapılmıştır.

4. MODELİN KIRKLARELİ – KIYIKÖY UYGULAMASI

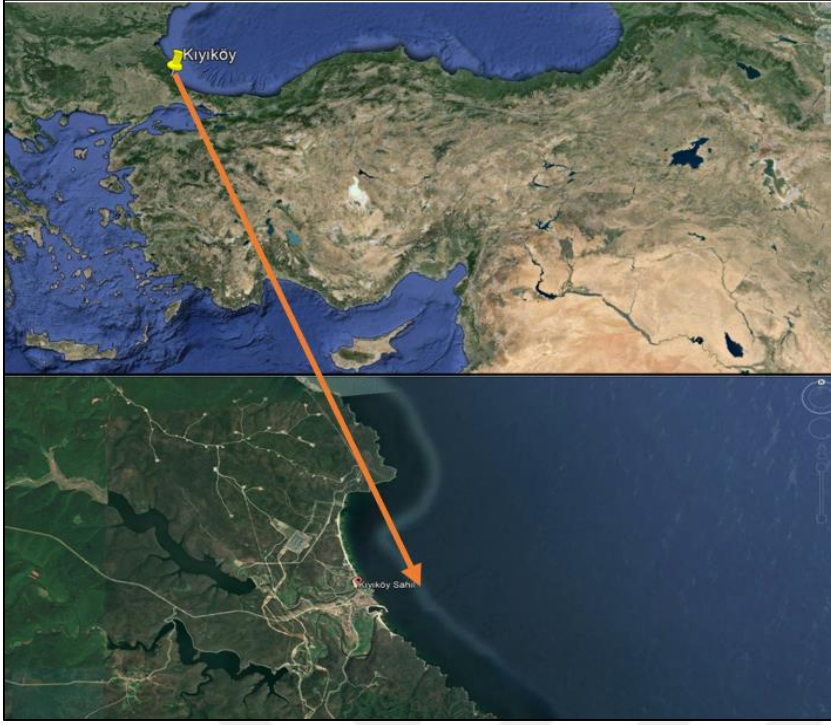
Bu çalışmada daha önce YEKA sahası olarak ilan edilmiş Kırklareli – Kıyıköy bölgesinde rüzgar, dalga ve akıntıdan enerji elde edilebilen tekil kazıklı kombine bir yapının güvenilirliğe dayalı tasarımı gerçekleştirilmiştir. Ülkemizin 8 200 km’lik kıyı sınırı ve 462 000 km²’lik Mavi Vatan bölgesiyle geniş bir denizel alana sahip olduğu düşünüldüğünde, bu çalışma yakın zamanda denizel enerji alanında yapılacak bir atılımın ön çalışması olarak görülebilir. Bu atılımın yakın zamanda ülkemizde yapılacak olan deniz saha planlaması içinde, tekil kazıklı deniz üzeri rüzgar türbini ve de kombine sistemler için öncü bir adım oluşturması beklenmektedir. Bu çalışma Türkiye’ye özgü kombine mavi enerji sistem tasarımı için kılavuz bir model sunmaktadır.

4.1. Tasarım Kriterlerinin Belirlenmesi

Modelin Türkiye’ye olan ilk uygulamasında temel adım tasarım kriterinin belirlenmesidir. Bu çalışmada hem nihai limit durum analizi (ULS – Ultimate Limit State) hem yorulma durum analizi (FLS – Fatigue Limit State) hem servis durum analizi (SLS – Serviceability Limit State) hem de doğal frekans analizi yapılacaktır. Kurulum ve inşa aşamalarının planlaması bu çalışma kapsamında sunulmayacaktır. Tasarım kriterleri çalışma içinde ilerleyen bölümlerde her bir başlığın altında detaylıca değerlendirilecektir.

4.2. Meteorolojik Verilerin Elde Edilmesi

Türbin seçimi için öncelikle bölgedeki rüzgar hızının ve türbülans türünün bilinmesi gerekmektedir. Giriş kısmında anlatılanlar ışığında konum olarak Kırklareli – Kıyıköy bölgesi belirlenmiştir (Şekil 4.1).



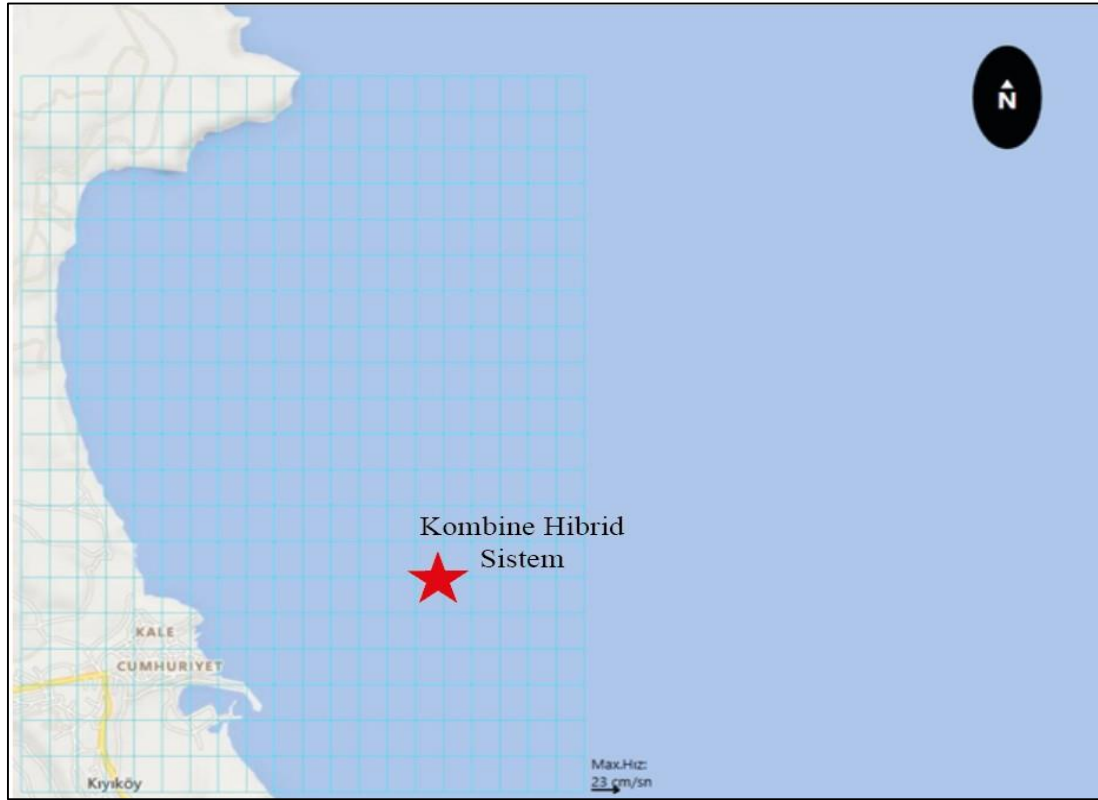
Şekil 4.1. Kırklareli – Kırıkköy bölgesinin Google Earth görüntüsü

İlk olarak Kırıkköy bölgesinin batimetrik haritası, Seyir Hidrografi ve Oşinografi Dairesi (SHOD) tarafından sağlanan denizcilik haritalarından elde edilmiştir (Şekil 4.2).



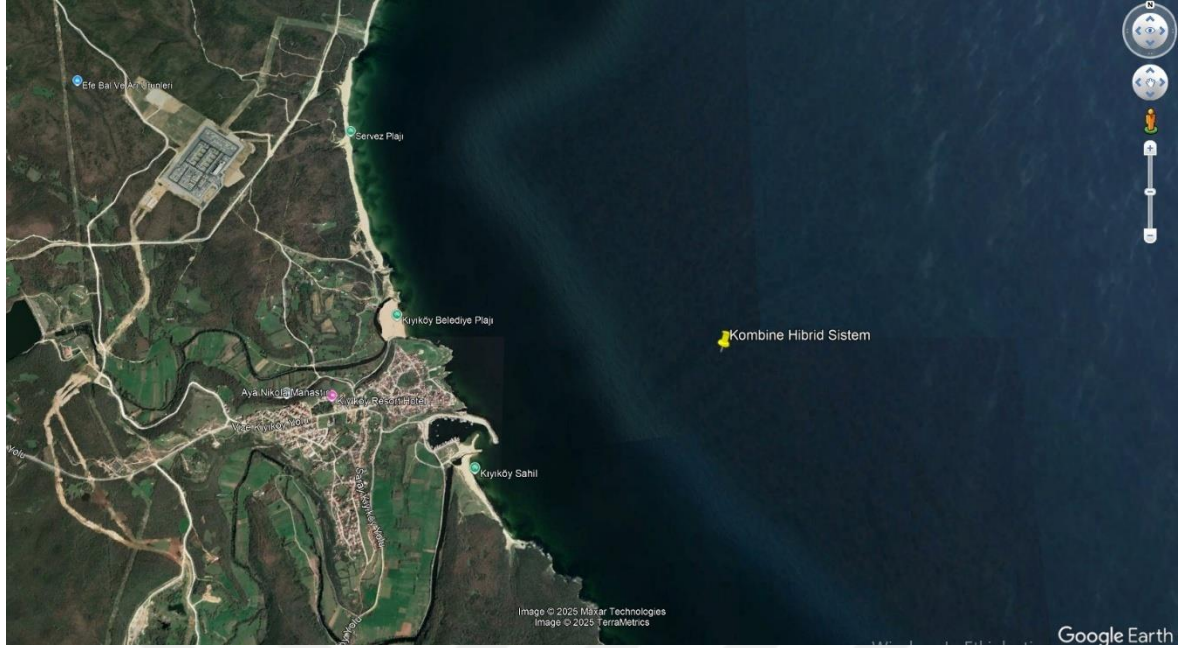
Şekil 4.2. Kırıkköy bölgesinin batimetri haritası (Balas ve Balas, 2020)

Kıyıköy bölgesinin karaya yakın kısımlarındaki batimetri incelendiğinde derinliklerin genellikle 30 metreden az olduğu gözlemlenmiştir. ESMAP (Energy Sector Management Assistance Program – Enerji Sektörü Yönetim Yardım Programı) tarafından yayımlanan rapora göre, Kıyıköy bölgesinde sabit tabanlı bir rüzgar türbini inşa etmek uygundur. Çünkü kıyıya yakın yerlerde derinlikler 50 metreden daha azdır (ESMAP, 2020). Kombine hibrid sistemin tasarlanacağı lokasyon koordinat olarak ($41^{\circ} 38' 13.7''$ K $28^{\circ} 7' 17.5''$ D) HYDROTAM – 3D (Şekil 4.3) ve Google Earth (Şekil 4.4) ortamında işaretlenmiştir.



Şekil 4.3. HYDROTAM ortamında kombine hibrid sistemin koordinatları

Bu noktadaki deniz derinliği Seyir Hidrografi ve Oşinografi Dairesi (SHOD) tarafından sağlanan denizcilik haritalarından 30 metre olarak elde edilmiştir.



Şekil 4.4. Google Earth ortamında kombine hibrid sistem koordinatları

Çalışmada rüzgar, dalga ve akıntı özelliklerini belirlemek için 3 boyutlu hidrodinamik taşınım modeli HYDROTAM – 3D (Three – Dimensional Hydrodynamic Transport Model – Üç Boyutlu Hidrodinamik Taşınım Modeli) kullanılmıştır. HYDROTAM – 3D, bilimsel kaynaklarda yayınlanan analitik ve deneysel sonuçlarla ve saha çalışmaları ile karşılaştırılarak gerçekleştirilen, Türkiye’de birçok kıyı alanına uyarlanmış bir üç boyutlu hidrodinamik ve taşınım modelidir (Balas ve Özhan, 2001; Balas ve Özhan, 2003; Balas, 2004; İnan ve Balas, 2010; Balas ve diğ., 2012; Balas ve diğ., 2013; Numanoglu Genç ve diğ., 2013; Balas ve diğ., 2024; Cebe ve diğ., 2024; Durap ve Balas, 2024; Uğurlu ve Balas, 2024; Yıldırım Fidanoglu ve diğ., 2024). Kıyısız alanlarda rüzgar iklimi, dalga iklimi, akıntı, kirlilik taşınımı, sediment taşınımı gibi kıyısız taşınım olaylarının benzeştirilmesi amacıyla geliştirilmiş yazılım olan HYDROTAM – 3D, aynı zamanda Dünya’da da ilk çevre temelli bulut bilişim yazılımıdır. Yazılımının başlıca özellikleri şunlardır:

- Üç boyutlu, alansal ve derinlik boyunca sayısal modelleme yapar.
- Sonlu hacimler ve sonlu farklar metodu ile çözüm oluşturur.
- Model veri tabanında Türkiye Kıyıları Meteoroloji İstasyonlarının kuruluşlarından bu yana saatlik rüzgar verileri yer almakta ve bunlara dayalı rüzgar iklimi hesaplamaktadır (Rüzgar iklimi alt modeli).

- Model, rüzgar, gelgit ya da yoğunluk farklılaşması etkenli akıntıları, su düzeyi değişimlerini, rüzgar kabarmasını 3-boyutlu olarak benzeştirir (Hidrodinamik alt model).
- Model, derin deniz belirgin dalga yüksekliklerini ve belirgin dalga dönemlerini, uzun dönem dalga istatistiği ve en yüksek dalga istatistiği kullanarak hesaplar (Dalga iklimi alt modeli).

4.2.1. Rüzgar iklimi

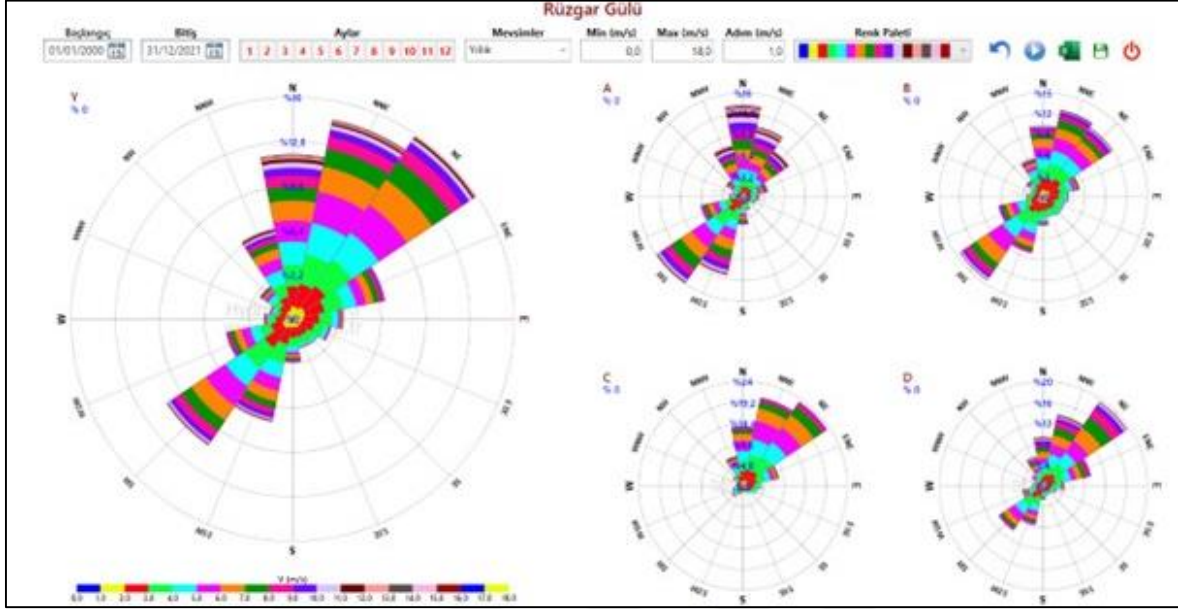
Kıyıköy bölgesi için ilk olarak rüzgar iklimi belirlenecektir. Kıyıköy bölgesinde rüzgar kaynağı noktasının konumu Şekil 4.5'te verilmiştir.



Şekil 4.5. Kıyıköy rüzgar noktası konumu, ECMWF Era Interim 0,25° (41,75 N ; 28,25 E)

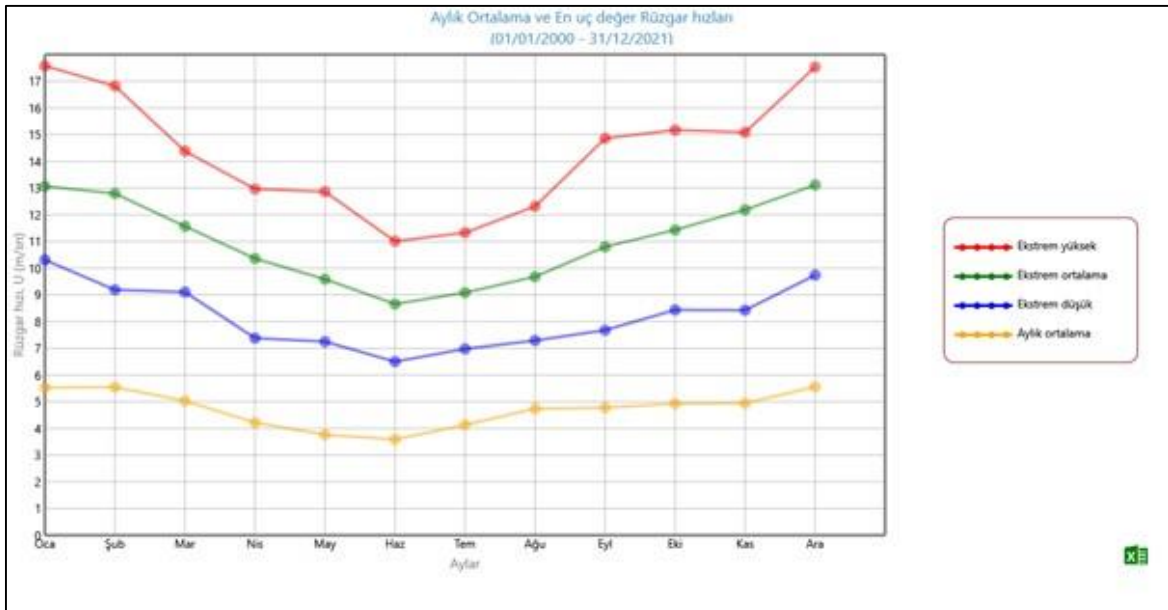
Şekil 4.5'te Yeni Nokta 1 Kıyıköy bölgesinde karadaki rüzgar türbinlerine kıyıdaki en yakın nokta olup ön aşamada rüzgar iklimi olarak seçilen bölge olup, KLM kombine hibrit sistemin batimetri haritaları da incelendikten sonra nihai olarak tasarlanması için seçilen çalışma noktasıdır.

HYDROTAM – 3D ortamından elde edilen yıllık ve mevsimlik rüzgar gülleri Şekil 4.6’daki gibidir.



Şekil 4.6. 2000 – 2021 yılları arasında ECMWF verilerine göre yıllık ve mevsimlik rüzgar gülleri

Şekil 4.6’den da görüleceği üzere hakim rüzgar yönü Kuzeydoğu (NE) yönündedir. Yine bu nokta için aylık ortalama ve en uç değer rüzgar hızları Şekil 4.7’de verilmiştir.



Şekil 4.7. Aylık ortalama ve en uç değer rüzgar hızları

Şekil 4.7’den da görüleceği üzere bölgede aylık ortalama rüzgar hızı değerinin 4,5 m/s olduğu hesaplanmıştır. Bu değer deniz seviyesinden 10 metre yukarıda ölçülen değerlerin ortalamasıdır. Türbin seçimi ve enerji üretimini bulmak için bu değer rüzgar türbini seviyesinde elde edilmesi gerekmektedir. Fakat bu seviyede ölçüm bulunmamaktadır. Dolayısıyla, deniz seviyesindeki bu değerleri rüzgar türbini seviyesine çevirmek için hız profili kabulü yapmak gereklidir. Hız profilleri, logaritmik hız profili ve kuvvet yasası hız profili olarak iki ayrı şekilde verilebilir. Bu çalışmada Buyruk ve diğ. (2024) tarafından yapılan çalışmada olduğu gibi kuvvet yasası hız profili kabulü yapılacaktır. Kuvvet yasası hız profilinde hız dağılımı Eş. 4.1’deki gibidir (Manwell ve diğ., 2009).

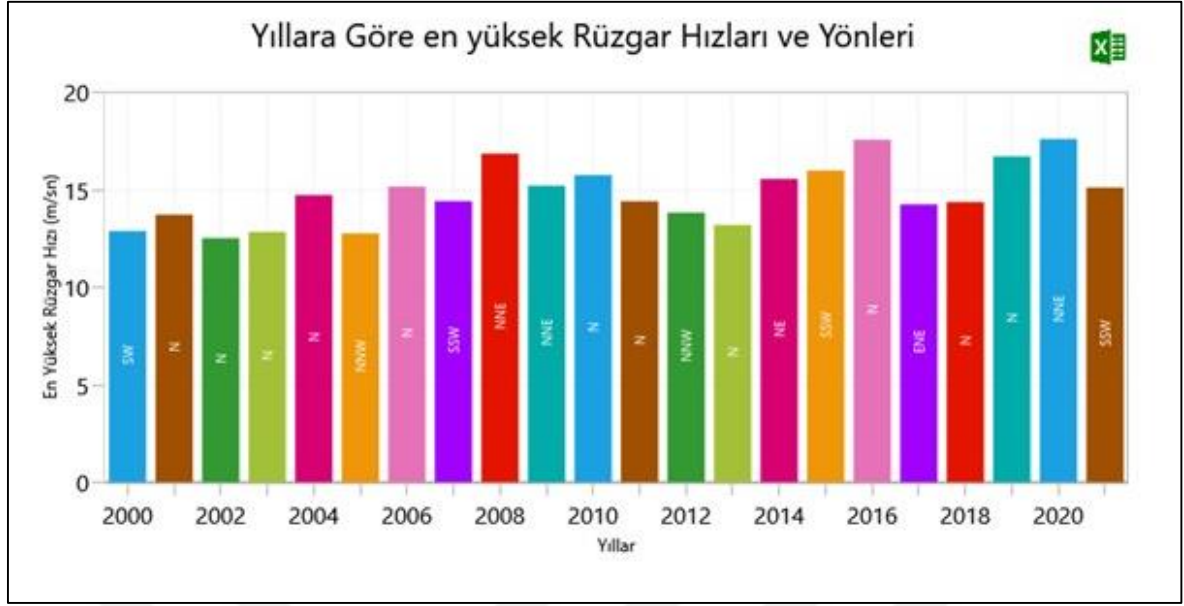
$$\frac{U(z)}{U(z_r)} = \left(\frac{z}{z_r}\right)^\alpha \quad (4.1)$$

Burada, z ; deniz seviyesinden olan mesafe, $U(z)$; deniz seviyesinden z mesafe uzaklıktaki hız değeri, z_r ; hız ölçümü yapılan referans düzeyin deniz seviyesinden uzaklığı, $U(z_r)$; deniz seviyesinden z_r mesafe uzaklıktaki referans hız değeri ve α ; kuvvet yasasının üstel değeridir. Kuvvet yasasının üstel değeri, Justus (1978) tarafından Eş. 4.2 ile verilmiştir (Manwell ve diğ., 2009).

$$\alpha = \frac{0,37 - 0,088 \ln U(z_r)}{1 - 0,088 \ln \left(\frac{z_r}{10}\right)} \quad (4.2)$$

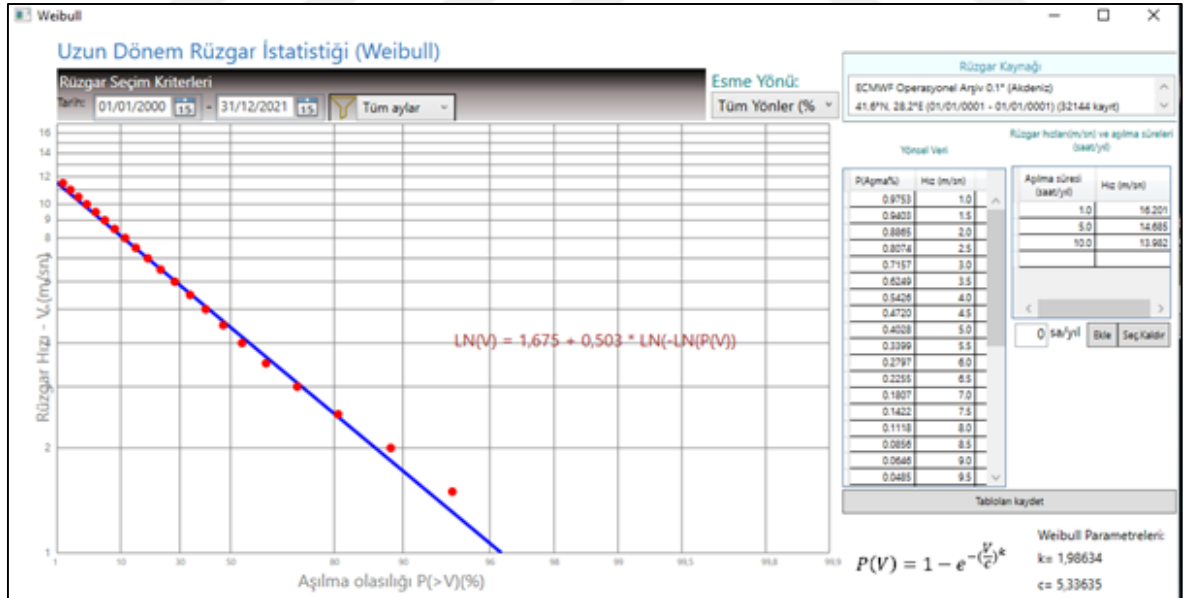
Burada, z_r ; hız ölçümü yapılan referans bölgenin deniz seviyesinden uzaklığı ve $U(z_r)$; bu referans bölgedeki hız değeridir. IEC (International Electrotechnical Commission – Uluslararası Elektroteknik Komisyonu) 61400 – 1 standardına göre ise bu değer 0,2 olarak alınmalıdır. DTU 10 MW rüzgar türbini kullanılması kabulü yapılarak, 10 metre yükseklikteki ortalama hız değerini rüzgar türbini göbek seviyesine dönüştürsek ortalama hız değeri 8,2 m/s olarak elde edilmiştir. Bu değer ESMAP (2020) tarafından önerilen optimal rüzgar kaynak koşulunu karşılamaktadır. Aynı zamanda hesaplanan bu değer yine bu bölge için daha önce Yıldırım (2022) tarafından yapılan çalışmadan elde edilen değerlerle uyumluluk içerisindedir.

Yıllara göre en yüksek rüzgar hızları ve yönleri ise Şekil 4.8’de verilmiştir.



Şekil 4.8. Yıllara göre en yüksek rüzgar hızları ve yönleri

Yine tasarım için uzun dönem rüzgar istatistiği Weibull dağılımı HYDROTAM – 3D ortamından elde edilmiştir (Şekil 4.9).



Şekil 4.9. HYDROTAM ortamında Kıyıköy uzun dönem rüzgar istatistiği, Weibull dağılımı

Rüzgar enerjisi potansiyeli analizinde sıkça kullanılan bir yöntem, Weibull dağılımı analizidir. Weibull dağılımı, rüzgar hızının olasılık dağılımını tanımlar. Bu analiz, rüzgar hızı verilerinin Weibull dağılımına uygunluğunu belirlemek ve rüzgar hızının karakteristik

parametrelerini hesaplamak için kullanılır. Weibull analizi, rüzgar hızı dağılımı ve enerji üretimi potansiyeli tahminleri için temel bir araçtır. Uzun dönem rüzgar istatistiğinde Weibull dağılımının kullanılmasının sebebi rüzgar enerjisi potansiyelini belirlemede en çok kullanılan istatistiksel dağılımlardan biri olmasıdır (URL – 15). Weibull dağılımı, şekil parametreleri sayesinde rüzgar hızı verilerine esnek bir şekilde uyum sağlayabilir. Bu, farklı lokasyonlardaki rüzgar profillerini modellemek için önemlidir. Dolayısıyla ortalama rüzgar hızı, ortalama rüzgar gücü yoğunluğu ve rüzgar enerjisi tahmini Eş. 4.3'teki gibi genellikle iki parametrelili Weibull olasılık yoğunluk fonksiyonuna dayalı olarak yapılmaktadır (Kurban ve diğ., 2007).

$$P(V) = 1 - e^{-\left(\frac{V}{c}\right)^k} \quad (4.3)$$

Burada, V; rüzgar hızı ve P(V); rüzgar hızının aşılma olasılığıdır. c ve k ise Weibull dağılım parametreleridir. c ve k değerleri HYDROTAM – 3D tarafından Şekil 4.7'deki gibi elde edilmiştir.

Tasarım için diğer parametreler IEC 61400 – 1 standardından elde edilmiştir. Bu standart daha sonra TSE (Türk Standartları Enstitüsü) tarafından TS EN IEC 61400 – 1 olarak kabul görmüştür. TS EN IEC 61400 – 1 rüzgar enerjisi jeneratör sistemlerinin tasarım kurallarını içeren uluslararası bir standart olarak tanımlanmaktadır. Söz konusu bu standarda göre türbin sınıflandırması için Çizelge 4.1 kullanılmıştır (IEC, 2019).

Çizelge 4.1. Türbin sınıflandırılması için temel parametreler (IEC, 2019)

Rüzgar türbini sınıfı			I	II	III	S
V _{ave}		(m/s)	10	8,5	7,5	Değerler tasarımcı tarafından belirlenir.
V _{ref}	(m/s)		50	42,5	37,5	
	Tropikal (m/s) V _{ref,T}		57	57	57	
A +		I _{ref} (-)	0,18			
A		I _{ref} (-)	0,16			
B		I _{ref} (-)	0,14			
C		I _{ref} (-)	0,12			
Parametreler türbin göbek seviyesinde uygulanan değerlerdir. Burada,						
V _{ave} ; yıllık ortalama rüzgar hızı,						
V _{ref} ; 10 dakika ortalama referans rüzgar hızı,						
V _{ref,T} ; tropikal tayfunlara maruz kalan bölgelerde 10 dakika ortalama referans rüzgar hızı,						
A+; çok yüksek türbülans özellikleri için kategori,						
A; yüksek türbülans özellikleri için kategori,						
B; orta türbülans özellikleri için kategori,						
C; düşük türbülans özellikleri için kategori,						
I _{ref} ; türbülans yoğunluğunun referans değeridir.						

Bu çalışmadaki ortalama yıllık rüzgar hızı rüzgar türbini sınıfının II seçilmesi gerektirdiğini göstermektedir. Fakat Bak ve diğ. (2003) DTU 10 MW rüzgar türbini için sınıf I ve kategori A'yı seçmişlerdir. Dolayısıyla seçim olarak sınıf II değil sınıf I seçilmiş ve kategorik olarak da A kategorisine göre tasarım yapılmıştır.

Hesaplamalarda kullanılacak diğer parametreler de IEC 61400 – 1 standardına göre yapılacaktır. Uzunlamasına türbülans ölçeği parametresi, Λ_1 , IEC 61400 – 1'e göre Eş. 4.4'teki gibidir.

$$\Lambda_1 = \begin{cases} 0,7z & z \leq 60 \text{ m} \\ 42 \text{ m} & z \geq 60 \text{ m} \end{cases} \quad (4.4)$$

Türbülans integral uzunluk boyutu, L_k , ise Eş. 4.5 ile verilmiştir.

$$L_k = 8,1\Lambda_1 \quad (4.5)$$

Buraya kadar anlatılanlar ışığında bu çalışmada kullanılacak rüzgar iklimine ait değerler Çizelge 4.2’de verilmiştir.

Çizelge 4.2. Tasarımda kullanılacak rüzgar iklimi parametreleri ve değerleri

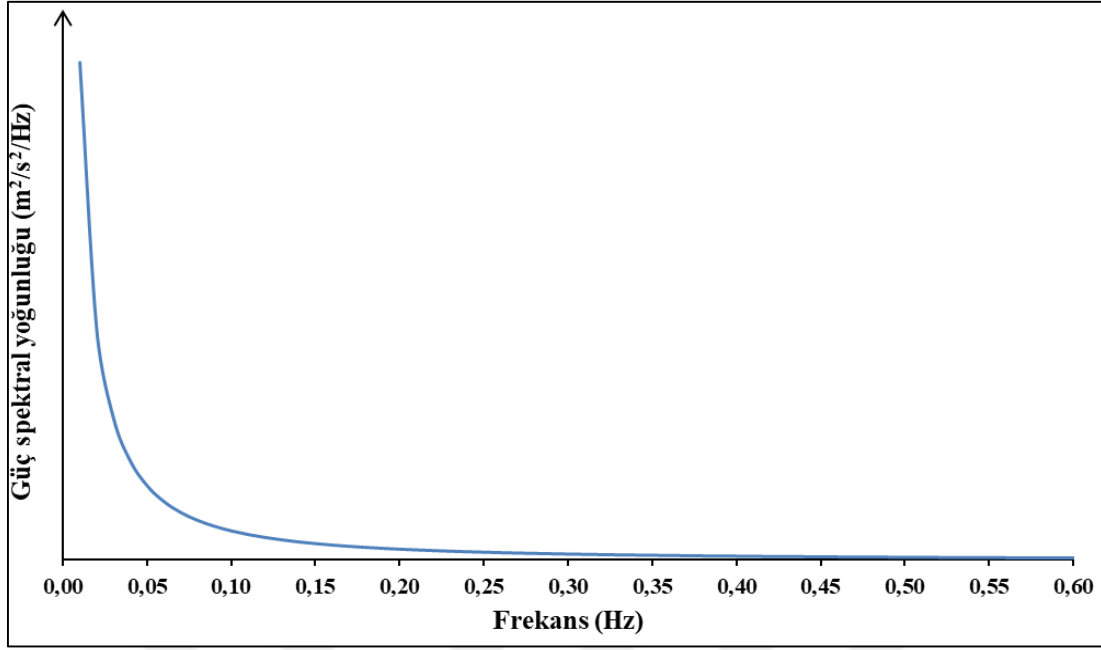
Parametre	Sembolü	Değeri	Birimi
Weibull dağılımı şekil parametresi	k	2,01293	-
Weibull dağılımı boyut parametresi	c	5,14211	-
Referans türbülans yoğunluğu	I _{ref}	16	%
Türbülans integral uzunluk boyutu	L _k	340,2	m
Havanın yoğunluğu	ρ _{hava}	1,225	kg/m ³
Uzun dönem ortalama rüzgar hızı	u _{ort}	8,2	m/s

Rüzgar spektrumu deniz üzeri rüzgar türbini tasarımında büyük öneme sahiptir. Bir sonraki bölümde görüleceği üzere yapının rezonans durumuna gelmemesi için yapının doğal frekansı ile rüzgardan kaynaklı yüklerin frekansları aynı aralığa gelmemelidir. Rüzgar spektrumu, rüzgarın zamansal değişimini ve türbülans özelliklerini analiz etmek için kullanılan bir kavramdır. Rüzgar spektrumu, belirli bir frekans aralığındaki rüzgar hızının enerji yoğunluğunu tanımlar ve rüzgarın enerji dağılımını gösterir. Rüzgar enerjisi sistemlerinde türbülanslı rüzgar hızlarının zaman içindeki değişimini anlamak, yapısal yüklerin analiz edilmesi açısından önemlidir. Bu çalışmada Bhattacharya (2014) tarafından tavsiye edilen Andersen ve Løvseth (2006) tarafından Eş. 4.6’daki gibi verilen Frøya rüzgar spektrumu kullanılmıştır.

$$S(f) = 320 \left(\frac{U_{ref}}{10} \right)^2 \left(\frac{z}{10} \right)^{0,45} (1 + X^n)^{-5/3n} \quad (4.6)$$

$$X = 172 \left(\frac{U_{ref}}{10} \right)^{-0,75} \left(\frac{z}{10} \right)^{2/3} f \quad , \quad n = 0,468$$

Burada, S(f); spektrum değeri ve f; frekans değeridir. Eş. 3.6 göz önüne alınarak çizilen rüzgar spektrumu Şekil 4.10’daki gibidir.



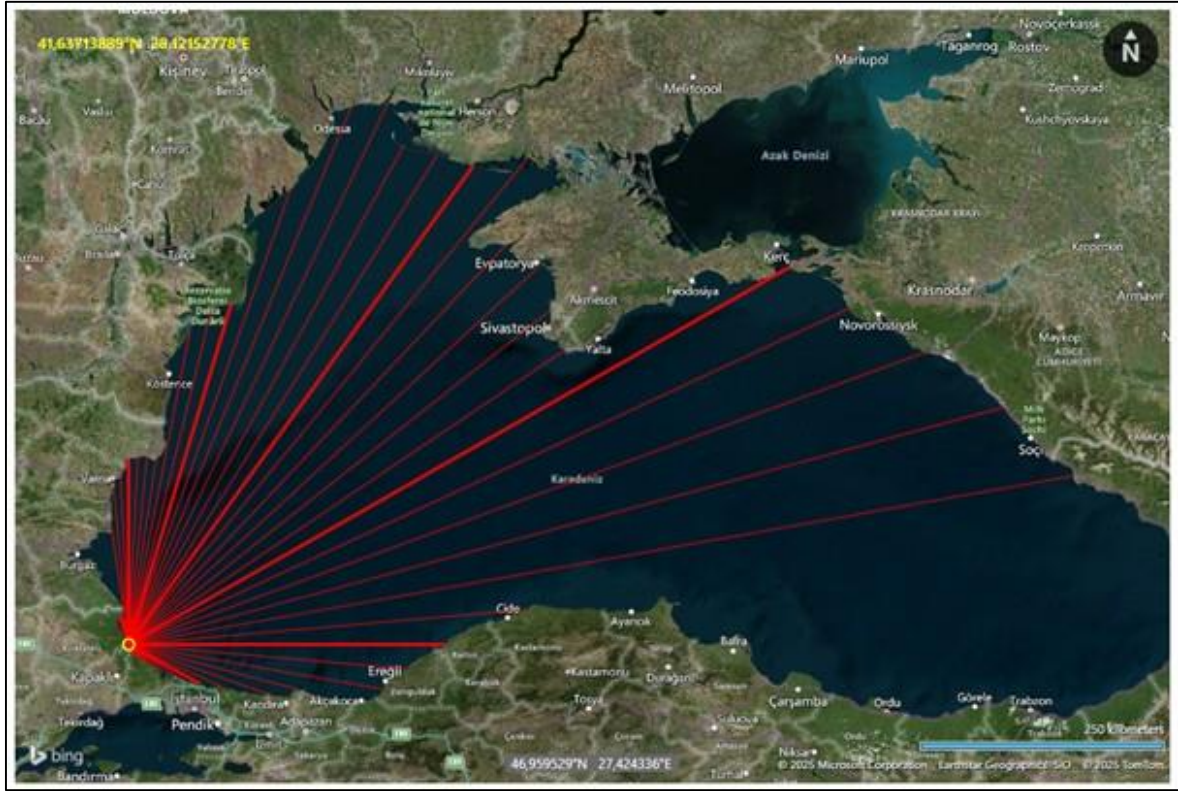
Şekil 4.10. Frøya rüzgar spektrumu

Şekil 4.10'daki Frøya rüzgar spektrumu sonraki bölümlerde doğal frekans analizinde kullanılacaktır.

4.2.2. Dalga iklimi

Rüzgar iklimine benzer şekilde dalga iklimi için de HYDROTAM – 3D uygulaması kullanılmıştır. Kırklareli – Kıyıköy bölgesi için dalga kabarma, feç⁵, mesafesi Şekil 4.11'deki gibidir.

⁵ Feç, rüzgarın dalga oluşumuna katkıda bulunduğu su yüzeyinin mesafesini ifade eder. Yani, bir rüzgarın belirli bir yönde esmesi durumunda, rüzgarın dalgaları oluşturmak için etkili olduğu su yüzeyinin uzunluğudur



Şekil 4.11. Kırklareli – Kıyıköy için dalga kabarma mesafesi

Tüm yönlerdeki etkin feç uzunluğunun belirlenmesi için cosinüs ortalama metodu kullanılmıştır. Bu yöntemde tüm ana yönler için 22,5 derece aralığında 7,5 derecelik açılarla dalga kabarma uzunluklarının ortalamaları alınmaktadır. Efektif feç uzunluğu Eş. 4.7 ile elde edilir (Balas ve diğ., 2012).

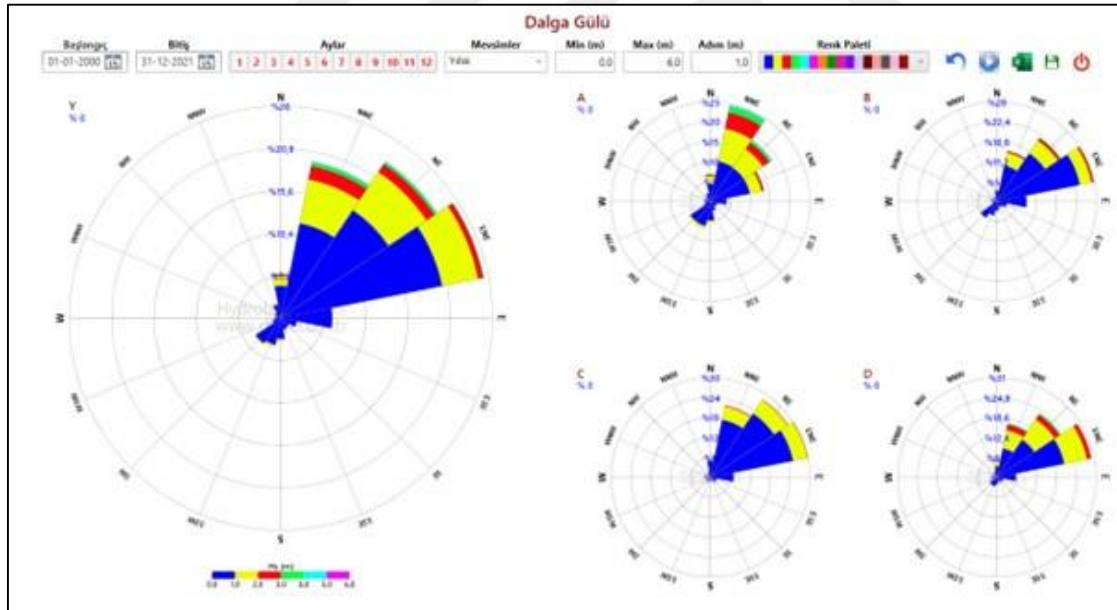
$$X_{eff} = \frac{\sum X_i \cos \theta_i}{\sum \cos \theta_i} \quad (4.7)$$

Burada, X_i ; dalga kabarma uzunluğu θ_i ; derece artım miktarı ve X_{eff} ; efektif dalga kabarma uzunluğudur. Efektif dalga kabarma uzunlukları HYDROTAM – 3D ortamında Çizelge 4.3'teki gibi elde edilmiştir.

Çizelge 4.3. Etkin dalga kabarma mesafeleri

Yön	Açı (°)	Efektif feç (m)	Yön	Açı (°)	Efektif feç (m)
N	0	113688,36	S	180	478,46
NNE	22,5	420811,96	SSW	202,5	351,45
NE	45	596055,64	SW	225	344,99
ENE	67,5	730124,37	WSW	247,5	414,22
E	90	492198,28	W	270	505,58
ESE	112,5	94369,4	WNW	292,5	637,83
SE	135	6594,45	NW	315	1908,42
SSE	157,5	826,82	NNW	337,5	4056,15

HYDROTAM – 3D yazılımından elde edilen yıllık ve mevsimlik dalga gülleri Şekil 4.12’deki gibidir.



Şekil 4.12. 2000 – 2021 yılları arasında ECMWF verilerine göre yıllık ve mevsimlik dalga gülleri

Şekil 4.12’den de görüleceği üzere hakim rüzgar yönü Doğu – Kuzeydoğu (ENE) yönündedir. Arany ve diğ. (2017) gerekli dalga parametrelerini elde etmek için aşağıdaki gibi 5 alt basamaktan oluşturan yöntemin takip edilmesini önermişlerdir. Bu çalışmada da bu 5 alt basamak takip edilecektir.

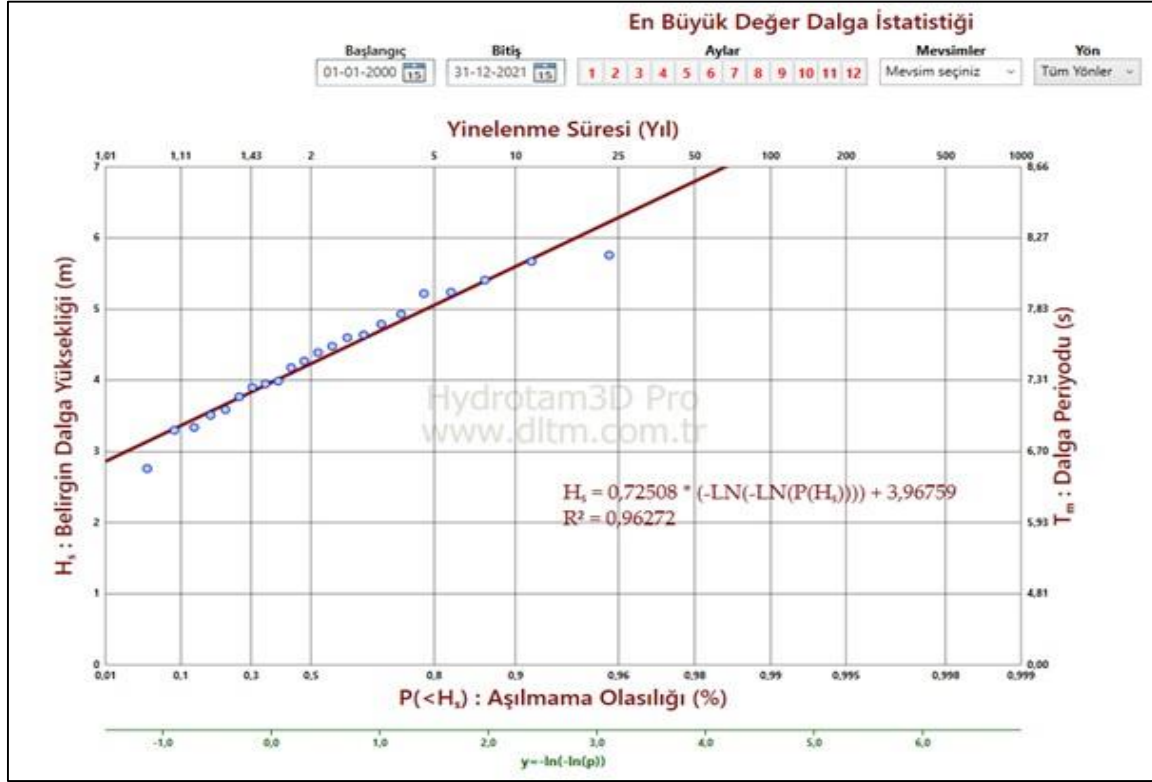
Alt adım 1. 50 yıl tekerrür süresine sahip belirgin dalga yüksekliğinin elde edilmesi

Yapının ekonomik ömrünün 50 yıl olacağı hesaplamalarda dikkate alındığından bu adımda tekerrür süresi 50 yıl olarak göz önüne alınmıştır. 50 yıllık tekerrür süresine sahip belirgin dalga yüksekliği için HYDROTAM – 3D ortamından elde edilen uzun dönem dalga istatistiği Gumble dağılımı ile göz önüne alınarak Çizelge 4.4’te verilmiştir.

Çizelge 4.4. HYDROTAM ortamından elde edilen Kıyıköy bölgesi için dalga verileri, Gumble dağılımı (H_s metre, T_m saniye cinsindendir.)

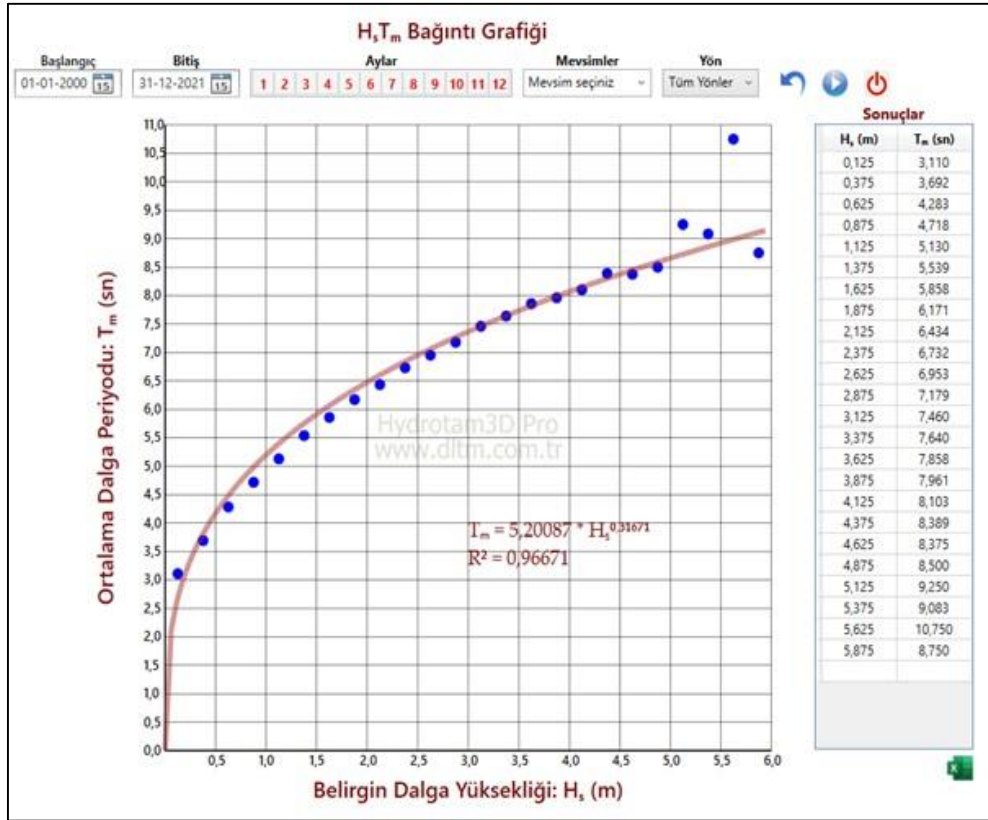
Yinel enme Süresi	5 Yıl		10 Yıl		25 Yıl		50 Yıl		100 Yıl	
	H_s	T_m	H_s	T_m	H_s	T_m	H_s	T_m	H_s	T_m
N	2,727 ± 0,038	6,6	2,971 ± 0,053	6,8	3,280 ± 0,075	7,2	3,509 ± 0,092	7,4	3,737 ± 0,109	7,7
NNE	4,607 ± 0,097	8,5	5,160 ± 0,136	9,0	5,859 ± 0,193	9,6	6,378 ± 0,238	10,1	6,893 ± 0,282	10,5
NE	4,172 ± 0,073	8,1	4,669 ± 0,102	8,6	5,296 ± 0,144	9,2	5,761 ± 0,177	9,6	6,223 ± 0,211	9,9
ENE	3,378 ± 0,062	7,3	3,781 ± 0,087	7,7	4,291 ± 0,123	8,2	4,669 ± 0,151	8,6	5,044 ± 0,180	8,9
E	1,240 ± 0,048	4,4	1,435 ± 0,067	4,7	1,680 ± 0,096	5,1	1,863 ± 0,118	5,1	2,044 ± 0,140	5,7
ESE	0,854 ± 0,041	3,6	0,961 ± 0,057	3,9	1,097 ± 0,081	4,1	1,197 ± 0,099	4,3	1,297 ± 0,118	4,5
SE	0,885 ± 0,014	3,7	1,045 ± 0,020	4,0	1,247 ± 0,028	4,4	1,396 ± 0,034	4,7	1,545 ± 0,041	4,9
SSE	1,046 ± 0,025	4,0	1,212 ± 0,035	4,4	1,422 ± 0,050	4,7	1,578 ± 0,061	5,0	1,732 ± 0,073	5,2
S	1,360 ± 0,036	4,6	1,576 ± 0,050	5,0	1,848 ± 0,072	5,4	2,049 ± 0,088	5,7	2,250 ± 0,105	5,9
SSW	1,422 ± 0,047	4,7	1,627 ± 0,065	5,1	1,886 ± 0,093	5,4	2,078 ± 0,114	5,7	2,269 ± 0,135	6,0
SW	1,232 ± 0,018	4,4	1,396 ± 0,025	4,7	1,603 ± 0,035	5,0	1,757 ± 0,043	5,3	1,910 ± 0,051	5,5
WSW	1,065 ± 0,024	4,1	1,231 ± 0,034	4,4	1,440 ± 0,048	4,8	1,596 ± 0,060	5,0	1,750 ± 0,071	5,2
W	0,845 ± 0,021	3,6	1,005 ± 0,029	4,0	1,207 ± 0,041	4,3	1,357 ± 0,051	4,6	1,506 ± 0,061	4,9
WNW	0,806 ± 0,020	3,5	0,965 ± 0,028	3,9	1,166 ± 0,039	4,3	1,315 ± 0,048	4,5	1,463 ± 0,057	4,8
NW	1,089 ± 0,029	4,1 75	1,319 ± 0,041	4,5	1,610 ± 0,059	5,0	1,826 ± 0,072	5,4 05	2,040 ± 0,086	5,7
NNW	1,647 ± 0,035	5,1 34	1,983 ± 0,049	5,6	2,406 ± 0,070	6,2	2,721 ± 0,086	6,5 98	3,033 ± 0,102	6,9

Çizelge 4.4'ten de görüleceği üzere 50 yıl tekerrür süreli tasarım dalgası %90 güven aralığı dahilinde NNE yönünde 6,38 m olarak elde edilmiştir. Gumble dağılımı grafik olarak Şekil 4.13'teki gibi elde edilmiştir.



Şekil 4.13. Kırklareli – Kıyıköy bölgesi için en büyük değer dalga istatistiği, Gumble dağılımı

Yine benzer şekilde belirgin dalga yüksekliği ile periyot arasındaki ilişki Şekil 4.14'teki gibi elde edilmiştir.



Şekil 4.14. Belirgin dalga yüksekliği ile periyot arasındaki bağıntı

Alt adım 2. Dalga periyotlarına karşılık gelen aralığın hesaplanması

Verilen bir dalga yüksekliği için dalga dönemlerinin aralığı, DNV (2014) tarafından verilen DNV – OS – J101 (Design of Offshore Wind Turbine Structures – Açık Deniz Rüzgar Türbin Yapılarının Tasarımı) standardına göre Eş. 4.8’deki gibi tahmin edilebilir.

$$11,1 \sqrt{\frac{H_s}{g}} \leq T \leq 14,3 \sqrt{\frac{H_s}{g}} \quad (4.8)$$

Genellikle, en büyük dalga yükleri en düşük dalga periyoduna sahip dalgalar tarafından üretilir ve dinamik amplifikasyon da bu durumda en yüksektir. Bunun nedeni frekans değerlerinin, bu aralıklarda, yapının doğal frekansına en yakın aralıkta olmasıdır. Bu nedenle pik dalga periyodu Eş. 4.9 ile verilir (Arany ve diğ., 2017).

$$T_s = 11,1 \sqrt{\frac{H_s}{g}} \quad (4.9)$$

Alt adım 3. Üç saatlik bir periyotta dalga sayısını hesaplanması

Genellikle, belirgin dalga yükseklikleri 3 saatlik bir periyot için verilmektedir. Başka bir deyişle, belirgin dalga yüksekliği, tüm dalgaların en yüksek 1/3'ünün ortalaması olarak hesaplanır. Bu nedenle, bu 3 saatlik periyot içinde birçok farklı dalga yüksekliği oluşur ve en yüksek meydana gelen dalga yüksekliğine maksimum dalga yüksekliği denir. Bunu bulmak için, 3 saatlik periyotta dalga sayısını bilmek gereklidir; çünkü dalga sayısı arttıkça daha yüksek dalgaların meydana gelme olasılığı da artar (Arany ve diğ., 2017). 3 saatlik periyotta gelen dalga sayısı (N_d) Eş. 4.10 ile hesaplanır.

$$N_d = \frac{3 \text{ saat}}{T_s} = \frac{10800 \text{ sn}}{T_s} \quad (4.10)$$

Alt adım 4. Maksimum dalga yüksekliği ile belirgin dalga yüksekliği arasındaki oranın hesaplanması

DNV (2014) standardı, maksimum dalga yüksekliği için, en yüksek dalga yüksekliklerinin dağılımının modunu almayı önermiştir (Eş. 4.11).

$$H_m = H_s \sqrt{\frac{1}{2} \ln(N_d)} \approx 1,87 H_s \quad (4.11)$$

Maksimum dalga yüksekliği, kabaca, $H_m = 2H_s$ olarak alınabilir. Arany ve diğ. (2017) su derinliğinin maksimum dalga yüksekliğini sınırlayabileceğinin unutulmaması gerektiğini vurgulamışlardır. Dalgaların sığ sulara doğru ilerlemesiyle beraber, sıklaşma dalga yüksekliğinde artmaya neden olmaktadır. Bu süreç fiziksel limit olan dalga dikliği (dalga yüksekliği/dalga uzunluğu) aşıncaya kadar devam eder. Bu limit aşıldığında dalga kırılır ve enerjisini kırılma bölgesine aktarır. Kırılma genellikle dalga yüksekliğinin deniz derinliğinin 0,8 katına yakın olduğu bölgede meydana gelir. Enerjinin büyük bir kısmının kaybedilmesiyle beraber kırılma sonrası dalga yüksekliği oldukça azalmaktadır (URL – 16).

Alt adım 5. Maksimum dalga yüksekliğine karşılık gelen dalga dönemlerinin aralığının hesaplanması

Alt adım 2'de kullanılan aynı formüller bu adımda da kullanılabilir (Eş. 4.12 – Eş. 4.13).

$$11,1 \sqrt{\frac{H_s}{g}} \leq T \leq 14,3 \sqrt{\frac{H_s}{g}} \quad (4.12)$$

$$T_s = 11,1 \sqrt{\frac{H_s}{g}} \quad (4.13)$$

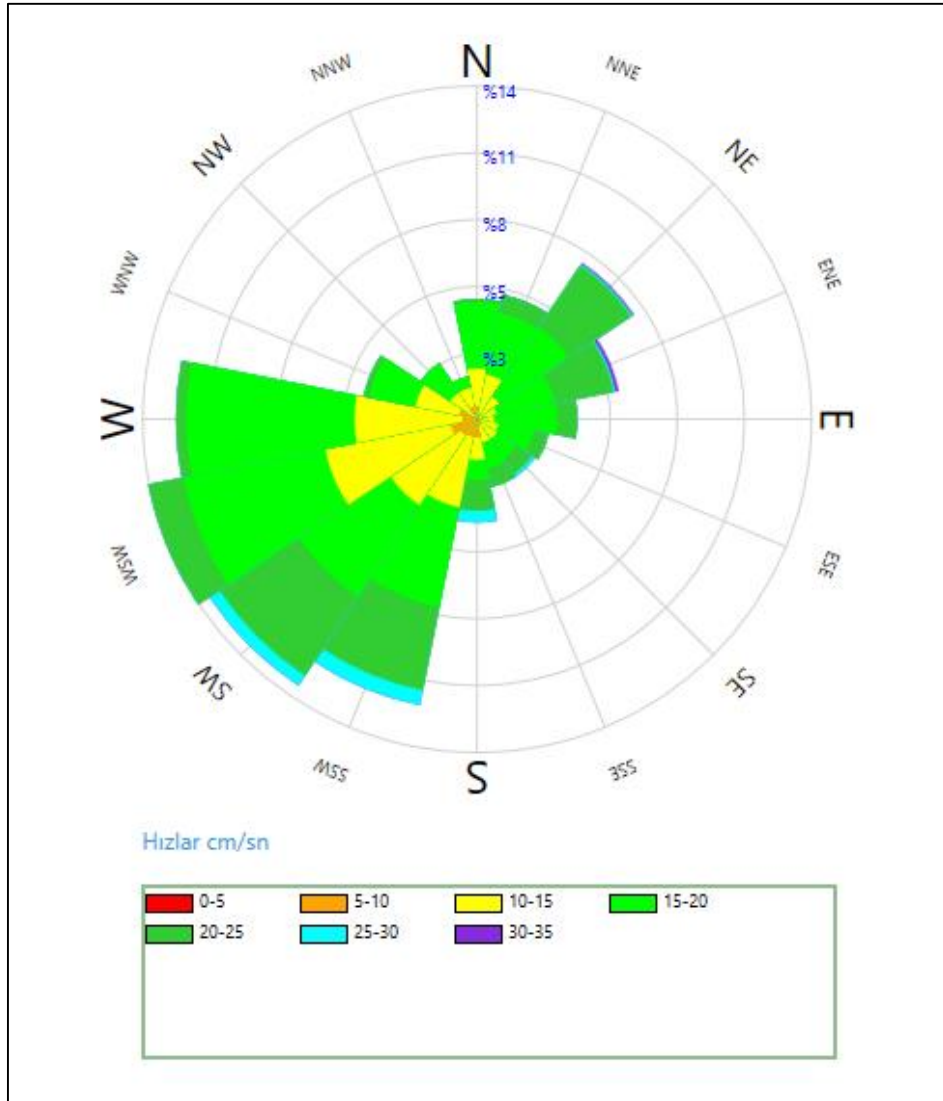
Bu adımlardan elde edilecek dalga yüksekliği, H_m ve dalga periyodu, T_m , dinamik amplifikasyonu içerecek şekilde maksimum dalga yükü hesaplaması için kullanılabilir. Dolayısıyla analizde kullanılacak dalga parametreleri Çizelge 4.5'teki gibidir.

Çizelge 4.5. Kırklareli – Kıyıköy bölgesi için dalga parametreleri

Dalga parametreleri		
50 yıl tekrür süreli belirgin dalga yüksekliği	H_s	6,38 m
Pik dalga periyodu	T_s	10,1 sn
Maksimum dalga yüksekliği	H_m	11,9 m
Maksimum dalganın pik periyodu	T_m	12,2 sn
Deniz derinliği	S	30 m
Deniz suyunun yoğunluğu	ρ_{su}	1030 kg/m ³

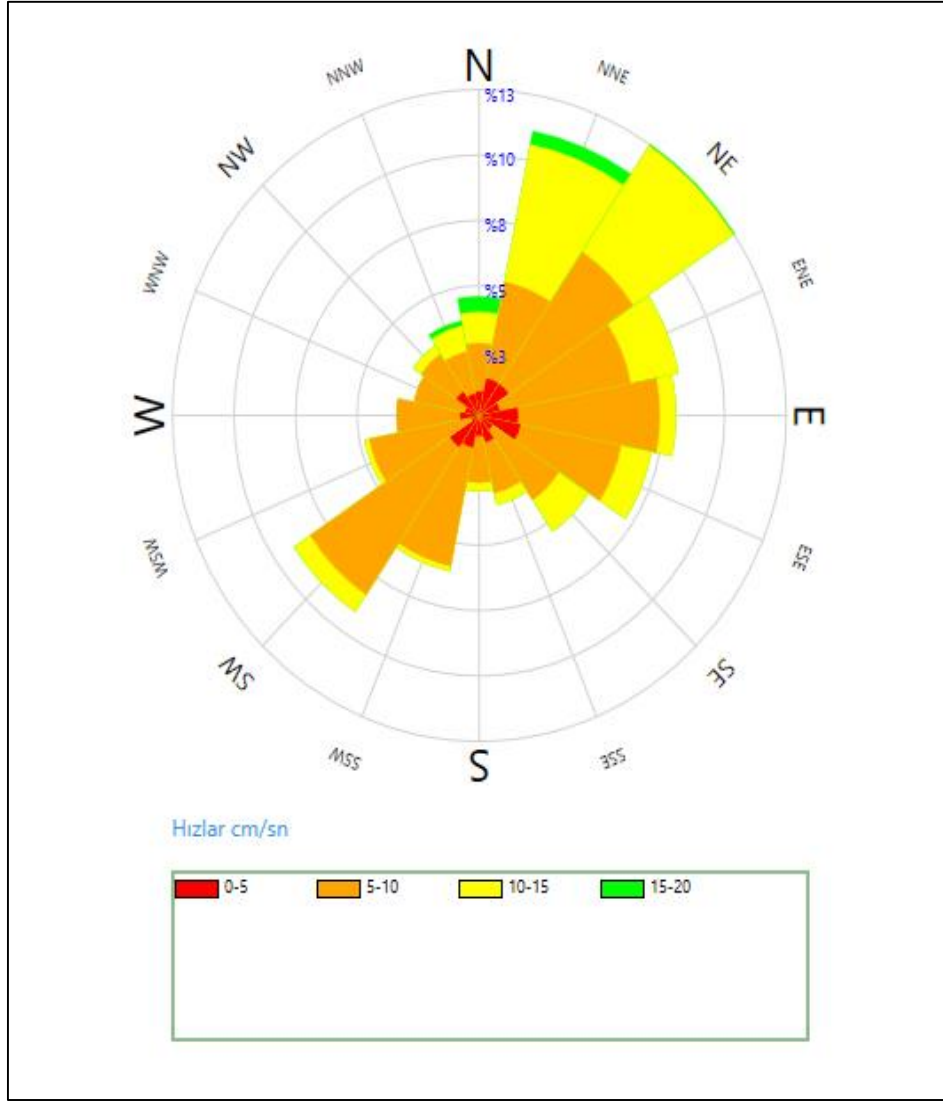
4.2.3. Akıntı iklimi

Akıntı iklimi HYDROTAM – 3D ortamından elde edilmiştir. Tüm aylar için yüzey akıntı gülü Şekil 4.15'te verilmiştir.



Şekil 4.15. Kombine hibrit sistemin tasarlandığı noktada tüm aylar için yüzey akıntı gülü

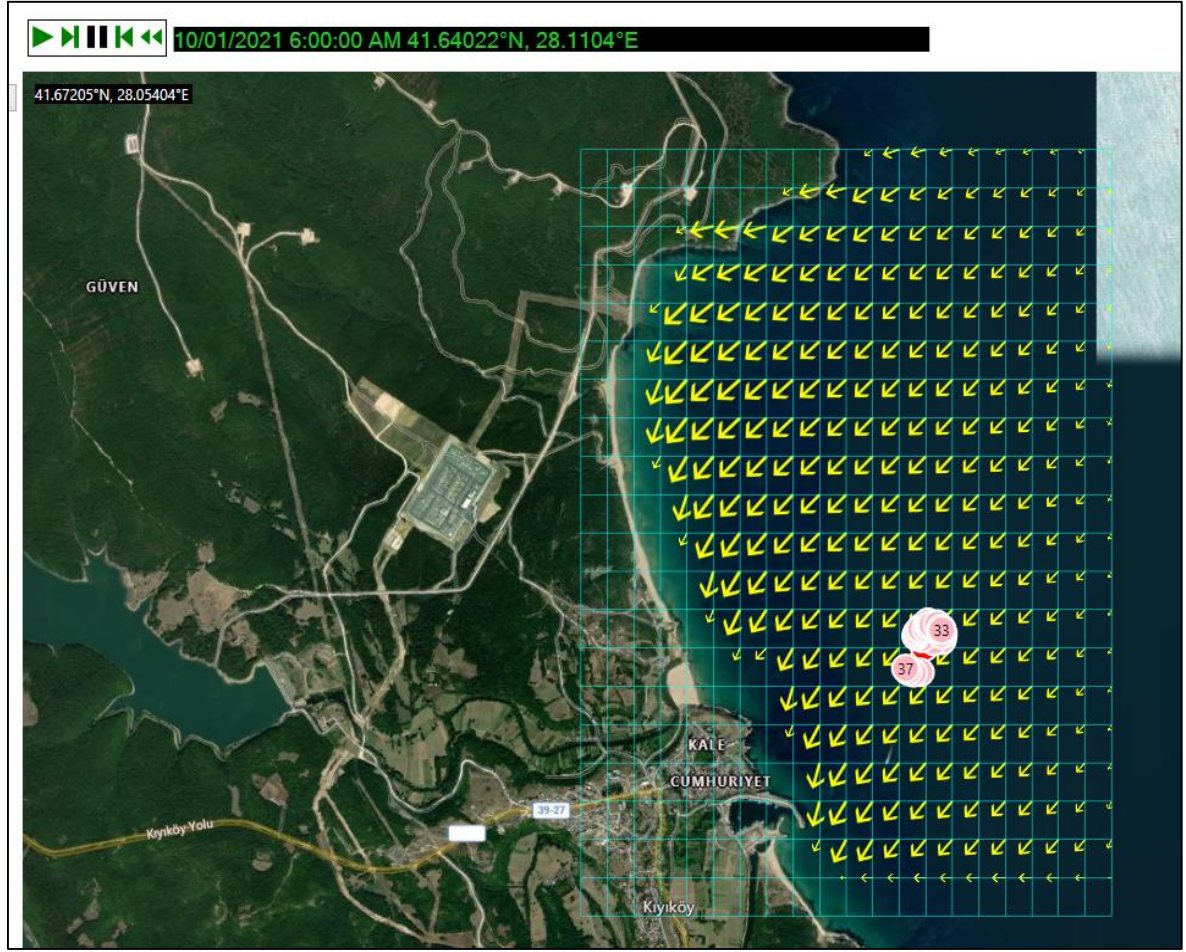
Şekil 4.15'ten baskın yüzey akıntısının batı güney batı yönünde olduğu görülmüştür. Yine HYDROTAM – 3D ortamında tüm aylar için taban akıntı gülü Şekil 4.16'da verilmiştir.



Şekil 4.16. Kombine hibrit sistemin tasarlandığı noktada tüm aylar için taban akıntı gülü

Şekil 4.16'dan görüleceği üzere baskın taban akıntı yönü kuzeydoğu yönüdür.

Kombine hibrid sistemin olduğu noktada 10 Ocak 2021 tarihindeki yüzey akıntı yörüngeleri ise Şekil 4.17'de verilmiştir.



Şekil 4.17. 10/01/2021 tarihli akıntı verisine göre yüzey akıntı yörüngesi

Türkiye'nin açık deniz akıntı (hidrokinetik) enerji potansiyeli, rüzgar ve dalga enerjisine göre düşüktür. Tasarım için Olası En Yüksek Akıntı (Probable Maximum Current) değeri olan 1 m/s kullanılmıştır. Bu değer İstanbul ve Çanakkale boğazları ile Kanal İstanbul'da oluşabilen tasarım değeridir.

4.3. Türbinlerin Seçimi

Türbinlerin seçiminin bu bölüme bırakılmasının sebebi bu seçimin rüzgar, dalga ve akıntı iklimine göre yapılacak olmasındandır.

4.3.1. Rüzgar türbini seçimi

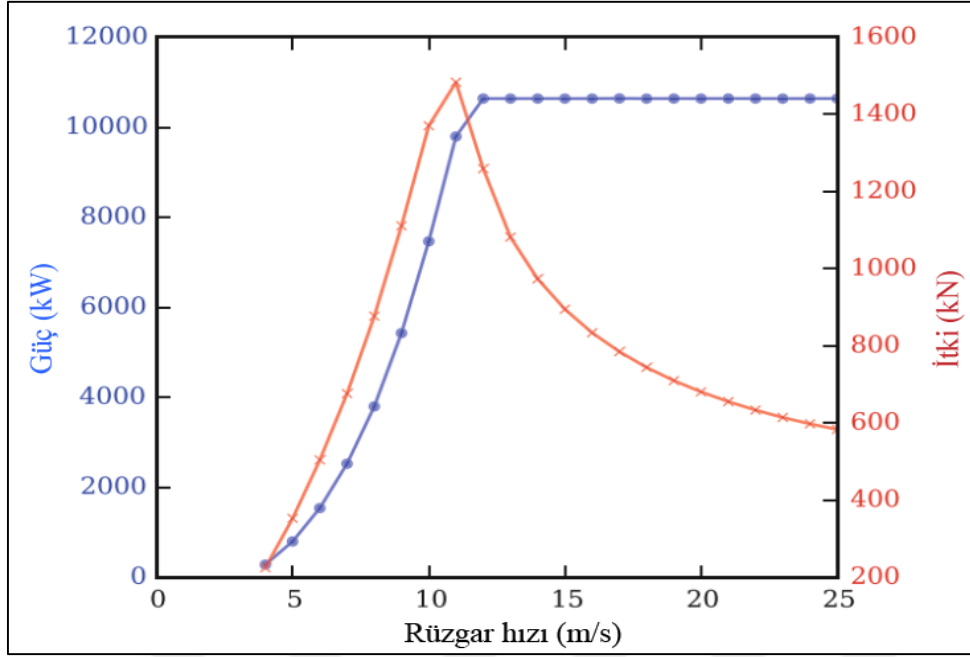
Rüzgar türbini, rüzgarın kinetik enerjisini elektrik enerjisine dönüştüren bir cihazdır. Genellikle yüksek kuleler üzerine yerleştirilen türbinler, geniş kanatları sayesinde rüzgarın

hareketini yakalar. Rüzgarın hızı arttıkça, türbinlerin verimliliği de artar. Bu türbini kullanmak, hem enerji maliyetlerini düşürmeye yardımcı olur hem de karbon ayak izini azaltır. Özellikle kıyı bölgeleri ve açık alanlarda yaygın olarak bulunurlar ve yenilenebilir enerji sistemlerinin temel bileşenlerinden biri haline gelmiştir. Rüzgar türbini seçiminde bölgede, daha önce belirtildiği gibi, yüksek türbülans özelliklerine bağlı olarak IEC 61400 – 1 standardına uygun biçimde Sınıf A olarak seçim yapılmıştır. Deniz üzeri rüzgar türbini, Danimarka Teknik Üniversitesi referans türbini ile benzer şekilde 10 MW seviyesinde tasarlanmıştır. Danimarka Teknik Üniversitesi (DTU) tarafından geliştirilen DTU 10 MW rüzgar türbini, büyük ölçekli deniz üzeri rüzgar enerjisi projeleri için referans modeli olarak hizmet etmektedir. Türbinin rotor çapı 178,3 metredir ve göbek (hub) yüksekliği 119 metredir. Türbinin toplam yüksekliği, kanat ucunda 145 metreye ulaşmaktadır. Yaklaşık 25 000 m²'lik bir alanı tarayan türbin, rüzgardan enerji toplama verimliliğini maksimize edecek şekilde tasarlanmış olup, deniz üzeri rüzgar türbinleri için son derece verimlidir. Türbinin teknik özellikleri Çizelge 4.6'da verilmiştir (Bak ve diğ., 2013).

Çizelge 4.6. DTU 10 MW referans türbininin teknik özellikleri

DTU 10 MW referans rüzgar türbininin özellikleri		
Kanat	Rotor çapı	178,332 m
	Minimum ve maksimum rotor dönüş hızı	6 dev/dk ; 9,6 dev/dk
	Uzunluk	86,366 m
	Toplam ağırlık	41 716 kg
Göbek ve nase	Göbek çapı; göbek yüksekliği	5,6 m ; 119 m
	Göbek ağırlığı	105 520 kg
	Nase ağırlığı	446 036 kg
Kule	Geçiş parçasının üstünde kalan uzunluk	115,63 m
	Ağırlık	682 442 kg
	Kule üst çapı; kule taban çapı	5,5 m ; 8,3 m
	Kule üst kalınlığı; kule taban kalınlığı	0,019 m ; 0,038 m

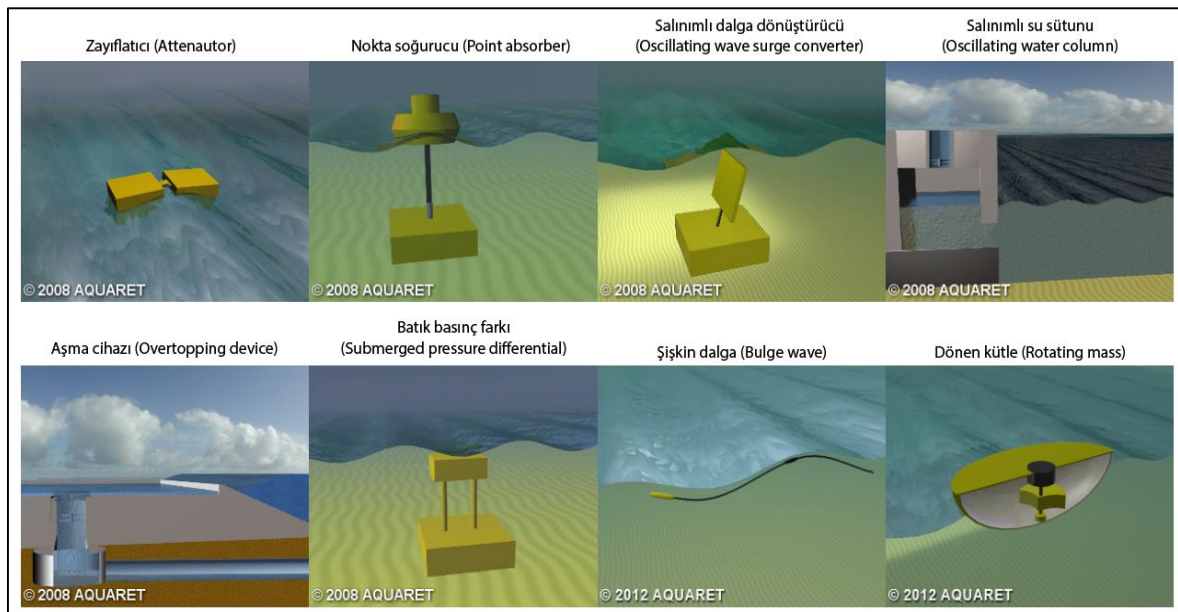
Tasarımda önemli bir rol oynayan hız – güç ve hız – itki eğrisi ise Şekil 4.18'te verilmiştir (Stäblein, 2016).



Şekil 4.18. DTU 10 MW referans türbini için hız - güç ve hız - etki eğrileri (Stäblein, 2016)

4.3.2. Dalga türbini seçimi

Dalga enerjisi, okyanus ve deniz yüzeyindeki dalgaların kinetik ve potansiyel enerjisini elektrik enerjisine dönüştüren yenilenebilir enerji sistemleridir. Dalga enerji üretimi, çevre dostu bir enerji kaynağı olarak dikkat çekmektedir ve Şekil 4.19'daki gibi çeşitli türlerde sistemler geliştirilmiştir (URL – 17).

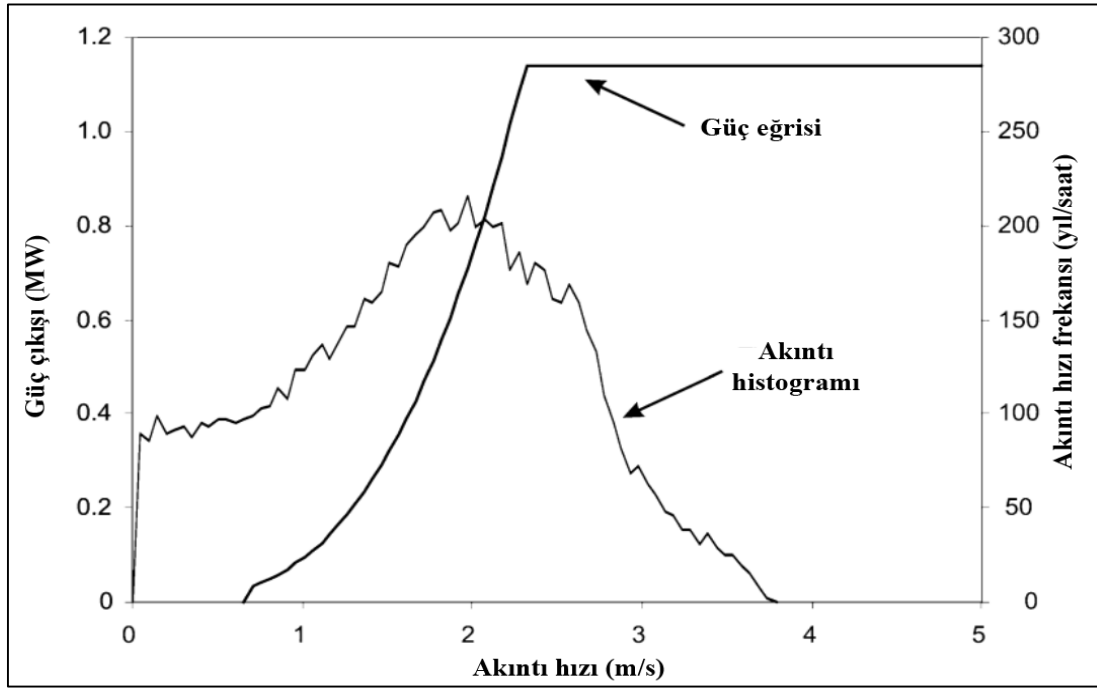


Şekil 4.19. Dalga enerji dönüştürücüleri (URL – 17)

Şekil 4.19’da farklı tipteki dalga dönüştürücüler verilmiştir. Sırasıyla bunların çalışma prensipleri aşağıda tarif edilmiştir.

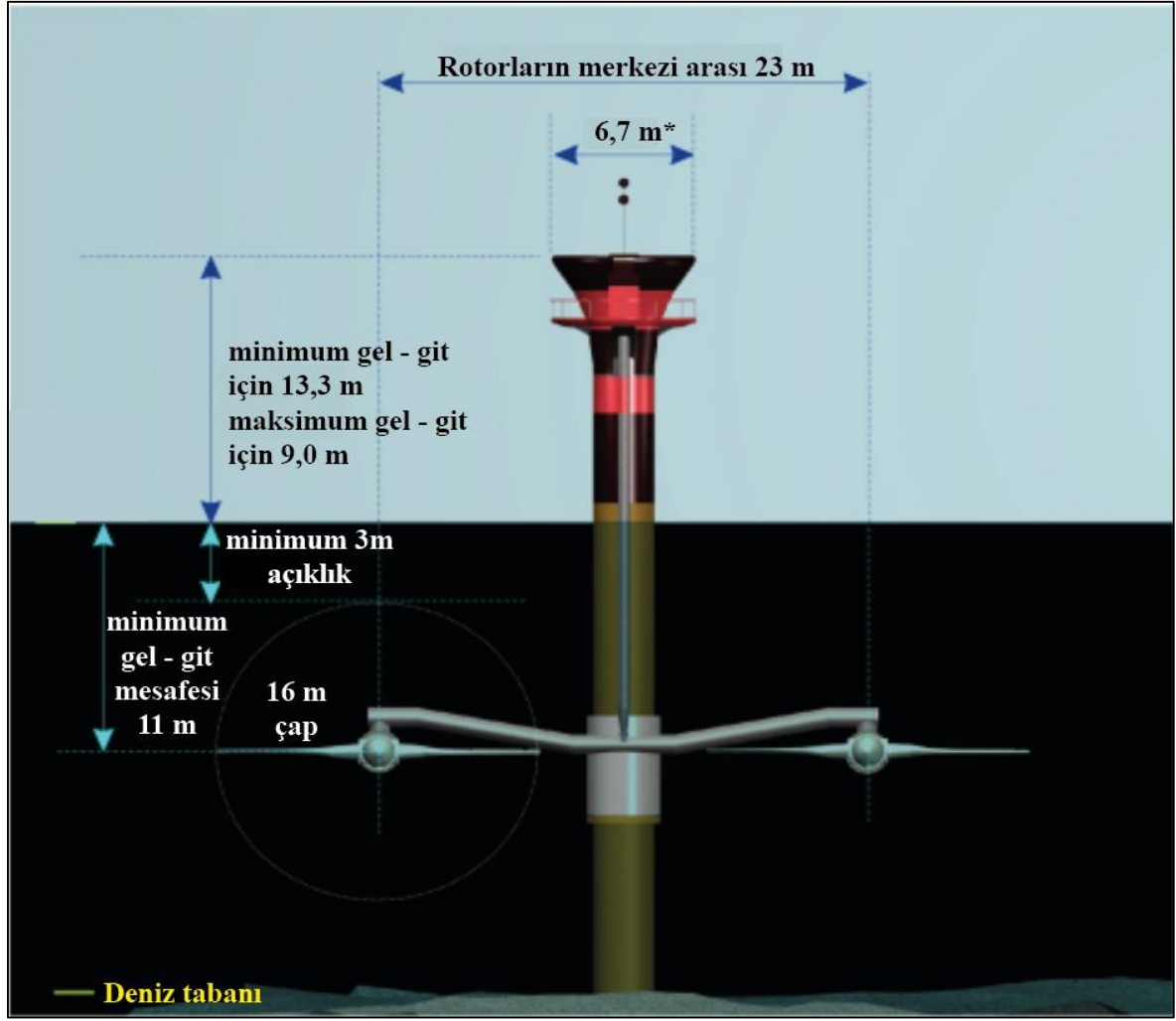
- Zayıflatıcı, dalga yönüne paralel olarak çalışan ve dalgaların üzerinde yüzen bir cihazdır. Bu cihazlar, dalga geçerken iki kol arasındaki göreceli hareketten enerji toplar.
- Nokta soğurucu, su yüzeyinde veya yakınında hareketleriyle her yönden enerji absorbe eden bir yüzer yapıdır. Bu yapı, yüzeydeki yüzen kısmın tabana göre hareketini elektrik enerjisine dönüştürür. Enerji alma sistemi, yer değiştiren veya reaktörlerin yapılandırılmasına bağlı olarak çeşitli formlarda olabilir.
- Salınlı dalga dönüştürücü, dalgalanmalardan ve içindeki su parçacıklarının hareketinden enerji çıkarır. Kol, dalgalar içindeki su hareketine yanıt olarak, pivotlu bir eklemler üzerinde asılı bir sarkaç gibi salınım yapar.
- Salınlı su sütunu, kısmen suya batırılmış, boş bir yapıdır. Su seviyesinin altında denize açıktır ve üst kısmında bir hava sütunu ile altında bir su sütunu bulundurur. Dalgalar, su sütununun yükselip alçalmasına neden olur; bu da hava sütununu sıkıştırır ve gevşetir. Sıkışan hava, genellikle hava akış yönünden bağımsız dönebilme yeteneğine sahip bir türbin aracılığıyla atmosfere akışına izin verir. Türbinin dönüşü, elektrik üretmek için kullanılır.
- Aşma cihazları, dalgaların kırılmasıyla suyu bir depolama rezervuarına toplar. Su daha sonra, enerji üreten geleneksel bir düşük yükseklik türbini aracılığıyla denize geri döner. Bir aşma cihazı, dalga enerjisini yoğunlaştırmak için “toplayıcılar” kullanabilir.
- Batık basınç diferansiyel cihazları genellikle kıyıya yakın ve deniz tabanına bağlıdır. Dalgaların hareketi, cihazın üzerindeki deniz seviyesinin yükselip alçalmasına neden olur ve bu da cihaz içinde bir basınç farkı oluşturur. Alternatif basınç, sıvıyı bir sistem aracılığıyla pompalayarak elektrik üretir.
- Şişkin dalga teknolojisi, dalgalara yöneltilmiş, deniz tabanına bağlı suyla dolu bir lastik tüpten oluşur. Su, arka kısımdan içeri girer ve geçen dalga, tüp boyunca basınç değişimleri yaratır, bu da bir “şişkinlik” oluşturur. Şişkinlik tüp boyunca ilerledikçe büyür ve standart bir düşük yükseklik türbinini çalıştırmak için kullanılacak enerji toplar. Su, türbinin bulunduğu ön kısımda denize geri döner.
- Dönen kütleli sistemlerde, enerjiyi toplamak için, cihazın dalgalar içinde yukarı aşağı ve sağa sola hareket eden bir dönüşüm kullanılır. Bu hareket, eksantrik bir ağırlığı harekete geçirir. Hareket cihazın içindeki bir elektrik jeneratörüne bağlıdır.

seçimi yapılmıştır. SeaGen 1,2 MW, 3 metrelik deniz yüzeyi mesafesiyle seçilen akıntı türbini olup, 25 metre veya daha derin su derinliklerinde kullanılmaktadır. SeaGen, Marine Current Turbines – Deniz Akıntısı Türbinleri (MCT) tarafından geliştirilen dünyanın ilk ticari ölçekli türbini olup, her biri 8 metre yarıçapa sahip ikiz rotorlara sahiptir. Türbinin rotaları, akıntı hızı 1 m/s’yi geçtiğinde elektrik üretmeye başlar (Şekil 4.21) ve rotor uçları, maksimum kapasitede yaklaşık 12 m/s hızla döner (Davison ve Mallows, 2005).



Şekil 4.21. SeaGen 1,2 MW akıntı türbini hız - güç eğrisi (Douglas ve diğ., 2007)

Türbinin yapısının merkezi noktası deniz yüzeyinin 11 metre yukarısında konumlanmış (Davison and Mallows, 2005) olup (Şekil 4.22), bu sayede akıntıları verimli bir şekilde enerji üretimine dönüştürmektedir (URL – 18; URL – 19).



Şekil 4.22. SeaGen 1,2 MW akıntı türbinin görünümü (Davison ve Mallows, 2005)

SeaGen 1,2 MW akıntı türbinin teknik özellikleri ise Çizelge 4.7’de verilmiştir (Douglas ve diğ., 2007).

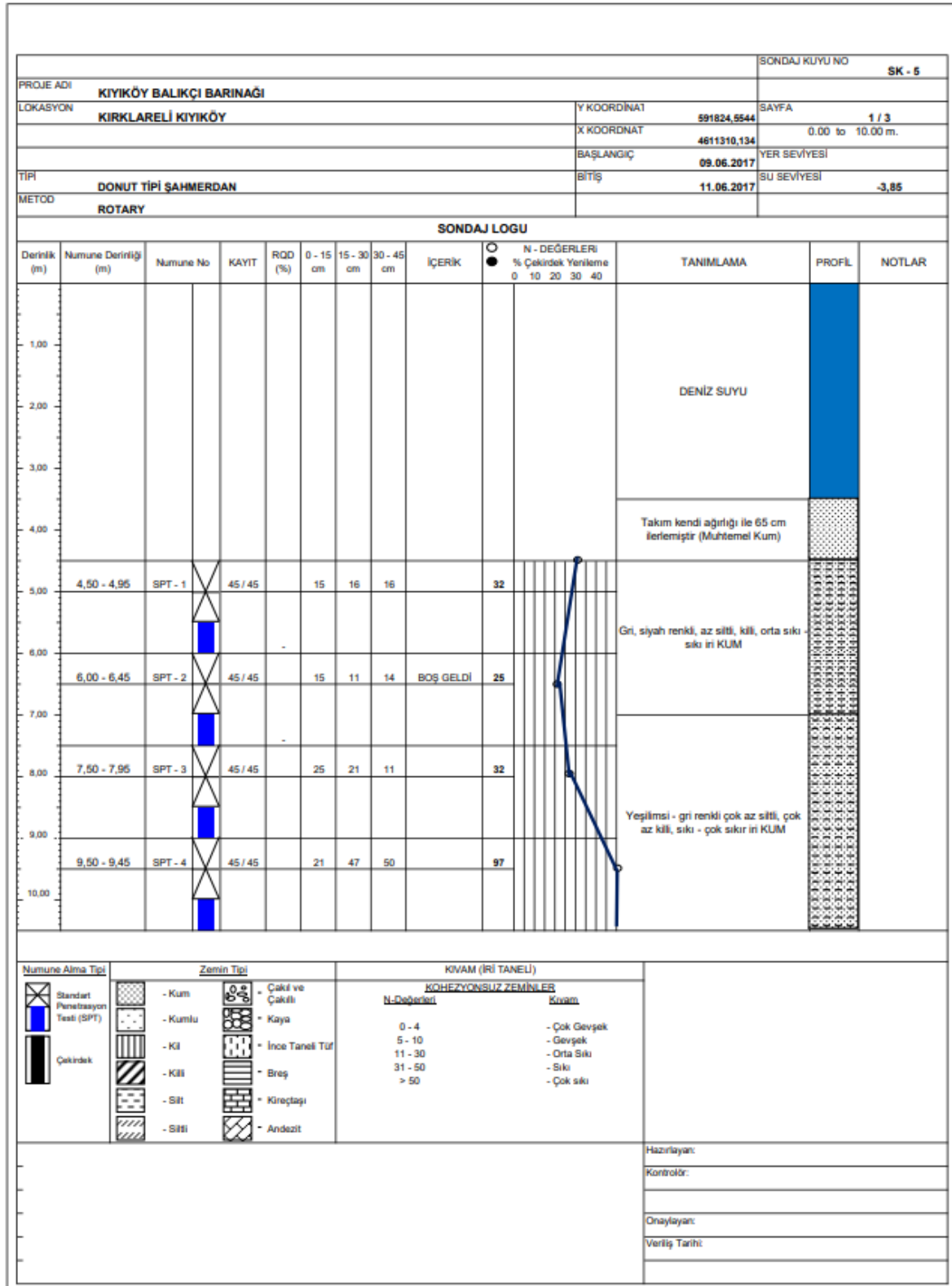
Çizelge 4.7. SeaGen 1,2 MW akıntı türbininin teknik özellikleri (Douglas ve diğ., 2007)

Maksimum güç	1,2 MW
Rotor çapı	16 m
Güvenilirlik	> %90
Genel verim	% 89
Devreye girme hızı	0,7 m/s
Maksimum çalışma hızı	2,25 m/s
Kapasite faktörü	% 48
Ekonomik ömrü	20 yıl

4.4. Zemin Parametrelerinin Belirlenmesi

Kırkırelı – Kıyıköy bölgesi için düşünölen noktada detaylı bir zemin parametre bilgisi yoktur. Yıldırım (2022) bölgede yapmış olduğu çalışmada EMODnet (European Marine Observation and Data Network – Avrupa Deniz Gözlem ve Veri Ağı) ortamından yola çıkarak zeminin ince taneli çamurdan oluştuğunu belirtmiştir. Kırkırelı – Kıyıköy balıkçı barınağı etrafındaki sondaj loglarında ise zeminin üst kısımlarında orta sıkı iri kum orta kısımlarında çok sıkı iri kum gibi yapılara rastlanıldığı görölmüştür (Şekil 4.23).





Şekil 4.23. Kırklareli - Kıyıköy balıkçı barınağı yakınındaki temel sondaj logu

Yine de tam olarak yapımı planlanan bölge için detaylı bir zemin etüdü bulunmamaktadır. Fakat buna rağmen eldeki bu veriler ile bu bölgedeki zeminin kum zemin olduğu

söylenebilir. Bu çalışmada üç farklı sıklık derecesinde kum zemin çalışılmıştır. Bunlar rölatif sıklık (RD – Relative Density) olarak sırasıyla gevşek, orta sıkı ve sıkı kumların temsil edilmesi sebebiyle, 30 ($D_r = 30$), 50 ($D_r = 50$) ve 70 ($D_r = 70$) olarak belirlenmiştir (Eş. 4.14). Her bir rölatif sıklık için zemin tek bir katmandan olarak düşünülmüş olsa da bir sonraki bölümde belirtileceği üzere burada yapılan tüm hesaplamalar farklı katmanlı zeminlere de uygulanabilir nitelik taşımaktadır.

$$RD = \frac{e_{max} - e}{e_{max} - e_{min}} \quad (4.14)$$

Burada, e ; mevcut boşluk oranını, e_{max} ; maksimum boşluk oranını (en gevşek sıkıştırma durumundaki boşluk oranı) ve e_{min} ; minimum boşluk oranını (en sıkı sıkıştırma durumundaki boşluk oranı) ifade eder. Rölatif sıklık yüzde cinsinden tarif edilir.

HSsmall modelinin diğer parametreleri göz önünde bulundurulmadan önce, rölatif sıklık cinsinden, Eş. 4.15 ve Eş. 4.16 kum zeminin birim hacim ağırlıklarını pratik uygulamalar için tahmin etmek amacıyla kullanılabilir (Brinkgreve ve diğ., 2010).

$$\gamma_{unsat} = 15 + 4,0 RD/100 [kN/m^3] \quad (4.15)$$

$$\gamma_{sat} = 19 + 1,6 RD/100 [kN/m^3] \quad (4.16)$$

Burada, γ_{unsat} ; zeminin suya doymun olmadığı birim hacim ağırlığı ve γ_{sat} ; zeminin tamamen suya doymun olduğu birim hacim ağırlığıdır.

HSsmall modelinde, her biri belirli bir referans gerilme seviyesi, p_{ref} , altında dört farklı rijitlik parametresi bulunmaktadır (Eş. 4.17 – Eş. 4.20).

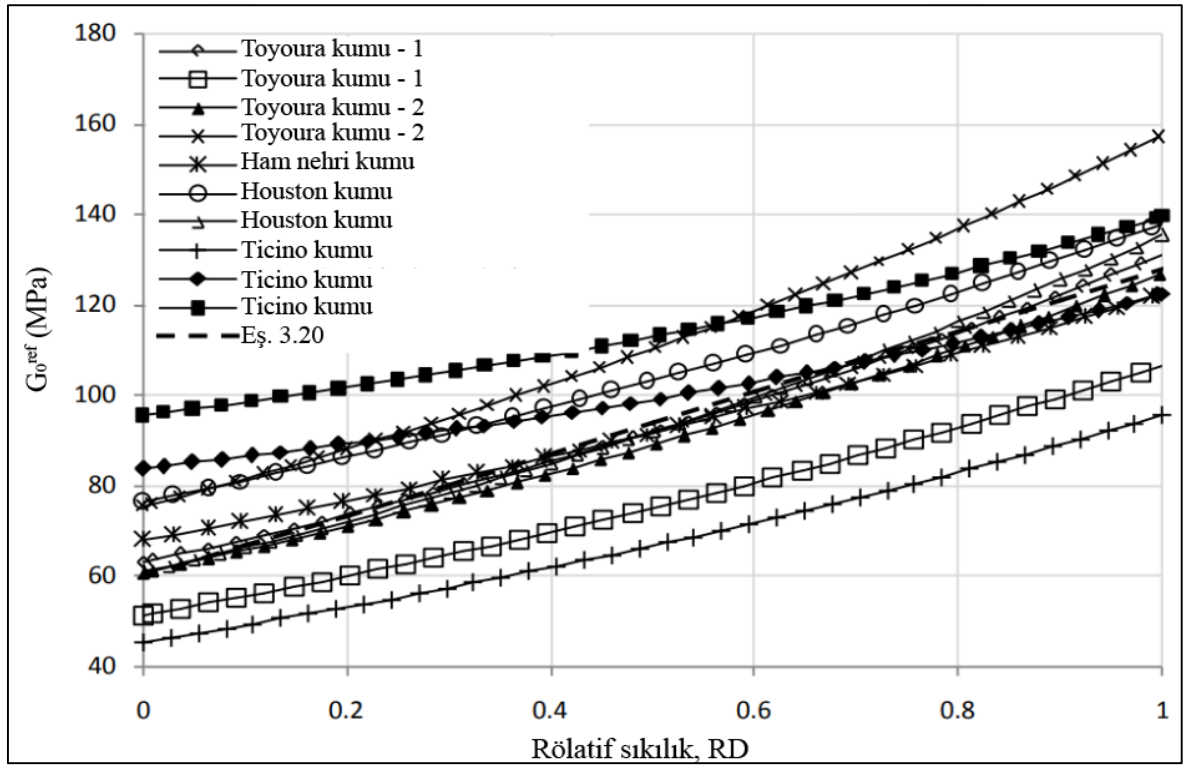
$$E_{50}^{ref} = 60000 RD/100 [kN/m^2] \quad (4.17)$$

$$E_{oed}^{ref} = 60000 RD/100 [kN/m^2] \quad (4.18)$$

$$E_{ur}^{ref} = 180000 RD/100 [kN/m^2] \quad (4.19)$$

$$G_0^{ref} = 60000 + 68000 RD/100 [kN/m^2] \quad (4.20)$$

Burada, E_{50}^{ref} ; drenajlı standart üç eksenli yükleme testindeki sekant rijitlik, E_{oed}^{ref} ; öedometre yüklemesindeki tanjant rijitlik, E_{ur}^{ref} ; yükleme – boşaltma rijitliği ve G_0^{ref} ; zemin için referans kayma modülüdür. Eş. 4.17 ile Eş. 4.20 arasındaki eşitliklerden de görüleceği üzere kum zeminler için rijitlik parametrelerinin rölatif sıkılık ile lineer olarak değiştiği kabulü yapılmıştır (Şekil 4.24).



Şekil 4.24. Farklı yoğunluktaki farklı kumlar için G_0^{ref} değerlerinin karşılaştırılması (Brinkgreve ve diğ., 2010)

Rijitlik değeri, gerilme ile orantılıdır (Brinkgreve ve diğ., 2010). Rijitliğin gerilme seviyesine bağlılık oranı, m , Eş. 4.21 ile verilmiştir.

$$m = 0,7 - RD/320 [-] \quad (4.21)$$

Boşaltma ve yeniden yükleme için Poisson oranı (v_{ur}) 0,2 olarak alınmıştır. Modül azalma eğrisini, tekrarlı yük altında kayma gerilme seviyesi ile ilişkilendiren parametre $\gamma_{0,7}$ 'dir ve bunun için Eş. 4.22 önerilmiştir.

$$\gamma_{0,7} = (2 - RD/100) \cdot 10^{-4} [-] \quad (4.22)$$

Diğer parametreler ise Eş. 3.23 ile Eş. 3.25 arasında verilmiştir.

$$\varphi' = 28 + 12.5 RD/100 [^\circ] \quad (4.23)$$

$$\psi = -2 + 12.5 RD/100 [^\circ] \quad (4.24)$$

$$R_f = 1 - RD/800 [-] \quad (4.25)$$

Burada, φ' ; efektif içsel sürtünme açısı, ψ ; dilatans açısı ve R_f ; zemin modülü azalmasıdır. Brinkgreve ve diğ. (2010) bu değerlerin drenajlı koşullar için kullanılması gerektiğini belirtmişlerdir.

Bu çalışmada üç farklı rölatif sıkılık değeri ile çalışıldığı daha önce belirtilmişti. Buna bağlı zemin parametreleri Çizelge 4.8'de verilmiştir.

Çizelge 4.8. Farklı sıklık değerleri için zemin parametrelerinin değerleri

D_r	30	50	70	Birim
γ_{sat}	19,48	19,80	20,12	kN/m^3
γ'_{sat}	9,67	9,99	10,31	kN/m^3
E_{50}^{ref}	18000	30000	42000	kN/m^2
E_{oed}^{ref}	18000	30000	42000	kN/m^2
E_{ur}^{ref}	54000	90000	126000	kN/m^2
G_0^{ref}	80400	94000	107600	kN/m^2
m	0,60625	0,54375	0,48125	[-]
$\gamma_{0,7}$	0,00017	0,00015	0,00013	[-]
ϕ'	31,75	34,25	36,75	°
ϕ'	0,554142038	0,597775269	0,6414085	rad
ψ	1,75	4,25	6,75	°
ψ	0,030543262	0,074176493	0,117809725	rad
R_f	0,9625	0,9375	0,9125	[-]

Caceoğlu (2023) Marmara denizinin güney bölgesinde tekil kazıklı rüzgar türbininin yapısal analizini gerçekleştirmiştir. Yapmış olduğu bu çalışma kapsamında CPT verilerini göz önüne alarak oluşturduğu idealize edilmiş zemin modelinde $D_r = 50$ için doymuş birim hacim ağırlık (γ_{sat}) değerini 19 kN/m^3 , efektif içsel sürtünme açısı (ϕ') değerini 34° olarak ele almıştır. Dolayısıyla, bu çalışmada kullanılan veriler literatürde kullanılan verilerle uyumluluk içerisinde.

4.5. Deniz Saha Planlaması

Bir önceki bölümde deniz saha planlamasından detaylıca bahsedilmişti. Bu bölümde deniz saha planlaması için nitel özelliklerden daha çok nicel özelliklere dayalı değerlendirme yapılacaktır. Bu değerlendirmede yöntem olarak ÇKKV (Çok Kriterli Karar Verme) yöntemi kullanılacaktır. ÇKKV yöntemleri, birden fazla kıstasın ve alternatifin değerlendirildiği durumlarda karar verme sürecine yardımcı olmak için kullanılan analitik yöntemlerdir. Bu yöntemler, karar vericilerin farklı, bazen çelişen kriterler arasından optimal çözümü veya en uygun alternatifi seçmelerine olanak tanır. ÇKKV yöntemleri, özellikle çok faktörlü ve

karmaşık kararlar alınması gereken alanlarda yaygın olarak kullanılır. ÇKKV yönteminde kullanılacak matris için kullanılacak ana kriterler şu şekilde önerilmiştir.

1. Açık deniz saha planlaması ve kullanımı kriterleri
2. Çevresel etki kriterleri
3. Ekolojik – biyolojik çeşitlilik kriterleri

Buradaki tüm bu kriterler farklı katsayılarla deniz saha planlamasının tümü için kullanılacak olsa da kendi içinde alt kriterlerinin 100 tam puan üzerinden değerlendirilmesi yapılmıştır. Örneğin, ilk kriter olan açık deniz saha planlaması ve kullanımı kriterlerinin alt kriterlerinin toplam ağırlık puanı 100 iken, diğer kriterler üzerindeki baskın etkisinden dolayı ÇKKV matrisinde 500 puan olarak işleme katılmaktadır. Çevresel etki kriterleri 300, ekolojik – biyolojik çeşitlilik kriterleri ise toplamda 200 puan ağırlığında değerlendirilmektedir. Böylece ÇKKV matrisindeki değer 1000 tam puan üzerinden ele alınmaktadır.

ÇKKV matrisindeki alt kriterler ve puanları daha önce BKAY çalışmalarından elde edilen deneyimleriyle Prof. Dr. Can Elmar BALAS tarafından belirlenmiştir. Daha önce Biçer Aymergen (2023) tarafından yapılan ve Prof. Dr. Can Elmar BALAS 'ın danışman olduğu tez çalışmasında BKAY için ÇKKV matrisi oluşturulurken alt kriter puanlamaları, Şehir Bölge Planlama bilim dalından uygulamacı 5 uzman, Gazi Üniversitesi Çevre Mühendisliği bilim dalından 2 uzman, İnşaat Mühendisliği Bölümü Deniz ve Kıyı Mühendisliği bilim dalından 4 uzman, Biyoloji Eğitimi bilim dalından 1 uzman olmak üzere toplam 12 uzmanın disiplinler arası çalışması sonucu elde edilmiştir.

Karar analizi yöntemlerine Monte Carlo Simülasyonu (MCS), Bayes karar Teorisi ve karar ağaçları gibi yöntemler örnek verilebilir. Bunlar belirsiz bir ortamda karar verme imkânı sunar (Biçer Aymergen, 2023; Balas ve diğ., 2024). Bu çalışmada kullanılan, Monte Carlo Simülasyonu, bir dizi sonucun gerçekleşme olasılığını elde etmek için tekrarlanan rastgele örnekleme kullanan bir hesaplama algoritması türüdür. Monte Carlo yöntemi veya çoklu olasılık simülasyonu olarak da bilinen Monte Carlo Simülasyonu, belirsiz bir olayın olası sonuçlarını tahmin etmek için kullanılan matematiksel bir tekniktir. Monte Carlo yöntemi, John von Neumann ve Stanislaw Ulam tarafından 2. Dünya Savaşı sırasında belirsiz koşullar altında karar verme süreçlerini iyileştirmek amacıyla icat edilmiştir. Şansa dayalı bir yaklaşım olduğu için, tıpkı rulet gibi, simülasyon yöntemine Monaco'daki ünlü bir

kumarhane kasabasından esinlenerek bu isim verilmiştir. Sabit girdilerle yapılan tahmin modellere kıyasla, hassasiyet analizi yapabilme veya girdilerin korelasyonunu hesaplayabilme gibi birçok avantaj sağlar. Hassasiyet analizi, karar vericilerin belirli girdilerin bir sonuca olan etkisini görmesini sağlarken, korelasyon analizi, girdiler arasındaki ilişkileri anlamalarına yardımcı olur (URL – 20). Monte Carlo yöntemini kullanan farklı yazılımlar bulunmaktadır. Bu çalışmada hem kolay kullanımı hem de EXCEL ortamında güvenle çalışabildiğinden Oracle firmasının Crystal Ball eklentisi kullanılmıştır. Oracle Crystal Ball, risk ölçümü ve raporlaması, Monte Carlo simülasyonu, zaman serisi tahminleri ve optimizasyon için bir elektronik tabanlı uygulamadır. Crystal Ball, belirsizliği modellemenin gerçekçi ve erişilebilir bir yolunu sunarak riskleri ölçmeye ve raporlamaya olanak tanır (URL – 21). MCS analizinde her bir alt kriter, uygunluk puanı ortalama değeri olacak şekilde normal dağılımla temsil edilecek ve de doğal olarak çıktılar belli bir dağılıma özel olarak elde edilerek her bir alt kriterin deniz saha planlamasındaki etkisi elde edilecektir. Ana kriterler ve buna bağlı alt kriterler bundan sonraki kısımlarda detaylıca ele alınacaktır.

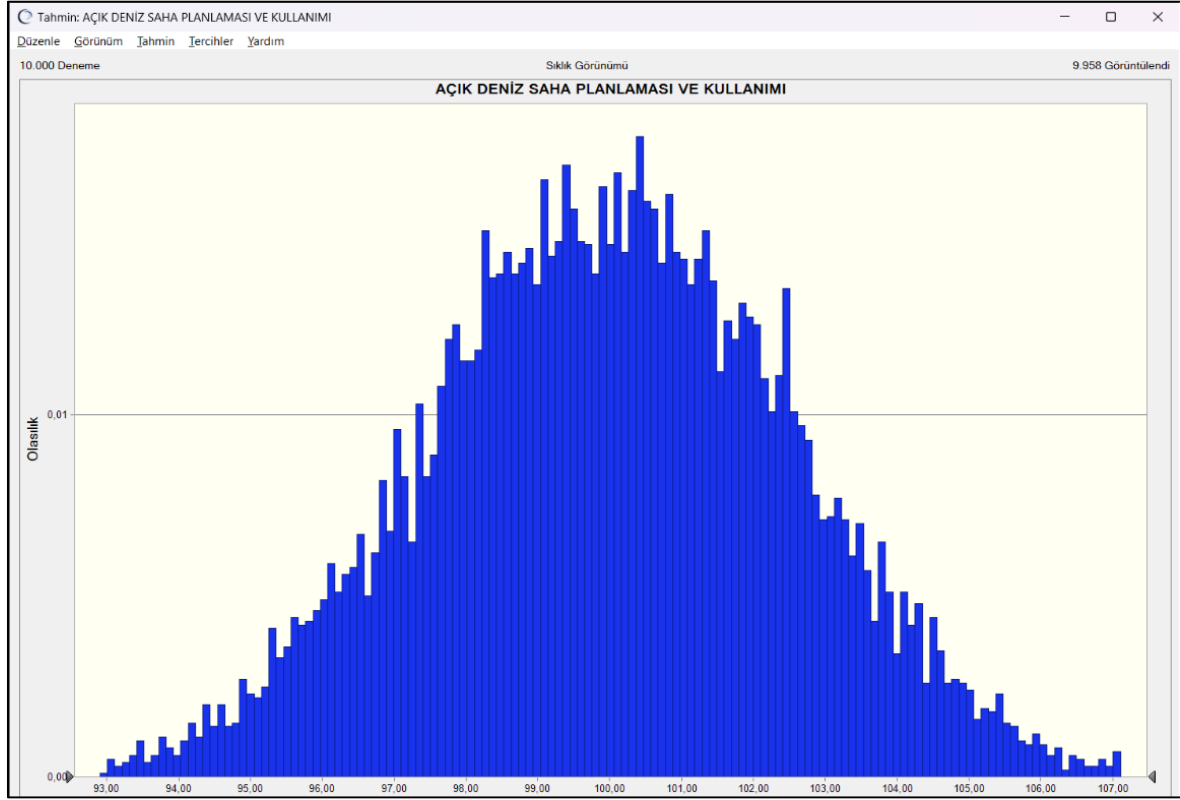
Açık deniz saha planlaması ve kullanımı alt kriterleri

Açık deniz saha planlaması ve kullanımının alt kriterleri önem derecesine bağlı olarak puanlandırılmıştır. Planlamayı ve kullanmayı olumlu yönde etkileyecek alt kriterler yüksek puanla temsil edilirken, olumsuz yönde etkileyecek alt kriterler daha düşük puanlarla değerlendirmeye alınmıştır. Bu kriter kendi içerisinde ağırlık puanı olarak toplam 100 puan mevcutken tüm deniz saha planlamasında 500 puan olarak dikkate alınmaktadır. Alt kriterlerin her biri Deniz saha planlaması ve kullanımı ana kriterinin altındaki alt kriterler ve bunların ağırlık puanları Çizelge 4.9’da verilmiştir.

Çizelge 4.9. Açık deniz saha planlaması ve kullanımı alt kriterler puanlaması

Ana Kriter	Alt Kriterler	Ağırlık Puanı	Parametre	Uygunluk Puanı
Deniz Saha Planlaması ve Kullanımı (500 Puan)	Açık Deniz Balıkçılığı Ve Su Ürünleri Yetiştiriciliği	3	Yok	0
			Var	3
	Kıta Sahanlığı Ve Kullanım Potansiyeli	7	Yok	0
			Var	7
	Deniz Ulaşımı Ve Limanlar	6	Yok	0
			Var	6
	Açık Deniz Doğalgaz Ve Petrol Sondajları	7	Yok	0
			Var	7
	Açık Deniz Yeşil/Mavi Enerji Olanakları	7	Yok	7
			Var	0
	Askeri Alanlar	4	Yok	4
			Var	0
	Açık Deniz Boru Ve Enerji Hatları	5	Yok	5
			Var	0
	Kruvaziyer Turizmi	6	Yok	0
			Var	6
	Kıta Sahanlığı Problemleri	9	Yok	9
			Var	0
	Mavi Ekonomi Alanları	9	Yok	0
			Var	9
	Bilimsel Araştırma Ve Lisans Alanları	3	Yok	0
			Var	3
	Açık Deniz Rüzgar Türbinleri Potansiyeli	1	İhtiyaç Varsa	1
			İhtiyaç Yoksa	0
	Açık Deniz Dalga Ve İklimsel Özellikler	7	Olumlu	7
			Olumsuz	0
	Açık Deniz Akıntı İklimi Ve Çevrinti	6	Olumlu	6
			Olumsuz	0
	Açık Deniz Jeomorfolojisi	5	Uygun	5
			Uygun Değil	0
	Açık Deniz Topografyası Ve Oşinografi	5	Uygun	5
			Uygun Değil	0
	İklim Değişikliği Ve Deniz Seviyesi Yükselmesi Riski	5	Var	0
			Yok	5
	Açık Deniz Saha Koşulları, Tsunami Ve Depremsellik	5	Uygun	5
			Uygun Değil	0

MCS ve hassasiyet grafiklerini kullanarak, açık deniz saha planlamasının ve kullanımındaki her bir kriterin etkisi, toplam puan ile ana kriterler arasındaki ilişki ve belirsizlik aralıklarındaki dağılımları saçılım grafiklerini kullanarak elde edilmiştir (Şekil 4.25).



Şekil 4.25. Açık deniz saha planlaması ve kullanımı puanının MCS benzeşimi sonucunda elde edilen histogram

Şekil 4.25’den de görüleceği üzere açık deniz saha planlamasında puanların ortalaması 100, standart sapması ise 2,5’tir. Söz konusu bu histogramı elde edebilmek için Crystal Ball ortamında 10000 tekrar edilen benzeşim kullanılmıştır. Açık deniz saha planlaması ve kullanımı alt kriterlerinin kendi içerisindeki ve toplam deniz saha planlamasına etki değerleri Çizelge 4.10’da verilmiştir.

Çizelge 4.10. Açık deniz saha planlaması ve kullanıma etkisi kriterlerinin MCS'den elde edilen deniz saha planlamasına etkileri ve öngörülen puanları

Alt Kriterler	Açık Deniz Saha Planlaması Ve Kullanıma Etkisi	Deniz Saha Planlamasına Etkisi	Puan
Mavi Ekonomi Alanları	0,35	0,19	9
Kıta Sahanalığı Problemleri	0,34	0,17	9
Açık Deniz Yeşil/Mavi Enerji Olanakları	0,27	0,15	7
Açık Deniz Dalga Ve İklimsel Özellikler	0,26	0,14	7
Kıta Sahanalığı Ve Kullanım Potansiyeli	0,26	0,13	7
Açık Deniz Doğalgaz Ve Petrol Sondajları	0,26	0,16	7
Açık Deniz Akıntı İklimi Ve Çevrinti	0,24	0,13	6
Deniz Ulaşımı Ve Limanlar	0,23	0,12	6
Kruvaziyer Turizmi	0,22	0,14	6
Açık Deniz Boru Ve Enerji Hatları	0,21	0,13	5
Açık Deniz Topografyası Ve Oşinografi	0,20	0,11	5
Açık Deniz Saha Koşulları, Tsunami Ve Depremsellik	0,21	0,11	5
Açık Deniz Jeomorfolojisi	0,19	0,10	5
İklim Değişikliği Ve Deniz Seviyesi Yükselme Riski	0,18	0,10	5
Askeri Alanlar	0,14	0,08	4
Açık Deniz Balıkçılığı Ve Su Ürünleri Yetiştiriciliği	0,12	0,06	3
Bilimsel Araştırma Ve Lisans Alanları	0,11	0,07	3
Açık Deniz Rüzgar Türbinleri Potansiyeli	0,04	0,02	1

Çizelge 4.10'dan da görülmektedir ki, açık deniz saha planlaması ve kullanma etkisi bakımından açısından en önemli kriterler, mavi ekonomi alanları ve kıta sahanlığı ve kullanım potansiyelidir.

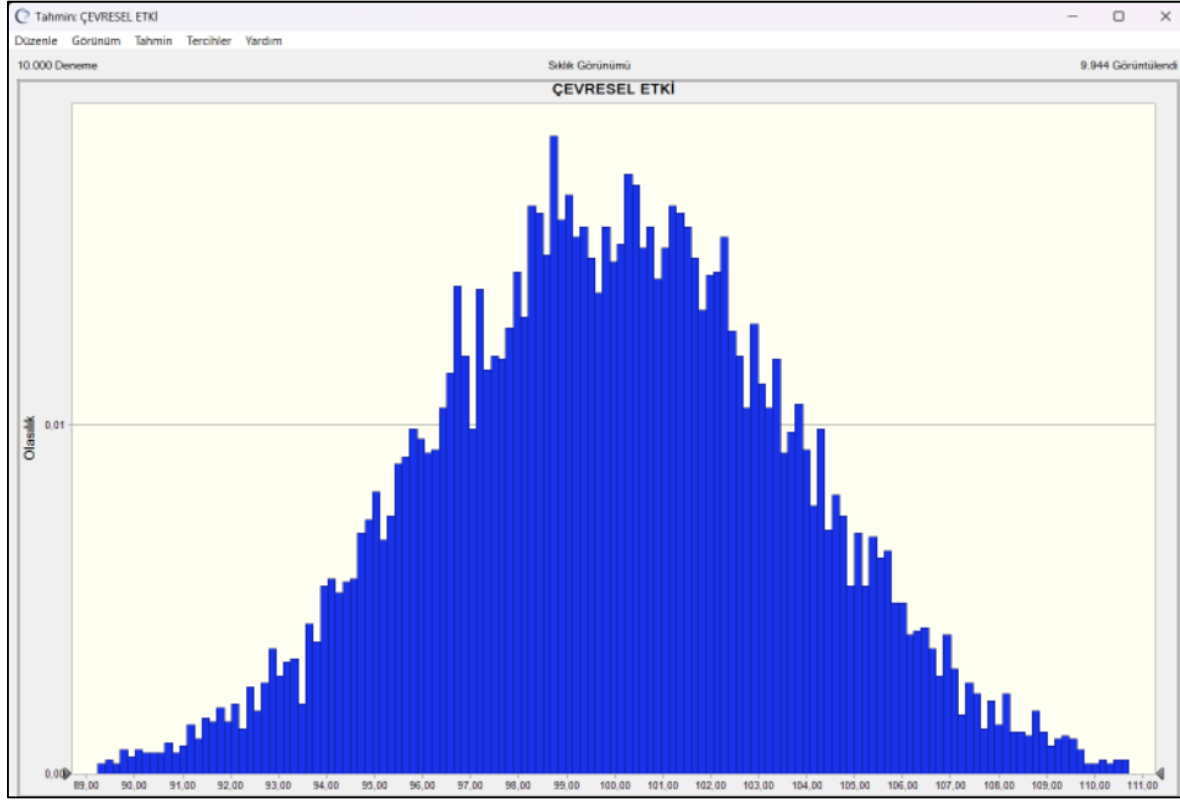
Çevresel etki alt kriterleri

Çevresel etki alt kriterleri önem derecesine bağlı olarak puanlandırılmıştır. Planlamayı ve kullanmayı olumlu yönde etkileyecek alt kriterler yüksek puanla temsil edilirken, olumsuz yönde etkileyecek alt kriterler daha düşük puanlarla değerlendirmeye alınmıştır. Bu kriter kendi içerisinde ağırlık puanı olarak toplam 100 puan mevcutken tüm deniz saha planlamasında 300 puan olarak dikkate alınmaktadır. Çevresel etki ana kriterinin altındaki alt kriterler ve bunların ağırlık puanları Çizelge 4.11'de verilmiştir.

Çizelge 4.11. Çevresel etki alt kriterler puanlaması

Ana Kriter	Alt Kriterler	Ağırlık Puanı	Parametre	Uygunluk Puanı
Çevresel Etki (300 Puan)	Açık Deniz Faaliyetleri Kaynaklı Kirlilik	22	Az Hassas Alanlar	22
			Hassas Alanlar	1
	Açık Deniz Sondajlar Ve Kaza Kaynaklı Kirleticiler	14	Az Hassas Alanlar	14
			Hassas Alanlar	1
	Endüstriyel Kaynaklı Kirlilik	14	Sanayi Tesisi Var	14
			Sanayi Tesisi Yok	1
	Biyolojik Durum Sınıfı	18	Varsa	18
			Yoksa	1
	Ekolojik Durum Sınıfı	9	Ekolojik Durum Sınıfı Zayıfsa	9
			Ekolojik Durum Sınıfı Ortaysa	1
	Su Kalitesi Ve Kirleticiler	9	Maximum Koliform 1000 Üzeri	9
			Maximum Koliform 1000 Altı	1
	Çevresel Riskler	9	Taşkın Riski Var	9
			Taşkın Riski Yok	1
	Gemi Kaynaklı Kirleticiler	5	Yüksek (1.Grup)	5
			Orta (2.Grup)	3
			Düşük	1

MCS ve hassasiyet grafiklerini kullanarak, çevresel etkideki her bir kriterin etkisi, toplam puan ile ana kriterler arasındaki ilişki ve belirsizlik aralıklarındaki dağılımları saçılım grafiklerini kullanarak elde edilmiştir (Şekil 4.26).



Şekil 4.26. Çevresel etki puanının MCS benzeşimi sonucunda elde edilen histogram

Şekil 4.26'dan da görüleceği üzere çevresel etkide puanların ortalaması 100, standart sapması ise 3,85'tir. Söz konusu bu histogramı elde edebilmek için Crystal Ball ortamında 10000 tekrar edilen benzeşim kullanılmıştır. Çevresel etki alt kriterlerinin kendi içerisindeki ve toplam deniz saha planlamasına etki değerleri Çizelge 4.12'de verilmiştir.

Çizelge 4.12. Çevresel etki kriterlerinin MCS'den elde edilen deniz saha planlamasına etkileri ve öngörülen puanları

Alt Kriterler	Çevresel Etkiye Etkisi	Deniz Saha Planlamasına Etkisi	Puan
Açık Deniz Faaliyetleri Kaynaklı Kirlilik	0,56	0,29	22
Biyolojik Durum Sınıfı	0,45	0,23	18
Endüstriyel Kaynaklı Kirlilik	0,36	0,19	14
Açık Deniz Sondajlar Ve Kaza Kaynaklı Kirleticiler	0,35	0,18	14
Ekolojik Durum Sınıfı	0,23	0,11	9
Çevresel Riskler	0,22	0,10	9
Su Kalitesi Ve Kirleticiler	0,21	0,10	9
Gemi Kaynaklı Kirleticiler	0,13	0,06	5

Çizelge 4.12'den de görülmektedir ki, çevresel etki bakımından açısından en önemli kriterler, açık deniz faaliyetleri kaynakları kirlilik ve biyolojik durum sınıfıdır.

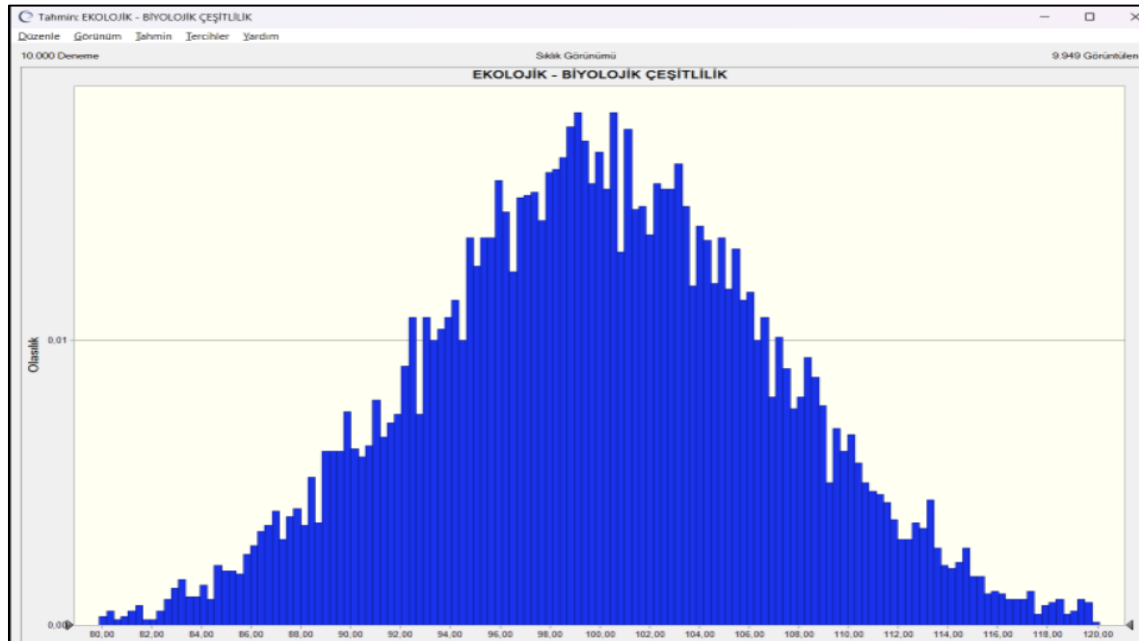
Ekolojik – biyolojik çeşitlilik alt kriterleri

Ekolojik – biyolojik çeşitliliğin alt kriterleri önem derecesine bağlı olarak puanlandırılmıştır. Planlamayı ve kullanmayı olumlu yönde etkileyecek alt kriterler yüksek puanla temsil edilirken, olumsuz yönde etkileyecek alt kriterler daha düşük puanlarla değerlendirmeye alınmıştır. Bu kriter kendi içerisinde ağırlık puanı olarak toplam 100 puan mevcutken tüm deniz saha planlamasında 200 puan olarak dikkate alınmaktadır. Ekolojik – biyolojik çeşitlilik ana kriterinin altındaki alt kriterler ve bunların ağırlık puanları Çizelge 4.13'de verilmiştir.

Çizelge 4.13. Ekolojik – biyolojik çeşitlilik alt kriterler puanlaması

Ana Kriter	Alt Kriterler	Ağırlık Puanı	Parametre	Uygunluk Puanı
Ekolojik – Biyolojik Çeşitlilik (200 Puan)	Biyoeekolojik Değerlendirme (Endemik, Nesli Tehlike Altında Olan Vb.)	60	Nesli Tehlike Altında Olan Ya Da Endemik Tür Yoksa	60
			Nesli Tehlike Altında Olan Ya Da Endemik Tür Varsa	1
	Sucul Ekosistem (Flora, Fauna)	40	Biyolojik Çeşitlilik Yoksa	40
			Biyolojik Çeşitlilik Orta	20
			Biyolojik Çeşitlilik Varsa	1

MCS ve hassasiyet grafiklerini kullanarak, ekolojik – biyolojik çeşitlilikteki her bir kriterin etkisi, toplam puan ile ana kriterler arasındaki ilişki ve belirsizlik aralıklarındaki dağılımları saçılım grafiklerini kullanarak elde edilmiştir (Şekil 4.27).



Şekil 4.27. Ekolojik – biyolojik çeşitlilik puanının MCS benzeşimi sonucunda elde edilen histogram

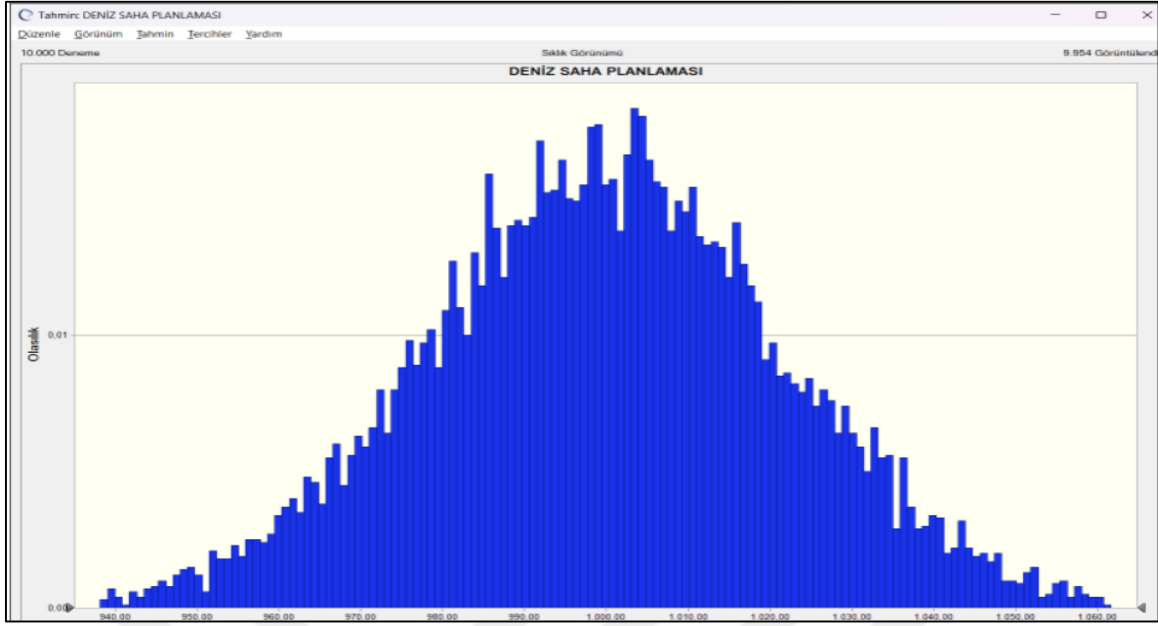
Şekil 4.27’ten de görüleceği üzere ekolojik – biyolojik çeşitlilikte puanların ortalaması 100 standart sapması ise 7,24’tür. Söz konusu bu histogramı elde edebilmek için Crystal Ball ortamında 10000 tekrar edilen benzeşim kullanılmıştır. Ekolojik – biyolojik çeşitlilik alt kriterlerinin kendi içerisindeki ve toplam deniz saha planlamasına etki değerleri Çizelge 4.14’de verilmiştir.

Çizelge 4.14. Ekolojik – biyolojik çeşitlilik kriterlerinin MCS’den elde edilen deniz saha planlamasına etkileri ve öngörülen puanları

Alt Kriterler	Ekolojik – Biyolojik Çeşitliliğe Etkisi	Deniz Saha Planlamasına Etkisi	Puan
Biyokolojik Değerlendirme (Endemik, Nesli Tehlike Altında Olan Vb.)	0,82	0,52	60
Sucul Ekosistem (Flora, Fauna)	0,54	0,34	40

Çizelge 4.14’den da görülmektedir ki, çevresel etki bakımından açısından en önemli kriter biyokolojik değerlendirmedir. Buradan çıkarılacak sonuçlardan en önemlisi ise DSP ile BKAY’ın daha önce de belirtildiği üzere prensip olarak da ortak bir plan olmasıdır. Ekolojik – biyolojik çeşitlilik kriterleri Çizelge 4.14’ten de görüleceği üzere deniz saha planlaması üzerinde en büyük etkiye sahiptir. Bu durum BKAY’ın ekosistem temelli tanımıyla uyumaktadır. Dolayısıyla BKAY ile DSP’nin birbirleriyle bağlantılı ve bir arada yürütülmesi gereken sonuçlar olduğu bu çalışma kapsamında da gözlenmektedir.

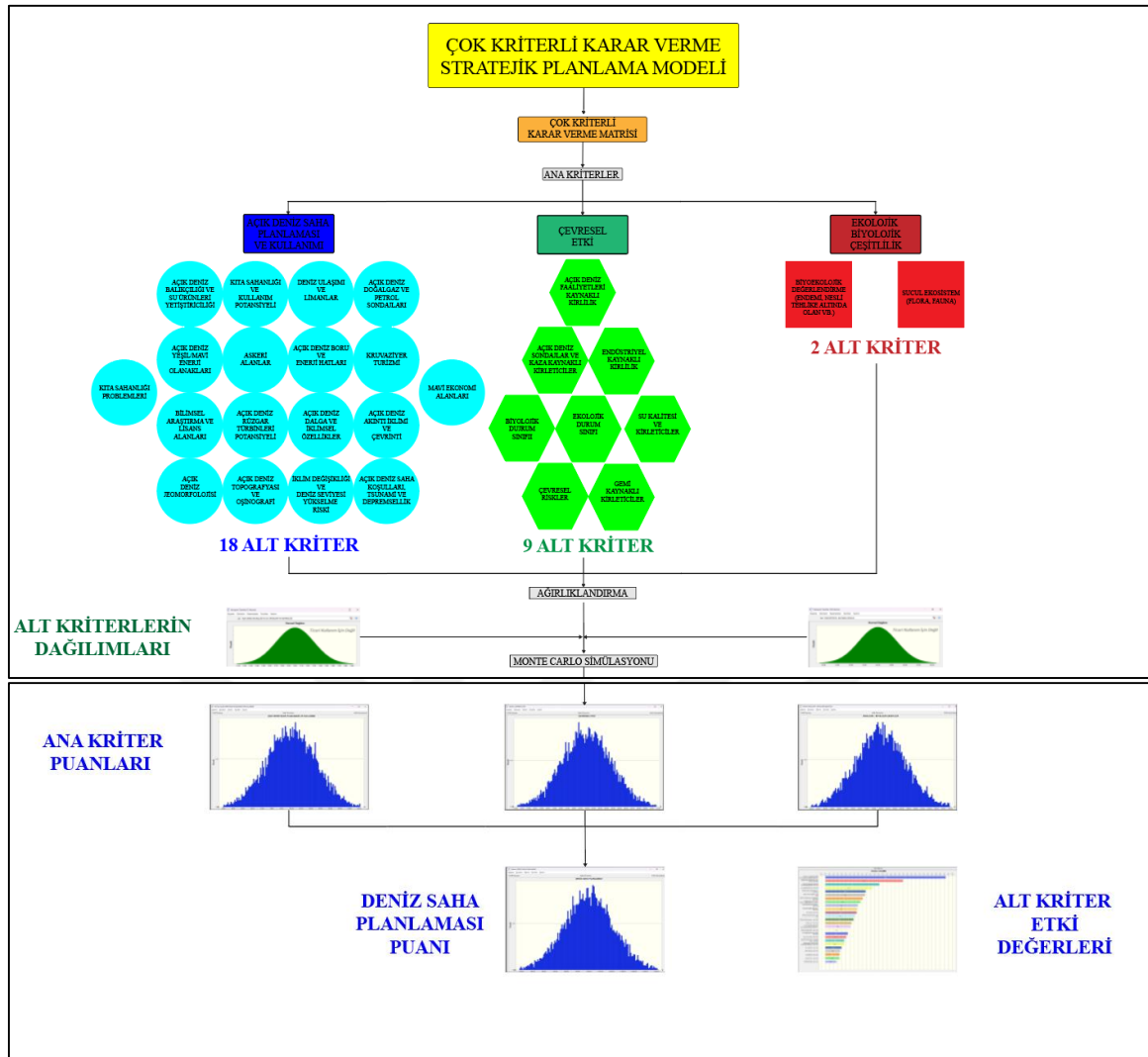
MCS ve hassasiyet grafiklerini kullanarak, toplam deniz saha planlaması için her bir kriterin etkisi, toplam puan ile ana kriterler arasındaki ilişki ve belirsizlik aralıklarındaki dağılımları saçılım grafiklerini kullanarak elde edilmiştir (Şekil 4.28).



Şekil 4.28. Deniz saha planlaması puanının MCS benzeşimi sonucunda elde edilen histogram

Şekil 4.28'ten de görüleceği üzere deniz saha planlamasında puanların ortalaması 1000'dir. Söz konusu bu histogramı elde edebilmek için Crystal Ball ortamında 10000 tekrar edilen benzeşim kullanılmıştır.

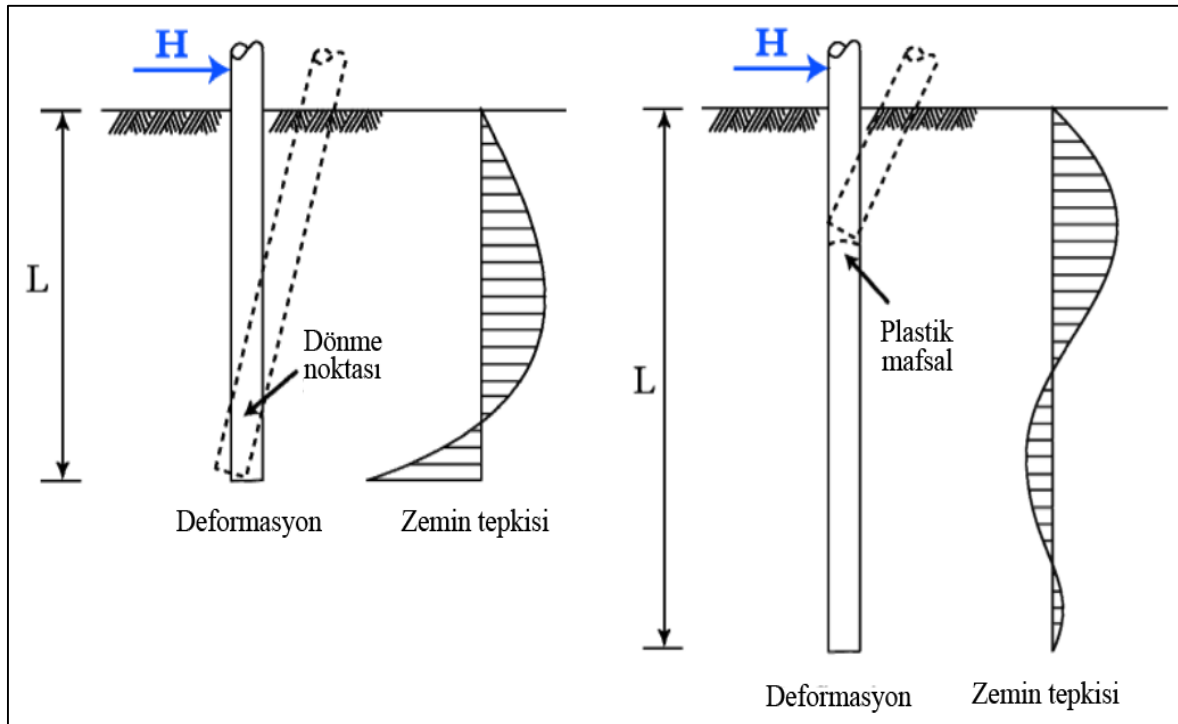
Tez kapsamında geliştirilen çok kriterli karar verme stratejik planlama modelinin akış şeması Şekil 4.29'da verilmiştir.



Şekil 4.29. Çok kriterli karar verme stratejik planlama modeli

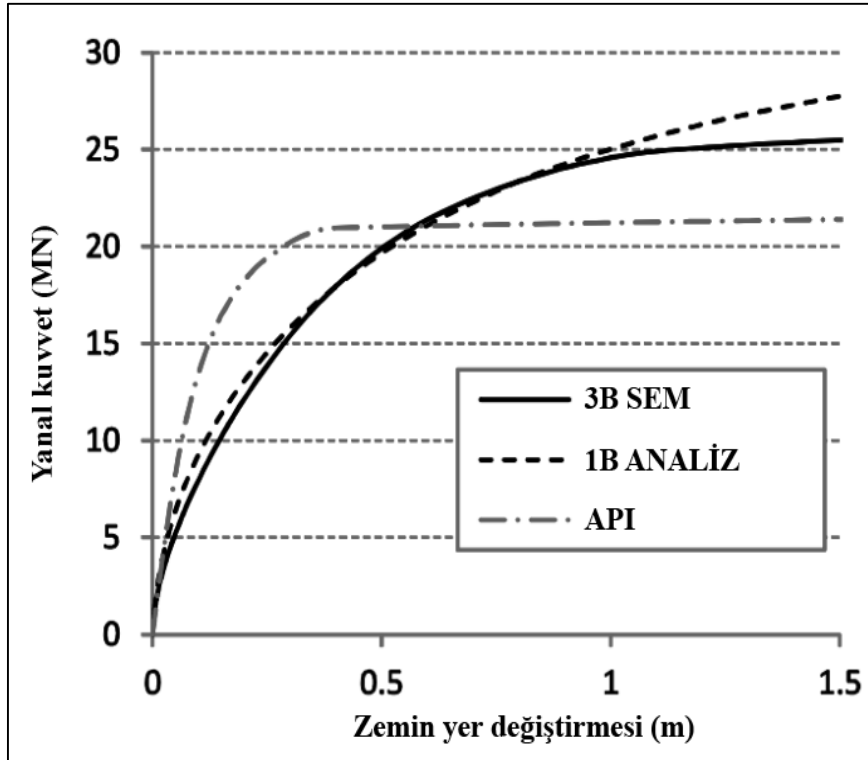
5. KOMBİNE ADRES TASARIMI: DEFORMASYON ANALİZİ

Kazıklar uzunluklarının çaplarına oranına, L/D , ve zemin rijitliğine göre uzun veya kısa kazık olarak sınıflandırılmaktadır. Kısa bir kazık rijit bir kütle gibi davranarak yatay yükün etkisi altında bütün bir şekilde döner. Kazığın ucuna aktarılan yük kazık başında etkiyen yükün önemli bir bölümüne eşdeğerdir (Cuellar, 2011). Uzun bir kazıkta ise belirli bir derinliğin altında kazık uzunluğu yatay yükler altında önemini kaybetmektedir (Şekil 5.1).

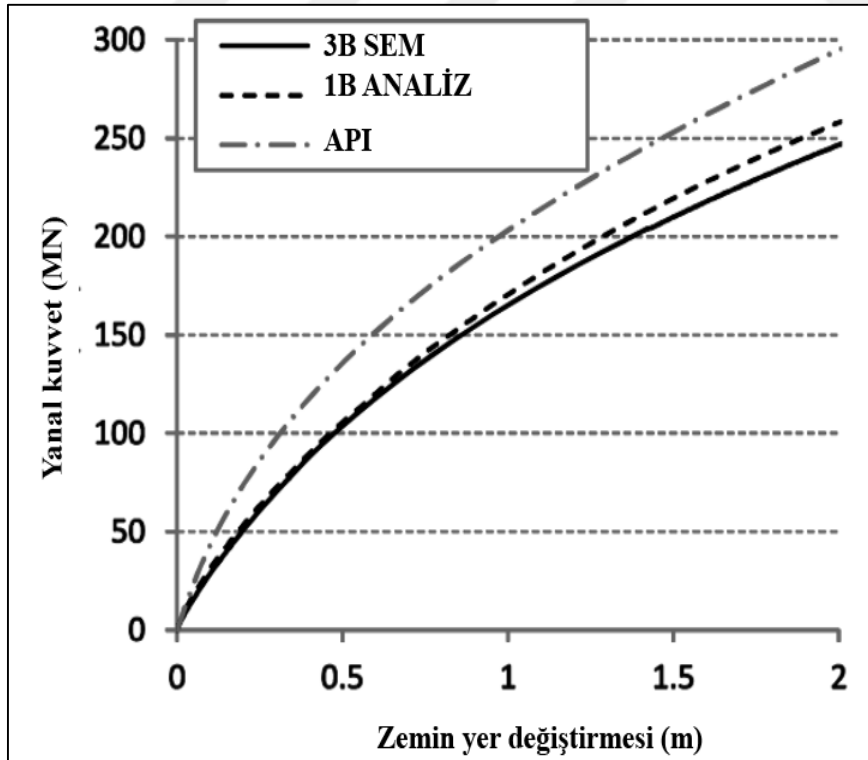


Şekil 5.1. Broms (1964)'e göre serbest başlıklı yanal yüklü kazıkta yenilme modları, solda kısa kazık ve serbest cisim dönmesi, sağda uzun kazık ve plastik mafsall oluşumu (Cuellar, 2011)

Şekil 5.1'den de görüleceği üzere, yenilme durumunda, kısa kazıklarda belirli bir dönme noktasından itibaren kazık dönmeye başlarken, uzun kazıklarda bu dönme plastik mafsall oluşumuyla meydana gelmektedir. Uzun kazık ve kısa kazık arasındaki bu davranış farkı aynı zamanda deformasyon analizi için kullanılan yöntemlerde farklılıkları da beraberinde getirmektedir. Bryne ve diğ. (2015) kısa kazık olarak tanımlanan küçük L/D oranlarında API (2014) tarafından önerilen $p - y$ eğrilerinin deformasyon ve dönmeyi iyi tahmin edemediğini vurgulamışlardır. (Şekil 5.2 – Şekil 5.3).

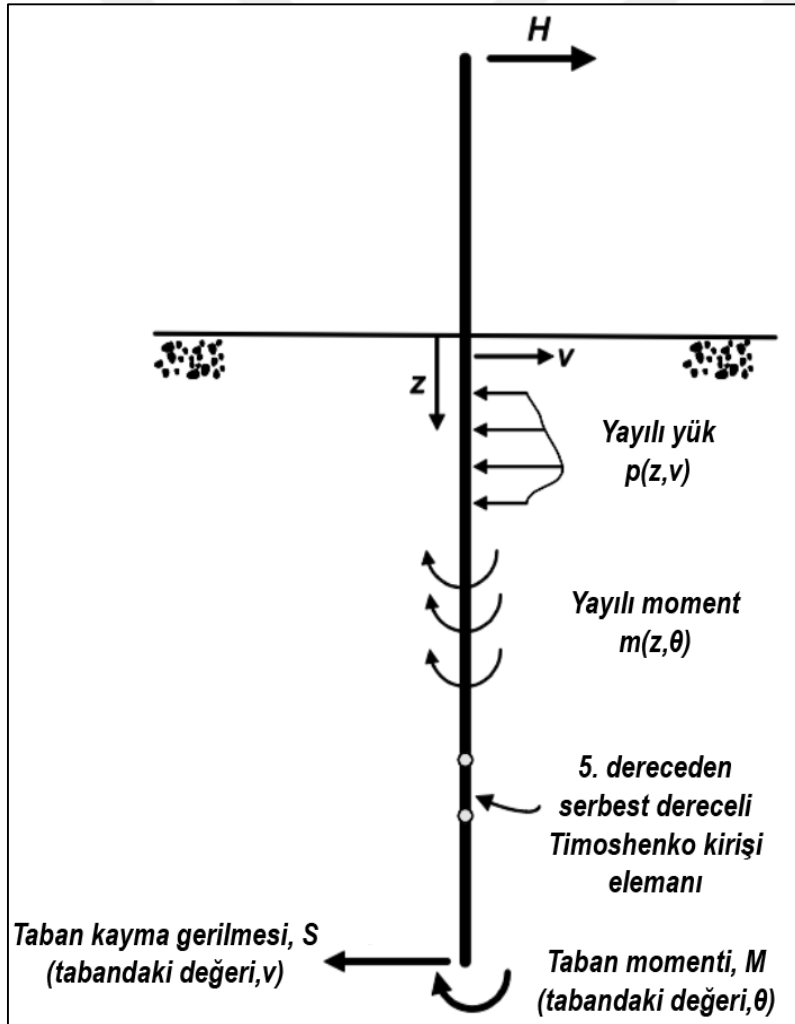


Şekil 5.2. Kum zemin ortamında kısa kazıklar için kazık davranışı farklılıkları (Bryne ve diğ., 2015)



Şekil 5.3. Kum zemin ortamında uzun kazıklar için kazık davranışı farklılıkları (Bryne ve diğ., 2015)

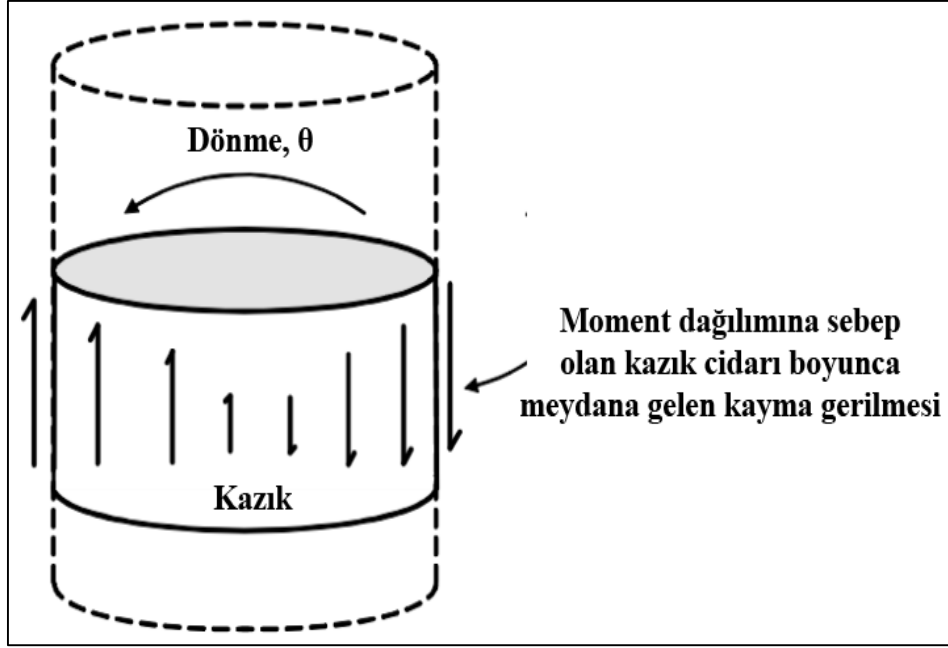
Şekil 5.2 ve Şekil 5.3'ten görüleceği üzere kum zemin ortamında kısa kazıklar için yenilme $p - y$ eğrileri yönteminde daha erken olurken, 1 boyutlu ve 3 boyutlu analizde bu yenilme daha büyük kuvvetlerde meydana gelmektedir. Bu trend uzun kazıklar içinse söz konusu bu durumun tersi şeklinde gerçekleşmektedir. Uzun kazıklarda davranış her üç yöntem için birbirine benzerlik gösterse de kısa kazık durumunda $p - y$ eğrileri ile tasarımda kazık davranışları diğer tasarım yöntemlerden büyük farklılıklar göstermektedir. Bryne ve diğ. (2015) bunun sebebi olarak $p - y$ eğrilerinin tüm zemin reaksiyonlarını doğru bir biçimde ele alamadığı gerçeğini belirtmişlerdir. Buradan yola çıkarak Bryne ve diğ. (2015) geleneksel $p - y$ eğrilerinin mantığına benzer ama mekanizma olarak farklı dört tane zemin reaksiyonu tanımlamışlar ve 1 boyutlu bir model geliştirmişlerdir (Şekil 5.4).



Şekil 5.4. Önerilen 1 boyutlu sonlu model analiz yöntemi (Bryne ve diğ., 2015)

Şekil 5.4'te verilen 1 boyutlu model ve dört farklı zemin reaksiyonu aşağıdaki gibi tarif edilmiştir (Bryne ve diğ., 2015);

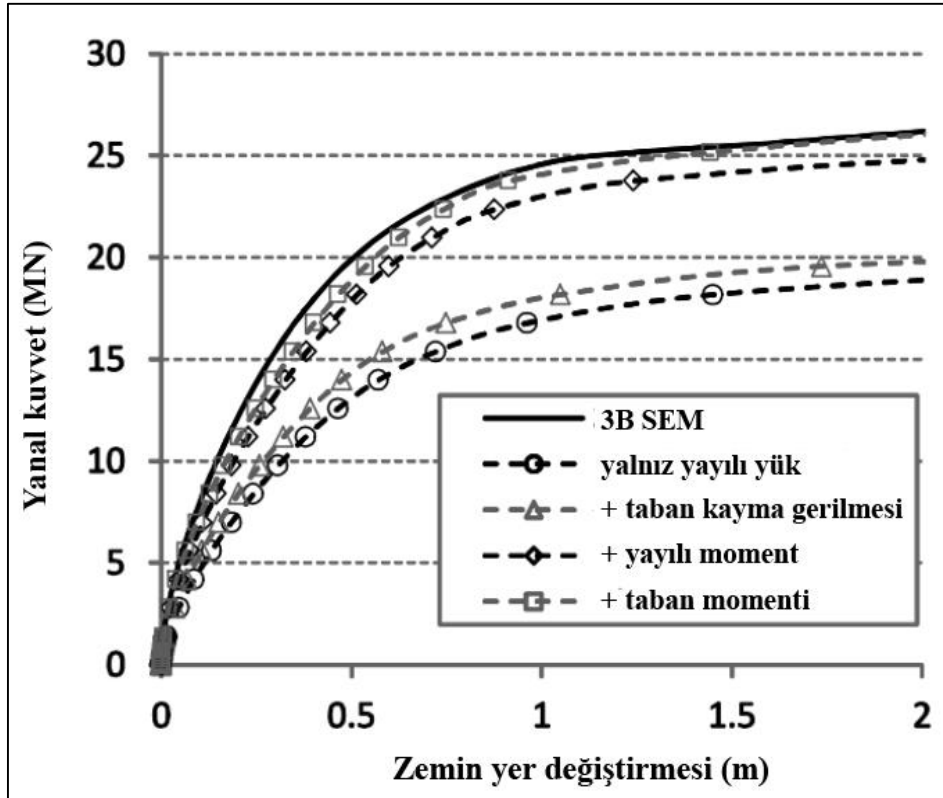
- Yayılı yük eğrisi, kazığa uygulanan yük ile kazık deplasmanı arasındaki bağlantıyı ifade etmektedir. Bu eğri aslında geleneksel $p - y$ eğrileriyle aynı işleve sahiptir.
- Yayılı moment eğrisi, kazığa uygulanan yayılı moment ile kazıktaki kesit dönmeleri arasında bağlantıyı ifade etmektedir. Buradaki yayılı moment kazık dış cidarı boyunca gerçekleşen düşey kayma gerilmelerinden meydana gelmektedir (Şekil 5.5).



Şekil 5.5. Kazık dış cidarındaki düşey kayma gerilmelerinin kesitlerde oluşturduğu yayılı moment (Bryne ve diğ., 2015)

- Taban kayma eğrisi, kazık tabanındaki kayma kuvveti ile kazık tabanının yer değiştirmesi arasındaki bağlantıyı ifade etmektedir.
- Taban moment eğrisi, kazık tabanındaki moment ile kazık tabanının dönmesi arasındaki ilişkiyi ortaya koymaktadır.

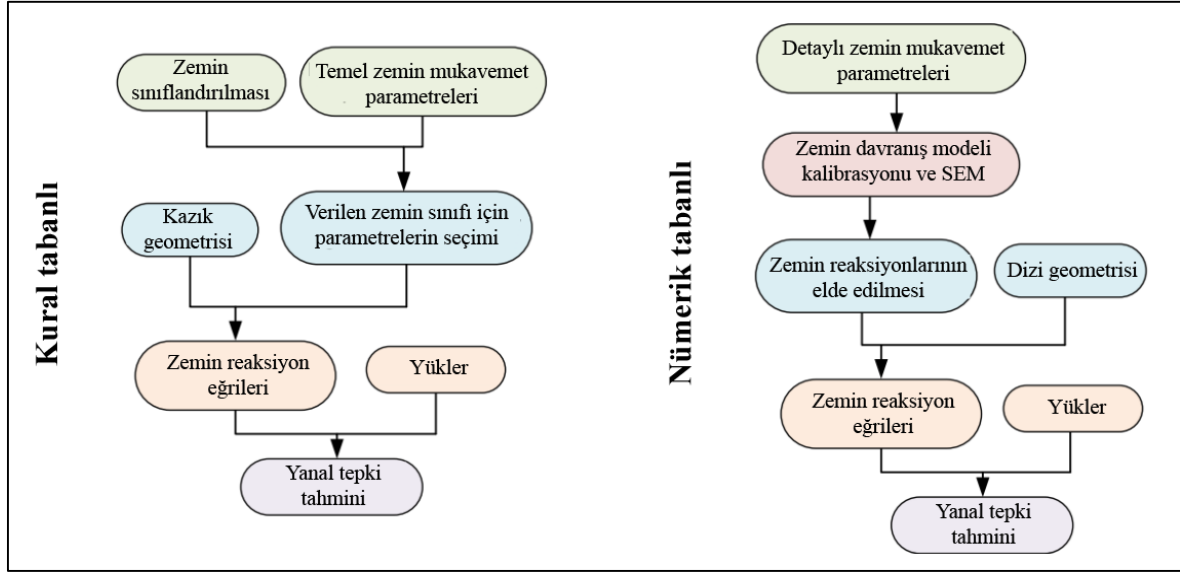
Her bir tepkinin münferit etkisi ise Şekil 5.6'daki gibi verilmiştir (Bryne ve diğ., 2015).



Şekil 5.6. Kum zeminde zemin reaksiyonlarının münferit ve kümülatif etkileri (Bryne ve diğ., 2015)

Şekil 5.6'dan da görüleceği üzere $p - y$ eğrilerine benzer olan sadece yayılı yük dikkate alındığında zemin yer değiştirmesi 3 boyutlu sonlu elemanlar modeliyle hesaplanandan daha az tahmin edilmektedir. Diğer zemin etkileri de dikkate alındığında ise yapılan tahminler 3 boyutlu sonlu elemanlar modelinden elde edilen tahminlere yakınsamaktadır.

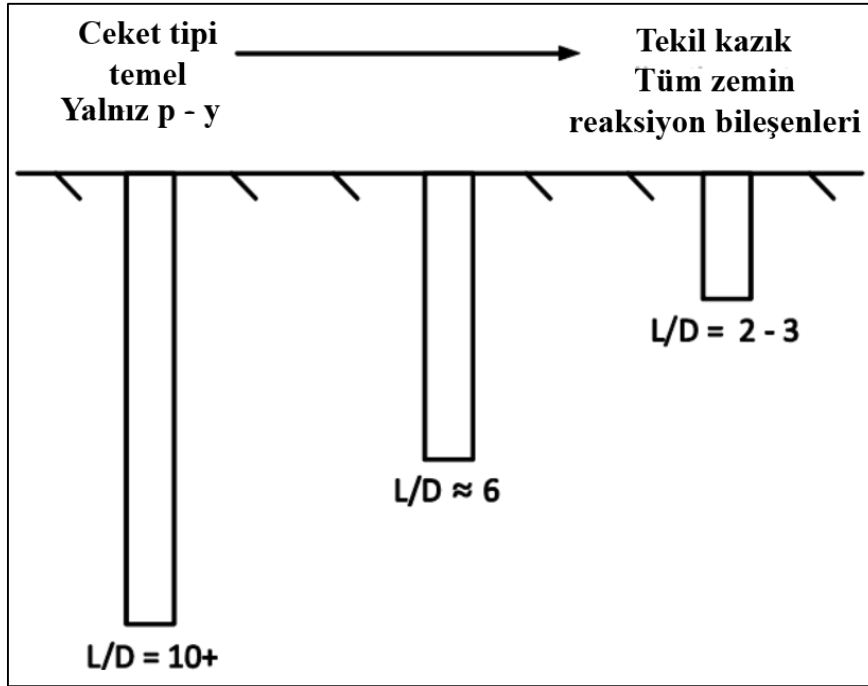
Geleneksel $p - y$ yaklaşımında, $p - y$ eğrisinin standart biçimi tasarım standartlarında verilmektedir (API, 2014). Söz konusu bu eğriler zemin parametrelerine ve koşullarına dayalı olarak belirlenerek matematiksel bir formda ifade edilir. Bryne ve diğ. (2015)'nin çalışmalarında ise yeni standart zemin reaksiyon eğrileri ortaya çıkacağından bunların elde edilmesi gerekmektedir. Bu yaklaşımda söz konusu bu eğrileri elde etmek için, belirli bir saha için sınırlı sayıda 3 boyutlu sonlu eleman modelleri geliştirilir. Zemin kazık arayüzünde gelişen gerilmeler sayısal sonuçlar olarak elde edilir ve bu yöntemle özgü zemin reaksiyon eğrilerini belirlemek için kullanılır. Bu eğriler daha sonra 1 boyutlu modelin detaylı analizinde işleme dahil edilir. 1 boyutlu yöntem için iki farklı tasarım yöntemi vardır. Bunlar, kural tabanlı tasarım (RBD – Rule Based Design) ve nümerik tabanlı tasarım (NBD – Numerical Based Design) olarak ikiye ayrılır (Şekil 5.7).



Şekil 5.7. 1 boyutlu tasarım yöntemini uygulamak için kullanılan iki farklı yöntem (Bryne ve diğ., 2019)

Şekil 5.7’den görüleceği üzere kural tabanlı analizde daha önce hem üzerinde saha deneyleri hem de laboratuvar deneyleri yapılmış olan Dunkirk ve Cowden bölgesindeki kum ve killer için analiz yapılmaktadır. Söz konusu bu zeminlerin hem tüm karakteristik özellikleri hem de yükleme karşısında vermiş oldukları reaksiyonlar belli olduğundan analizleri tek adımda yapılabilmektedir. Fakat bu zeminler dışında herhangi bir özel saha koşulu söz konusu olduğunda yukarıda belirtildiği üzere sınırlı sayıda 3 boyutlu sonlu eleman modelleri geliştirilip zemin reaksiyonları bu modellerden elde edilip 1 boyutlu çözümde kullanılır.

Özet olarak Bryne ve diğ. (2015) çalışmalarında uzun kazıklar için sadece $p - y$ eğrileri ile yapılan analizlerin davranışı daha iyi tahmin ettiğini belirtirlerken, kısa kazıklar için diğer zemin reaksiyonlarının da dikkate alınması gerektiğini vurgulamışlardır (Şekil 5.8).



Şekil 5.8. Tasarım metotlarının farklı L/D oranlarındaki uygulamaları (Bryne ve diğ., 2015)

Şekil 5.8’den de görüleceği üzere L/D oranları 2 – 3 seviyesindeyken, kısa kazık davranışı, tüm zemin reaksiyon bileşenleri dikkate alınırken, 10 ve üzerindeyken, uzun kazık davranışı, yalnızca p – y eğrileri için gerekli bileşenlerin dikkate alınması yeterli olmaktadır. Tüm bu anlatılanları göz önüne alan Bryne ve diğ., (2015) yapmış oldukları büyük çaplı projeleriyle, PISA (Pile Soil Analysis), büyük çaplı kazıkları saha deneylerinde yanal olarak yükleyerek yeni bir boyutlu tasarım yöntemi önermişler ve bu yöntemi doğrulamışlardır. Ayrıca Bryne ve diğ. (2015) geliştirdikleri bu bir boyutlu tasarımı PLAXIS 3D sonlu elemanlar analizi programına MoDeTo (Monopile Designer Tool – Tekil Kazık Tasarım Aracı) adında eklenti olarak eklemişlerdir.

Bu çalışmada, daha önce literatür kısmında da bahsedilen, dört farklı tasarım yöntemi kullanılmıştır. Bunlar:

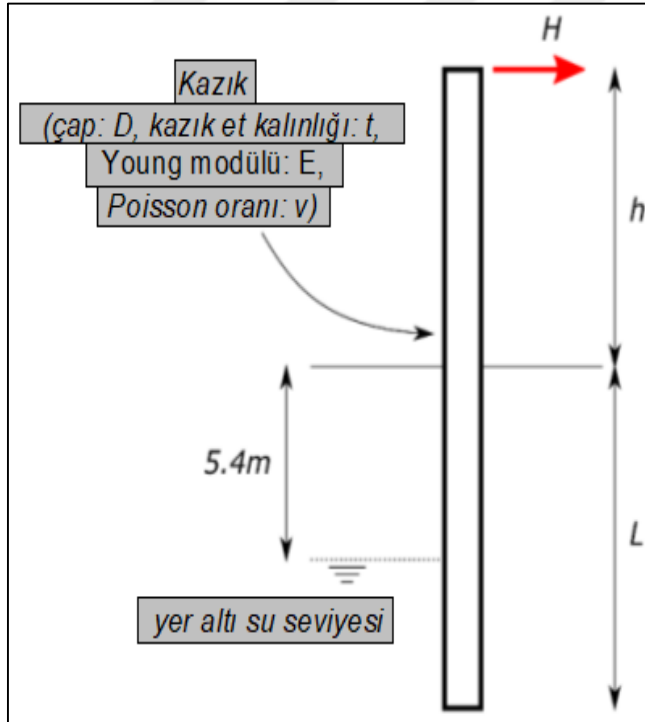
- Poulos ve Davis (1980)’in yaklaşımıyla bağlantılı üçlü yay yaklaşımı,
- API (2014) p-y eğrileri,
- Bryne ve diğ. (2015) tarafından önerilen bir boyutlu yöntem,
- PLAXIS 3B sonlu elemanlar yöntemi,

İlk olarak PLAXIS 3B sonlu elemanlar yönteminin PISA projesi kapsamındaki deneylerle doğrulaması gerçekleştirilecektir. Daha sonra ise yine bu kapsamda uzun kazık ve kısa kazık arasındaki davranış farklılıkları gösterilecektir.

5.1.3 Boyutlu Sonlu Elemanlar Programının Doğrulanması

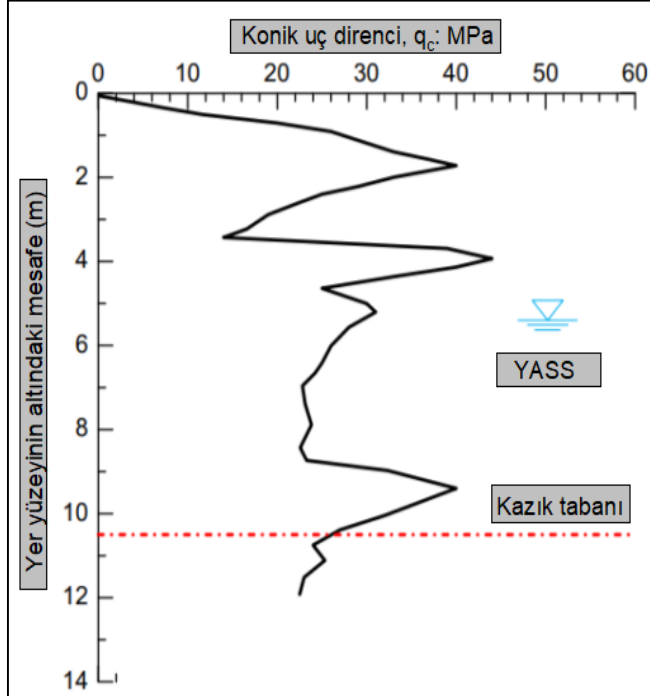
Bu çalışmada sonlu elemanlar programı olarak PLAXIS 3D kullanılmıştır. PLAXIS 3D, karmaşık zemin davranışlarının analizi için güçlü bir sonlu elemanlar yöntemi yazılımıdır. Mühendisler, geoteknik ve zemin mekaniği problemlerini çözmek için PLAXIS 3D'yi kullanarak zemin – yapı etkileşimlerini simüle edebilirler. Program, tünel kazıları, temel analizi, zemin iyileştirme çalışmaları gibi çeşitli mühendislik uygulamalarında kullanılmaktadır (URL – 22).

Bu kısımda Dunkirk sahasında kum ortamda yapılan deneylerin 3 boyutlu sonlu elemanlarla doğrulaması yapılacaktır. Dunkirk sahasında yeraltı su seviyesi Şekil 5.9'da verildiği gibi zemin kotundan 5,4 metre aşağıdadır (Minga ve Burd, 2019).

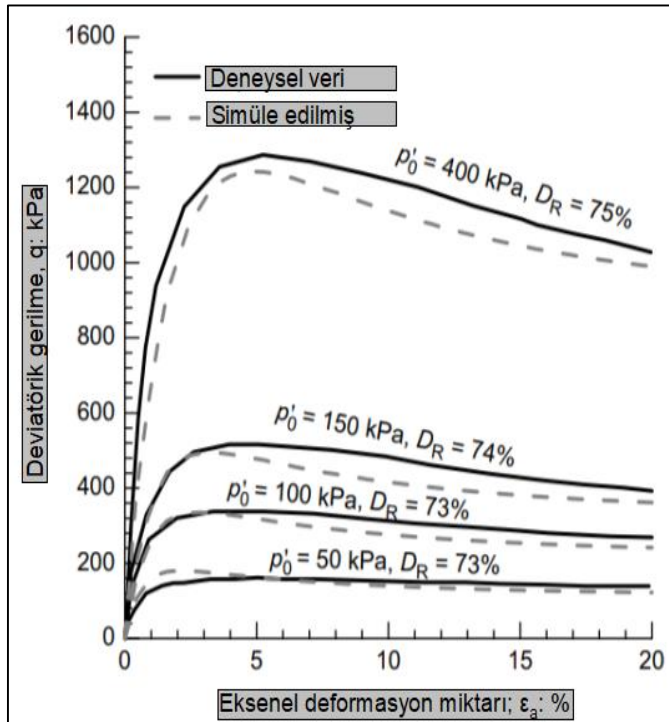


Şekil 5.9. PISA saha deneyleri için geometrik parametreler (Minga ve Burd, 2019)

Yapılan saha ve laboratuvar deneyleriyle elde edilen zemin profili ise Şekil 5.10 ve Şekil 5.11’de Zdravkovic ve diğ. (2020) tarafından verilmiştir.



Şekil 5.10. CPT konik uç direnci profili (Zdravkovic ve diğ., 2020)



Şekil 5.11. Dunkirk kumu için konsolide drenajlı üç eksenli basınç testlerinin sonuçları (Zdravkovic ve diğ., 2020)

Burada, YASS; yeraltı su seviyesi, deviatörük gerilme üç eksenli basınç deneyinde malzeme üzerinde uygulanan toplam gerilmenin hidrostatik bileşenden ayrılmış kısmıdır ve şekil değiştirmeye neden olan gerilme bileşenini ifade etmektedir.

Şekil 5.9, Şekil 5.10 ve Şekil 5.11 ile verilen bilgilerle Minga ve Burd (2019) Dunkirk kumu için pekleşen zemin küçük birim deformasyon modelinde (HSsmall) parametrelerin kalibrasyonunu her bir zemin katmanı için Çizelge 5.1’deki gibi vermişlerdir.

Çizelge 5.1. Dunkirk kumu için Pekleşen Zemin Küçük Birim Deformasyon Modelinin (HS-Small) kalibrasyonu (Minga ve Burd, 2019)

Katman	Derinlik (m)	RD ^{gerçek} (%)	K ₀	γ _{sat} (kN/m ³)	c' _{ref} (kN/m ²)	φ' (°)	ψ (°)
1	0	100	0,4	17,1	5	44	15
	3						
2	3	75	0,4	17,1	10	40	10
	5,4						
3	5,4	75	0,4	19,9	0,1	40	10
	10						
4	10	75	0,4	19,9	0,1	40	10
	20						
Katman	Derinlik (m)	φ' _{arayüz} (°)	G _{0, ref} (kPa)	E _{50, ref} (kPa)	E _{oed, ref} (kPa)		
1	0	29	196852	60000	60000		
	3						
2	3	29	169675	60000	60000		
	5,4						
3	5,4	29	165878	60000	60000		
	10						
4	10	29	156998	60000	60000		
	20						
Katman	Derinlik (m)	E _{ur, ref} (kPa)	p _{ref} (kPa)	γ _{0,7}	R _f		
1	0	460633	100	1,0E-04	0,875		
	3						
2	3	397040	100	1,0E-04	0,906		
	5,4						
3	5,4	388155	100	1,0E-04	0,906		
	10						
4	10	367376	100	1,0E-04	0,906		
	20						

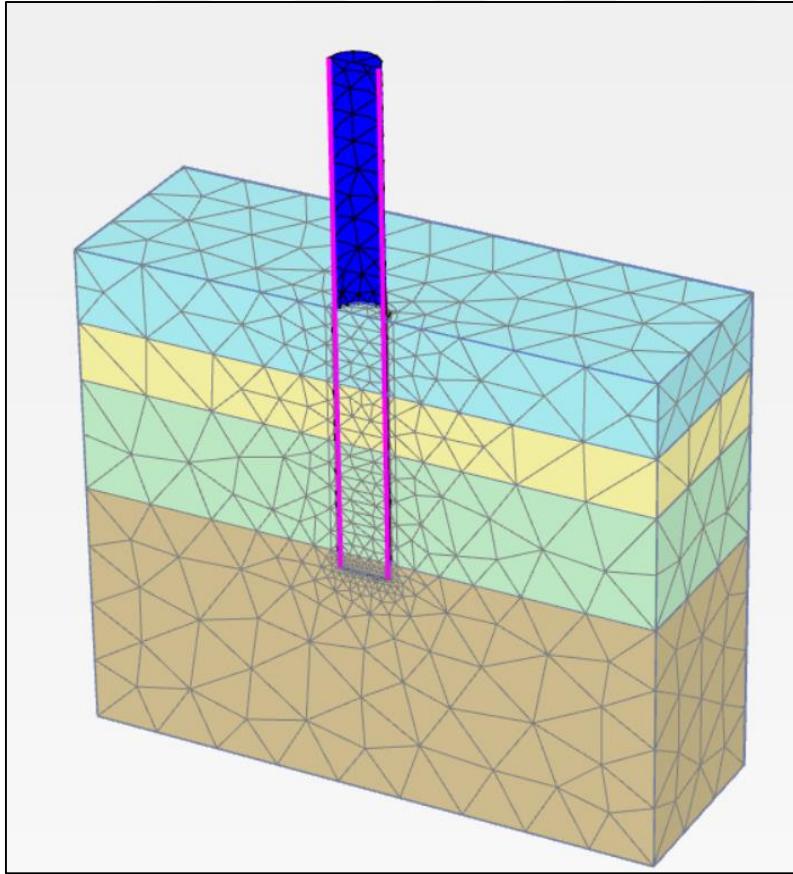
Burada, K₀; sükunetteki toprak basıncı katsayısı, c'_{ref}; kohezyon değeridir.

Dunkirk bölgesinde gerçekleştirilen deneylerin kazık boyutları ise McAdam ve diğ. (2020) tarafından Çizelge 5.2'deki gibi verilmiştir.

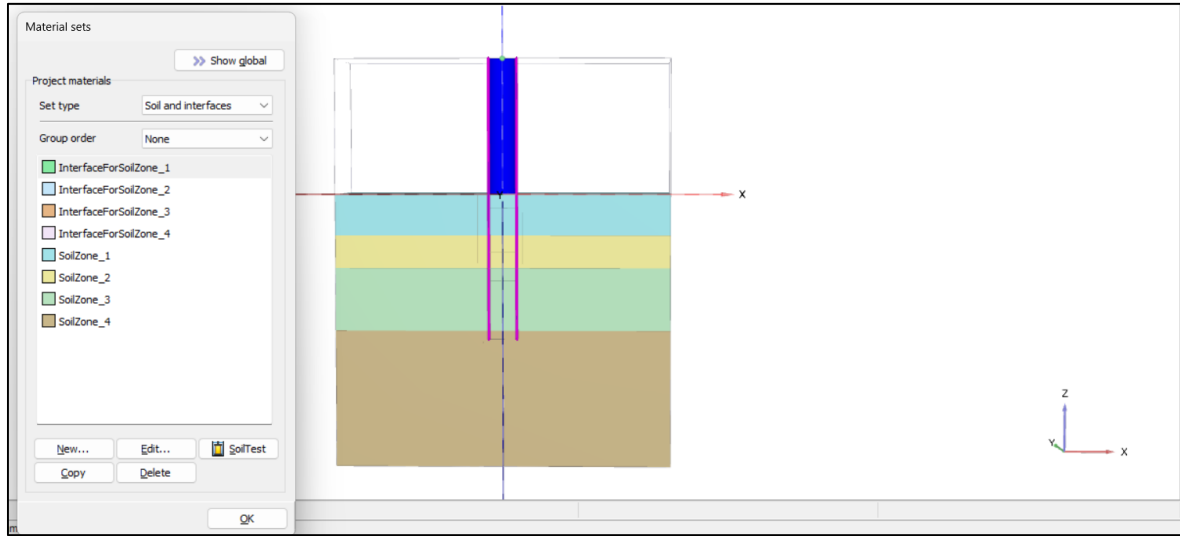
Çizelge 5.2. Dunkirk bölgesinde test edilen (McAdam ve diğ., 2020) ve PLAXIS 3D'de simüle edilen kazıkların geometrik parametreleri

Referans kazık	D (m)	L (m)	t (m)	h (m)
DM4	0,762	3,98	0,014	9,98
DL1	2,000	10,61	0,038	9,90

Çizelge 5.1 ve Çizelge 5.2 ile verilen parametreler PLAXIS 3D ortamında Şekil 5.12 ve Şekil 5.13'teki gibi modellenmiştir.



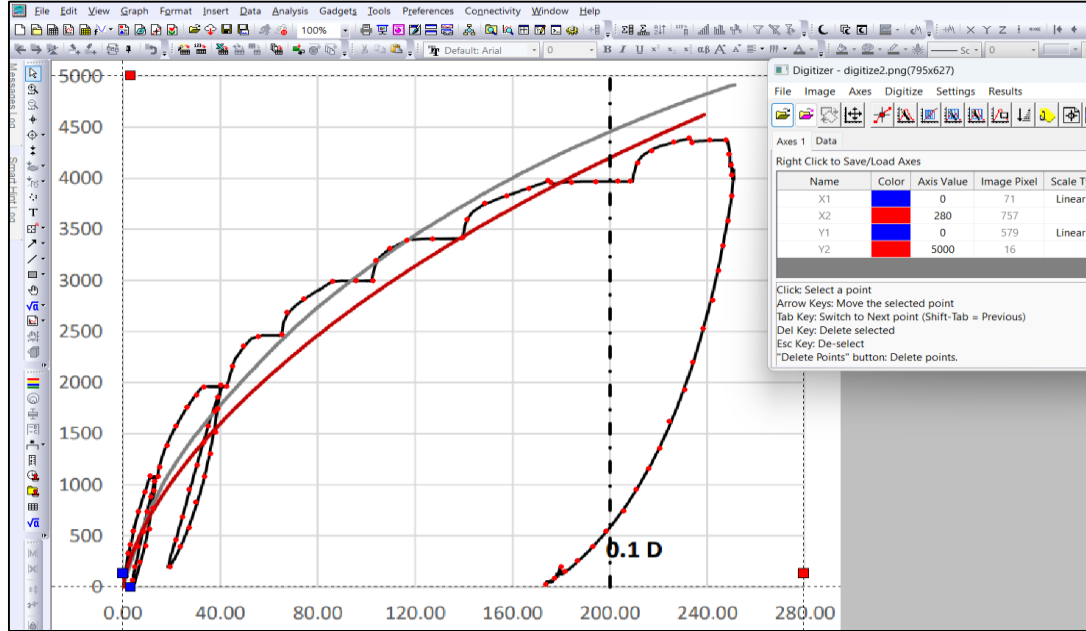
Şekil 5.12. PLAXIS 3D ortamında Dunkirk saha deneylerinin tasarlanması (çözüm ağıının oluşturulması)



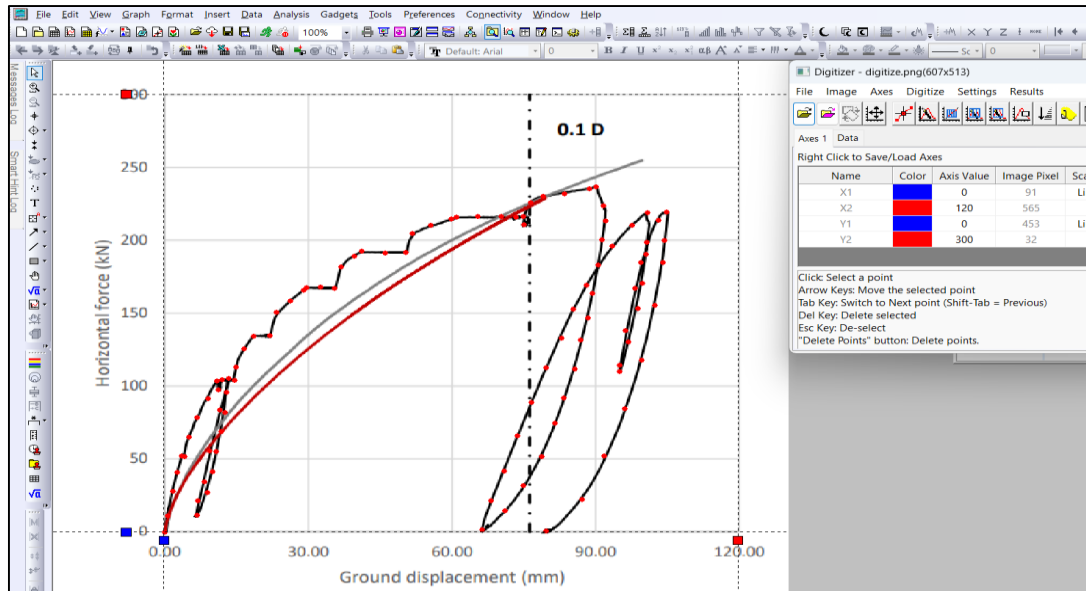
Şekil 5.13. PLAXIS 3D ortamında Dunkirk saha deneylerinin tasarlanması (zemin parametrelerinin belirlenmesi)

PLAXIS 3D ortamında doğrulama için modelleme yapılırken eklentisi olan MoDeTo eklentisi kullanılmıştır. MoDeTo ortamında ile zemin katmanları, parametreleri ve kazık geometrileri girilerek PLAXIS 3D ortamında otomatik olarak üç boyutlu model oluşturulmuştur. Kazık dairesel en kesite sahip olduğundan ekseni etrafında simetriktir ve MoDeTo tarafından işlem hızı açısından yarım olarak modellenmiştir. Çözüm ağı da MoDeTo tarafından otomatik olarak belirlenmektedir. Çözüm ağı elemanları PLAXIS 3D tarafından belirlenen 10 düğüm noktalı tetrahedral elementlerdir. Bu elementler yer değiştirmelerin ikinci dereceden interpolasyonunu sağlamaktadır (PLAXIS, 2023). Tekil kazığın gömülü kısmındaki kesit, çevresinde çözüm ağı oluşturmak amacıyla her biri 20 derece olan 9 segmente bölünmüştür. Tekil kazığın etrafında çözüm ağı daha sık iken tekil kazıktan uzaklaşıldıkça çözüm ağlarının sıklığı azalmaktadır. Bu çözüm ağlarının sıklığının arttırıldığı bölge olarak kazığın çevresinde kazık dış çapının %20'si uzunluğa kadar, kazığın tabanında ise kazık dış çapının %15'i kadar uzunluğa kadar olan kısım belirlenmiştir (PLAXIS, 2018). Çözüm ağının kazık etrafında sıkılaştırılması, çözüm ağının kazık etrafında daha düzenli ve hassas olmasını sağlar, böylece kazık – zemin etkileşimi daha doğru modellenebilir. Şekil 5.13'ten görüleceği üzere MoDeTo tarafından PLAXIS 3D ortamında efektif içsel sürtünme açısı 29° ve dilatans açısı 0° olan bir arayüz oluşturulmuştur. Bu değerler Jardine ve diğ. (2005)'nin çalışmasına dayanmaktadır (PLAXIS, 2018). Minga ve Burd (2019) tarafından yapılan çalışmada da bu yaklaşım benimsenmiştir.

DM4 ve DM1 deneyleri için, McAdam ve diğ. (2020) tarafından verilen, PISA projesi kapsamında saha deneylerinden elde edilen deplasman değerleri OriginPro yazılımı ile elde edilmiştir (Şekil 5.14 ve Şekil 5.15).

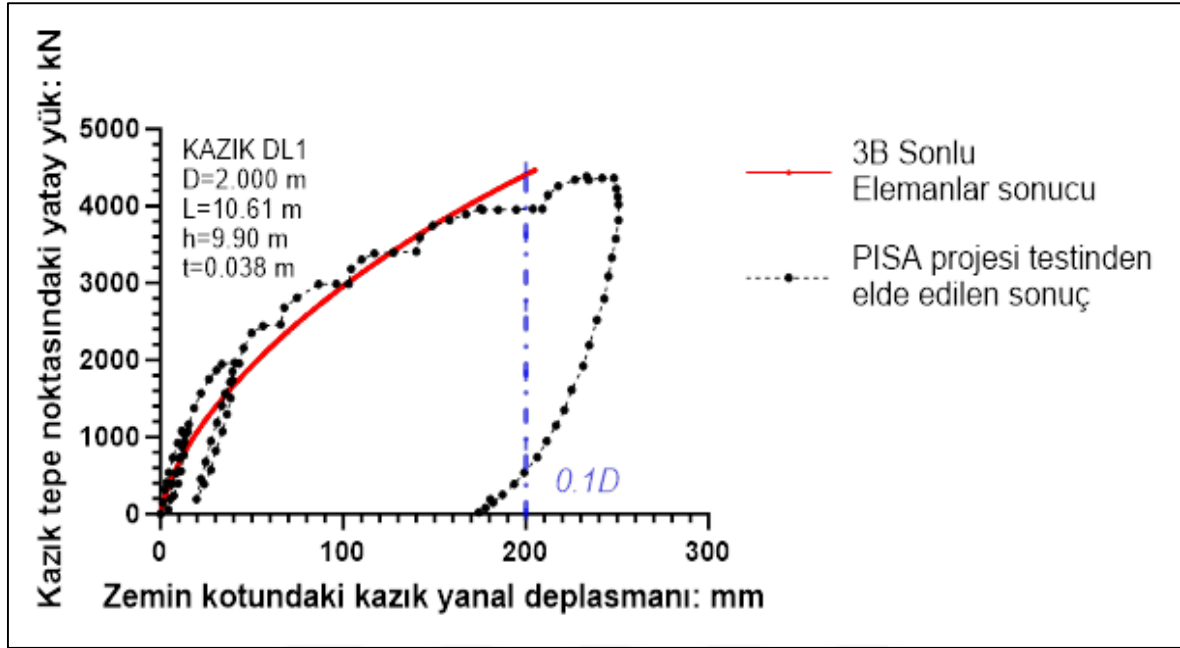


Şekil 5.14. OriginPro yazılımı ile Dunkirk kumunda yapılan DL1 saha deneyinin deplasman sonuçlarının elde edilmesi

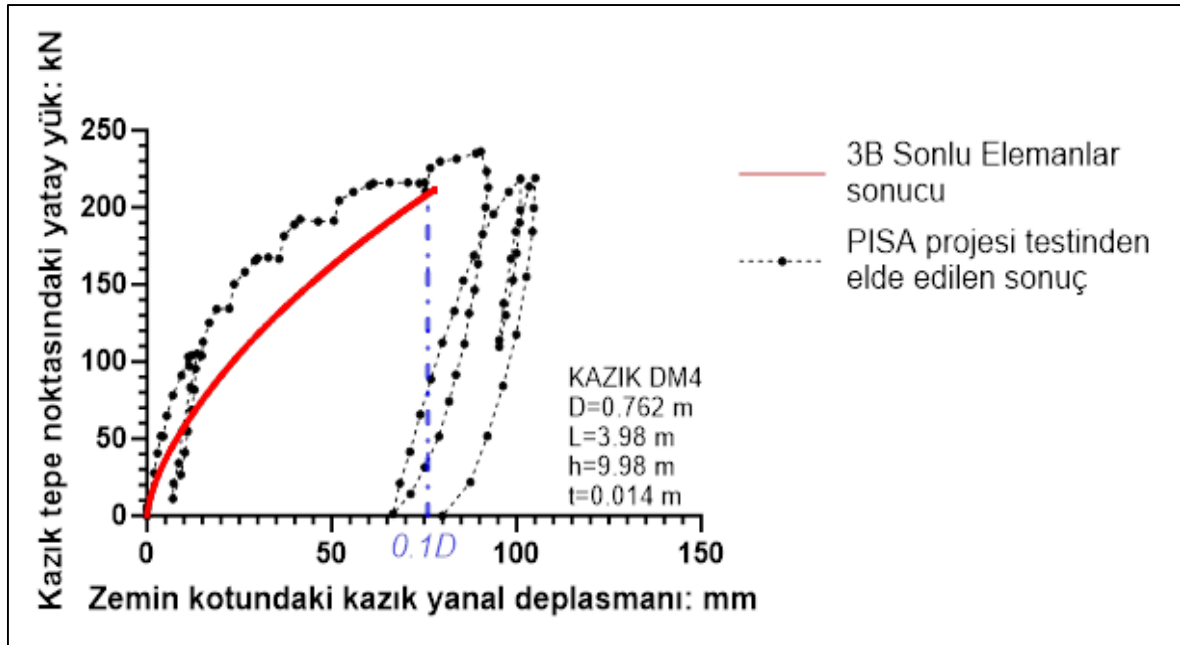


Şekil 5.15. OriginPro programı ile Dunkirk kumunda yapılan DM4 saha deneyinin deplasman sonuçlarının elde edilmesi

PLAXIS 3D ortamından elde edilen sonuçlar ile saha deneylerinden elde edilen sonuçlar ise Şekil 5.16 ve Şekil 5.17’de kıyaslanmıştır (Demir ve diğ., 2024).



Şekil 5.16. DL1 kazığının saha deneylerinden elde edilen deformasyon değerleriyle 3D PLAXIS ortamında yapılan analizlerden elde edilen sonuçların mukayesesi (Demir ve diğ., 2024)



Şekil 5.17. DM4 kazığının saha deneylerinden elde edilen deformasyon değerleriyle 3D PLAXIS ortamında yapılan analizlerden elde edilen sonuçların mukayesesi (Demir ve diğ., 2024)

Şekil 5.16 ve Şekil 5.17’den görüleceği üzere PLAXIS 3D ortamından elde edilen sonuçlar ile PISA saha deneylerinden elde edilen sonuçlar uyum içerisindedir. Burada sınır olarak 0,1D alınmasının sebebi Zdravkovic ve diğ. (2015) tarafından verilen nihai limit durum analizi için verilen sınır kriteridir. Çizelge 5.3’te çeşitli araştırmacılar tarafından önerilen nihai limit durum analizi ve servis limit durum analizi için değerler verilmiştir (Hu ve diğ., 2021).

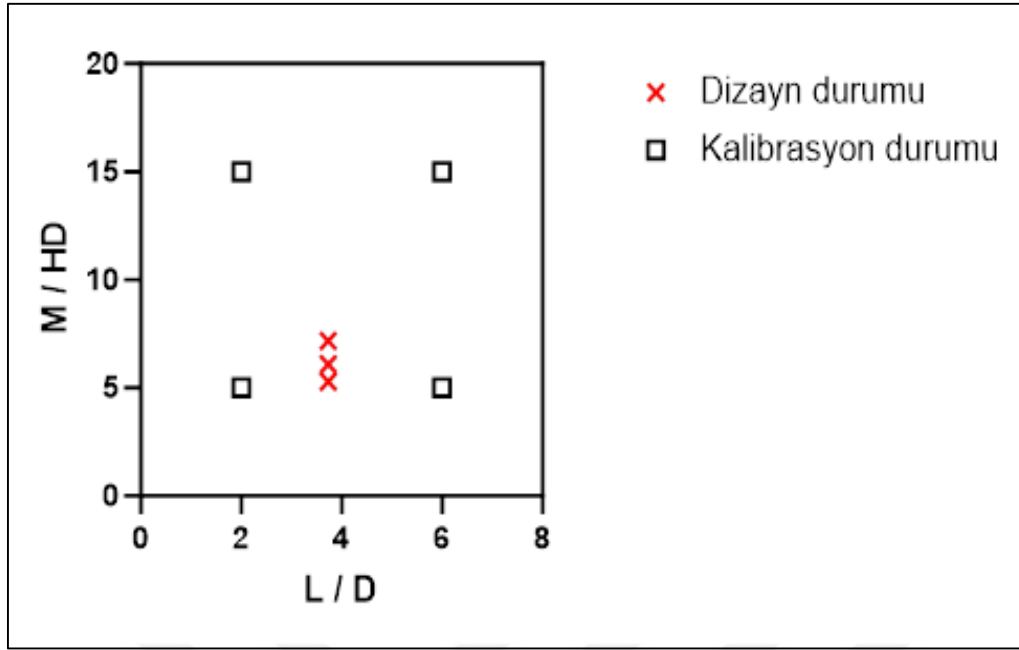
Çizelge 5.3. Dunkirk bölgesinde test edilen (McAdam ve diğ., 2020) ve PLAXIS 3D’de simüle edilen kazıkların geometrik parametreleri

Referans	SLS	ULS
Luo ve diğ. (2018)		$\theta = 2^\circ$
Klinkvort ve Hedeal (2013)		$\theta = 4^\circ$
Ahmed ve Hawlader (2016)		$\theta = 5^\circ$
Zdravkovic ve diğ. (2015)		$u = 0,1D$
Doherty ve Gavin (2012)	$\theta = 0,5^\circ$	
Arany ve diğ. (2017)	$\theta = 0,5^\circ$ veya $u = 0,2 \text{ m}$	

Burada, θ ; zemindeki dönme miktarı ve u ; zemindeki deplasman miktarıdır. Kazık çaplarının büyük olduğu çalışmalarda sınırlayıcı olarak Zdravkovic ve diğ. (2015) tarafından verilen kıstasın dikkate alınması makul görülmektedir.

5.2. PLAXIS 3D Ortamında Kazık Davranışlarının İncelenmesi

PLAXIS 3D yazılımı ile doğrulama yapıldıktan sonra çalışmanın bu kısmında uzun kazık, kısa kazık davranışı arasındaki farklılığın belirtilmesi için farklı tasarım yöntemlerine göre $L/D = 2 - 10$ arasında elde edilen sonuçlar mukayese edilecektir. Zeminin rölatif sıkılığı $D_r = 50$ olarak alınmıştır. Bu işlem için öncelikle 3 boyutlu sonlu eleman modellerinin oluşturulması gerekmektedir. Burada kalibrasyon için oluşturulan modeller Şekil 5.18 ile belirli boyutsuz parametreler aralığında ifade edilmiştir.



Şekil 5.18. $L/D = 2 - 6$ aralığında tasarım durumu için çözüm aralığı

Burada, M ; zemin kotundaki moment, H ; kazığa uygulanan yanal kuvvet ve L ; kazık uzunluğudur. Burada kazığa uygulanan yanal kuvvet olarak rüzgar türbinin göbeğine gelen kuvvet, moment olarak da bu kuvvetin zemin kotunda oluşturduğu moment alınmıştır.

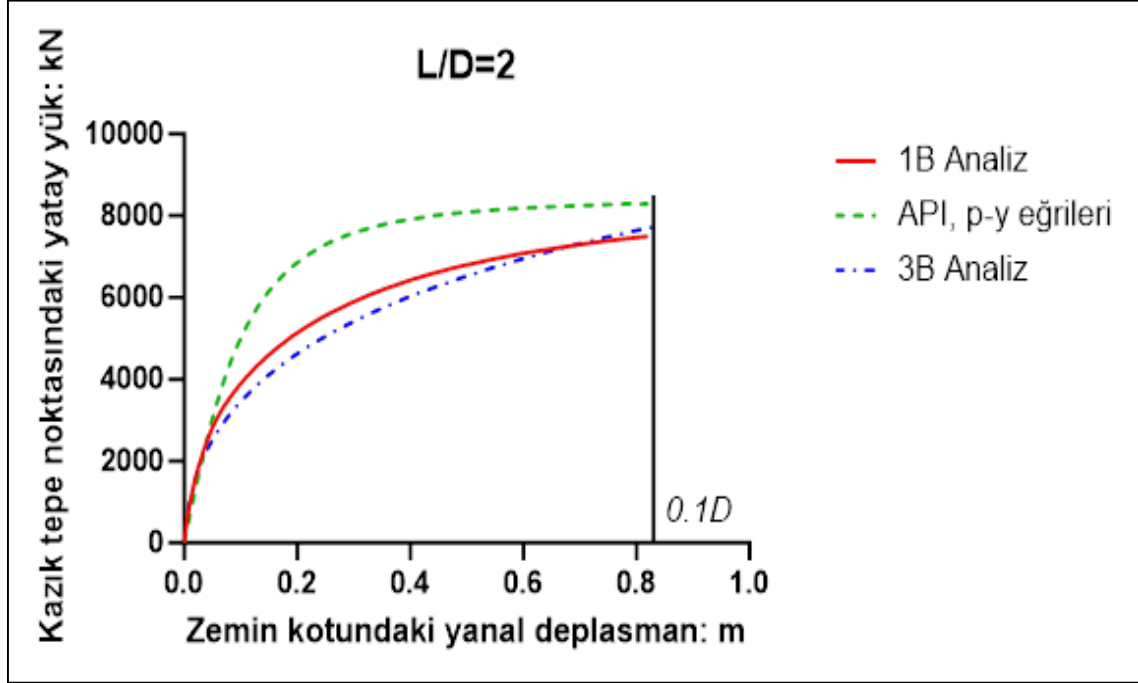
Şekil 5.18'deki kazık geometrik özellikleri Çizelge 5.4'te verilmiştir.

Çizelge 5.4. $L/D = 2 - 6$ aralığında tasarım durumu için kazık geometrik özellikleri

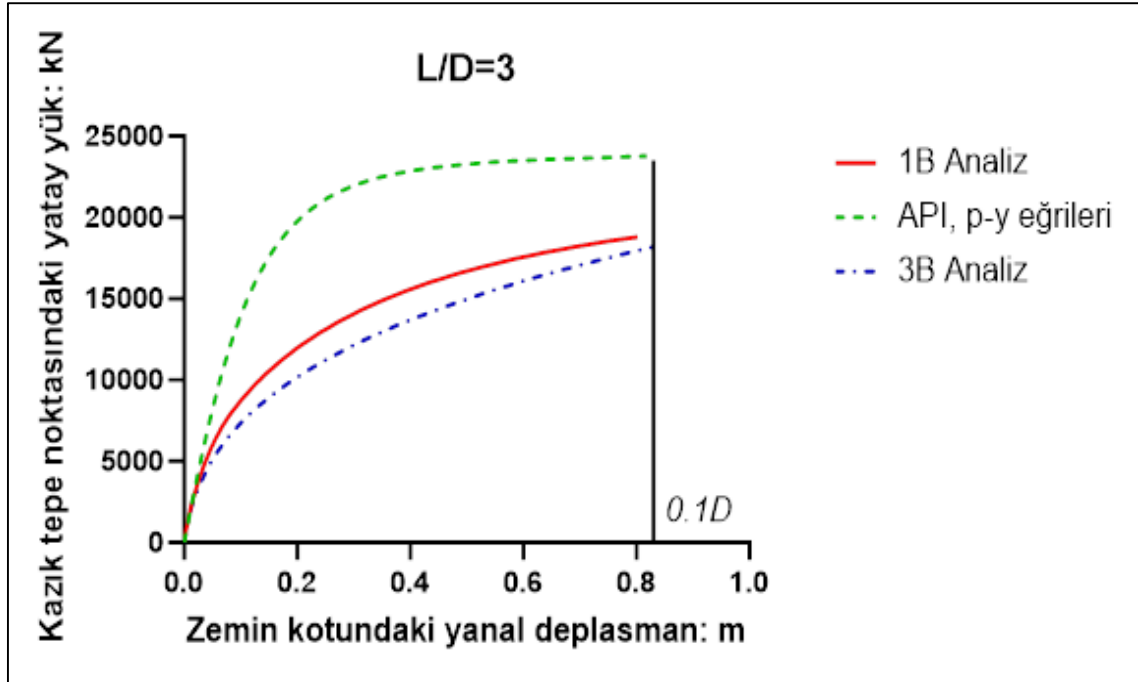
$M / HD [-]$	$L / D [-]$	$D (m)$	$L (m)$
5	6	8,78	52,71
5	2	8,78	17,57
15	2	2,93	5,86
15	6	2,93	17,57

Bryne ve diğ. (2015) tarafından önerilen 1 boyutlu yöntem, çalışma prensibi olarak 3 boyutlu sonlu elemanlar modelleri geliştirilerek bu modellerden elde edilen zemin – reaksiyon eğrilerinin 1 boyutlu modele entegre edilmesi ile (kalibrasyon) çalışmaktadır. Dolayısıyla Şekil 5.18 ile dört farklı 3 boyutlu model oluşturulmuş, her birinden çıkan zemin reaksiyon eğrileri 1 boyutlu modele MoDeTo tarafından entegre edilerek 1 boyutlu çözüm gerçekleştirilmiştir. Dolayısıyla Şekil 5.18 ile bu karşılaştırma için yapılan tasarımların bu değerler arasında kaldığı garanti edilmiştir.

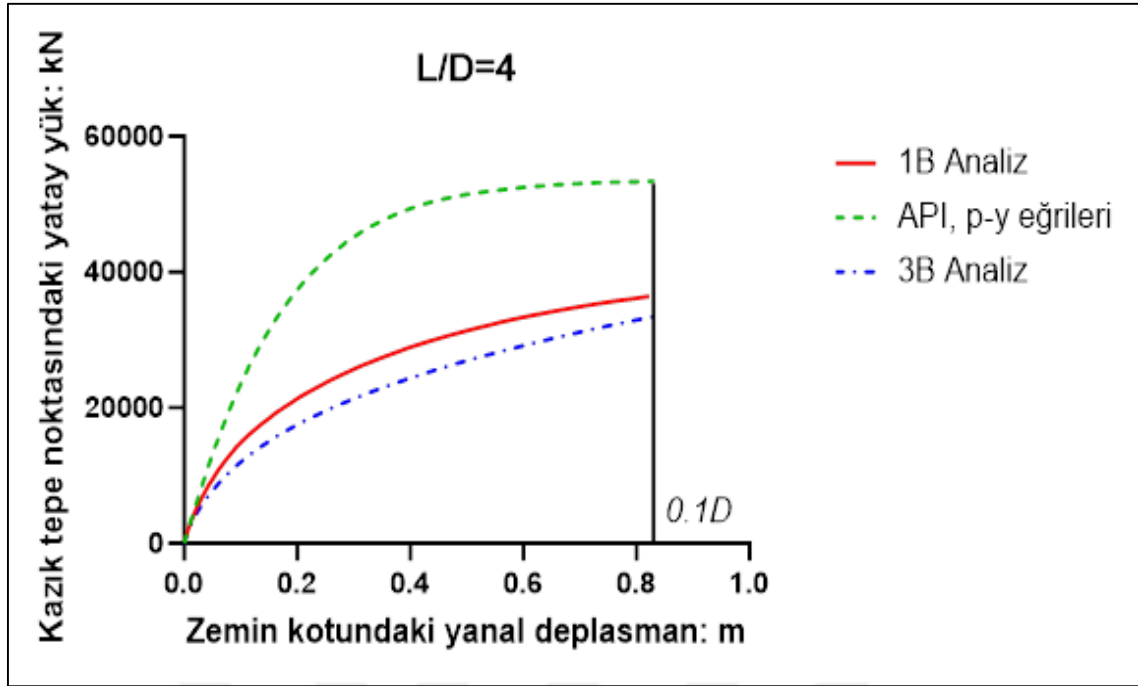
Bu işlem basamaklarıyla elde edilen L/D değerlerine karşılık gelen deformasyon eğrileri Şekil 5.19 ile Şekil 5.23 arasında verilmiştir.



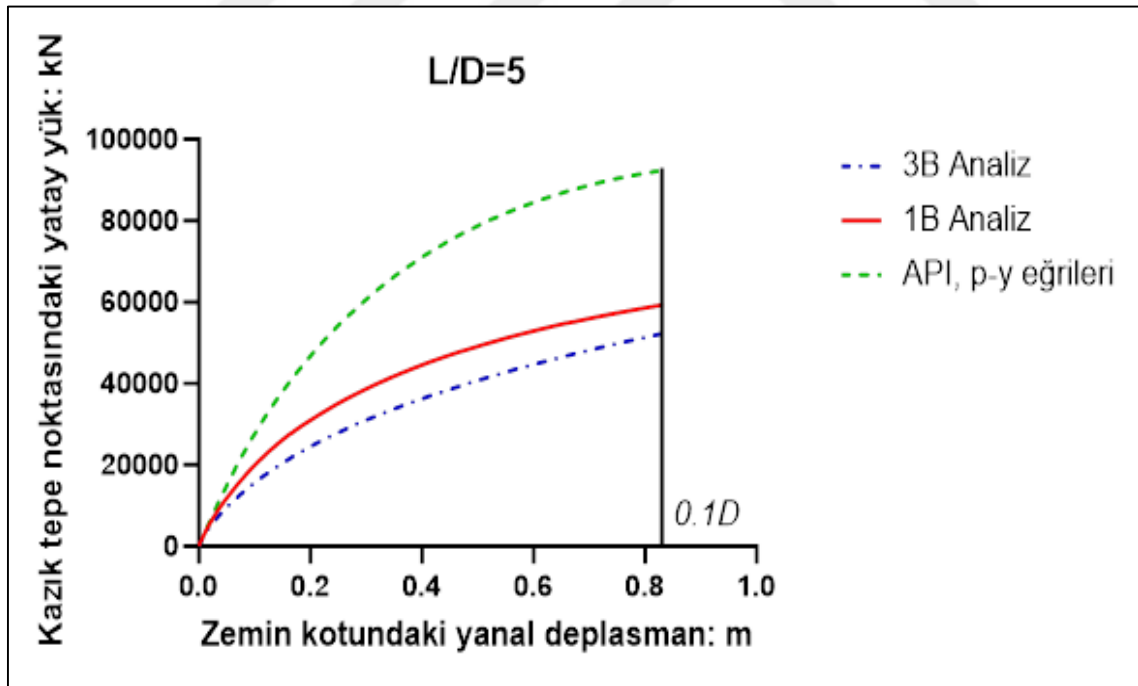
Şekil 5.19. Çalışma kapsamında yapılan $L/D = 2$ için 1B analiz, API (2014) p-y eğrileri ve PLAXIS 3D ortamından elde edilen yük deformasyon eğrileri



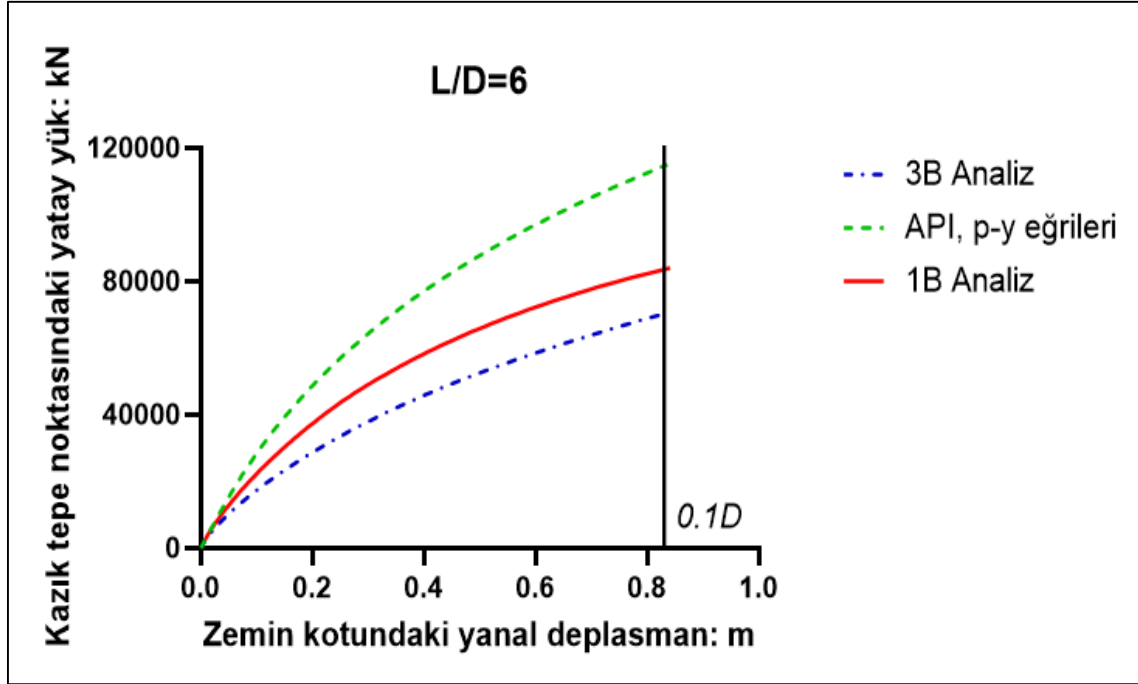
Şekil 5.20. Çalışma kapsamında yapılan $L/D = 3$ için 1B analiz, API (2014) p-y eğrileri ve PLAXIS 3D ortamından elde edilen yük deformasyon eğrileri



Şekil 5.21. Çalışma kapsamında yapılan $L/D = 4$ için 1B analiz, API (2014) p-y eğrileri ve PLAXIS 3D ortamından elde edilen yük deformasyon eğrileri

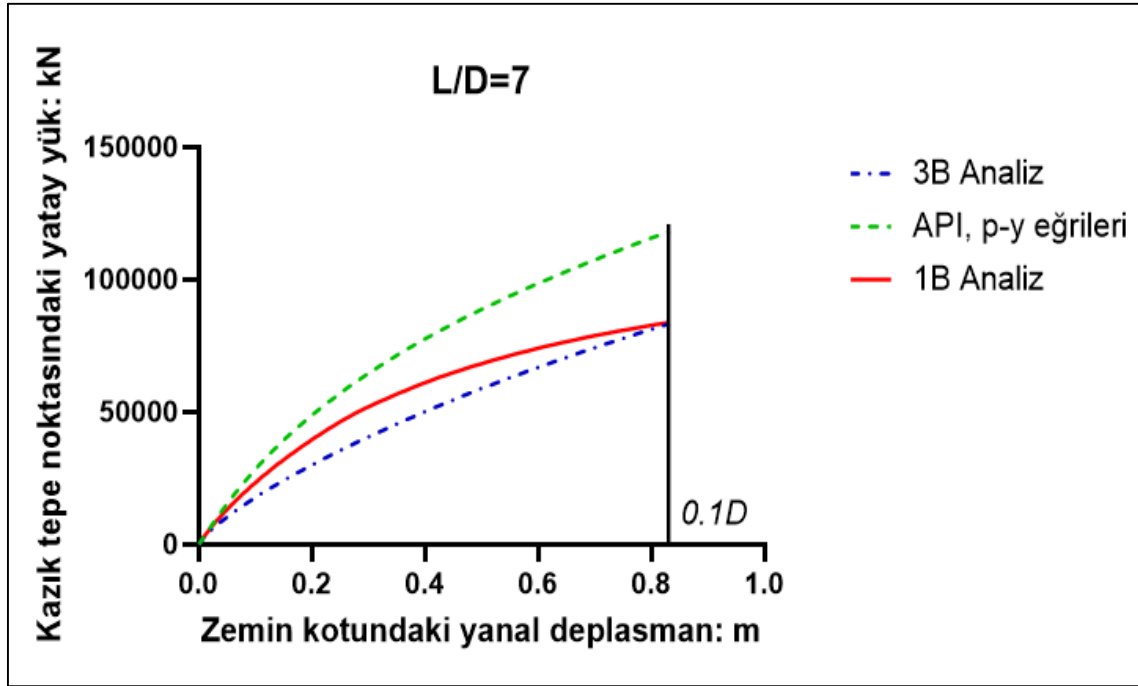


Şekil 5.22. Çalışma kapsamında yapılan $L/D = 5$ için 1B analiz, API (2014) p-y eğrileri ve PLAXIS 3D ortamından elde edilen yük deformasyon eğrileri

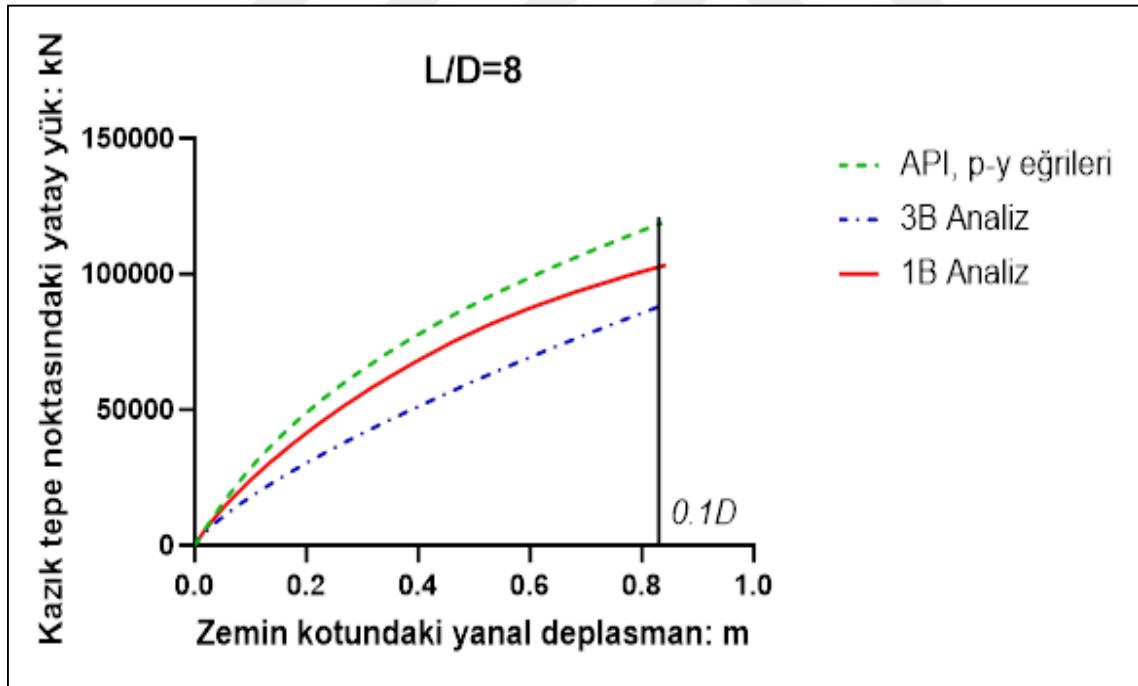


Şekil 5.23. Çalışma kapsamında yapılan $L/D = 6$ için 1B analiz, API (2014) p-y eğrileri ve PLAXIS 3D ortamından elde edilen yük deformasyon eğrileri

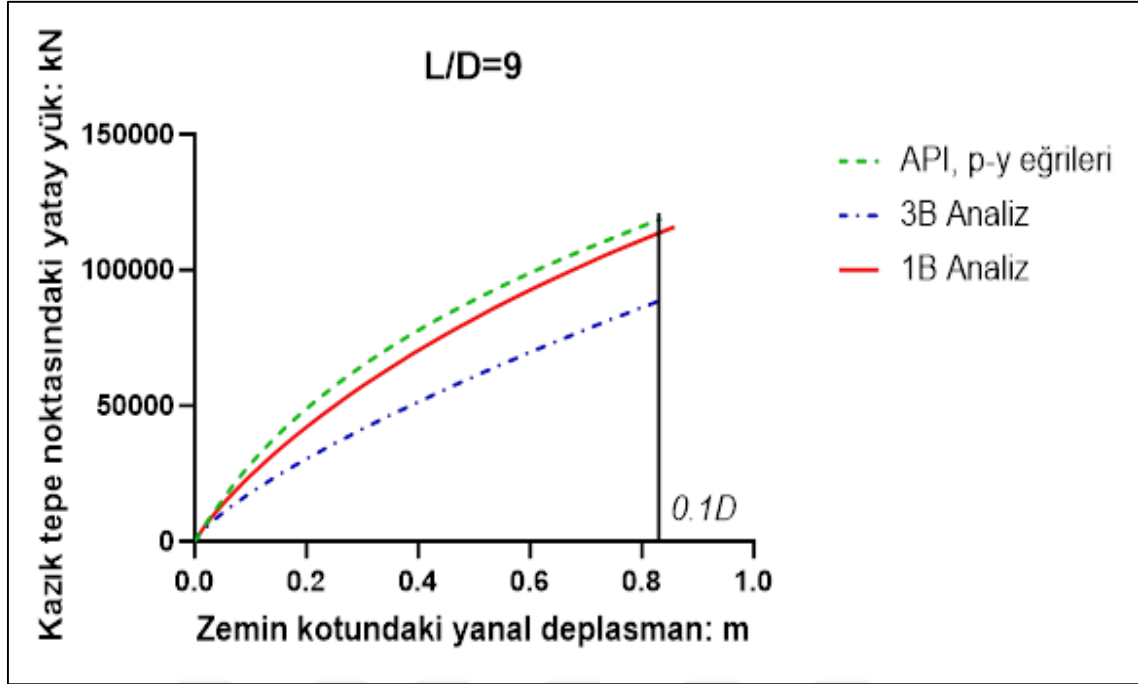
Şekil 5.19 ile Şekil 5.23 arasındaki grafiklerden de görülmektedir ki, kazık kısa kazık davranışı sergilediği durumlarda, üç analiz yönteminden elde edilen sonuçlar farklılık göstermektedir. p – y eğrilerinden elde edilen analiz sonuçları daha rijit bir davranış gösterirken diğer yöntemlerden elde edilen sonuçlar daha esnek bir davranış göstermektedir. Benzer şekilde $L/D = 6 - 10$ arasındaki değerler için de bu analizler Şekil 5.24 ile Şekil 5.27 arasında elde edilmiştir.



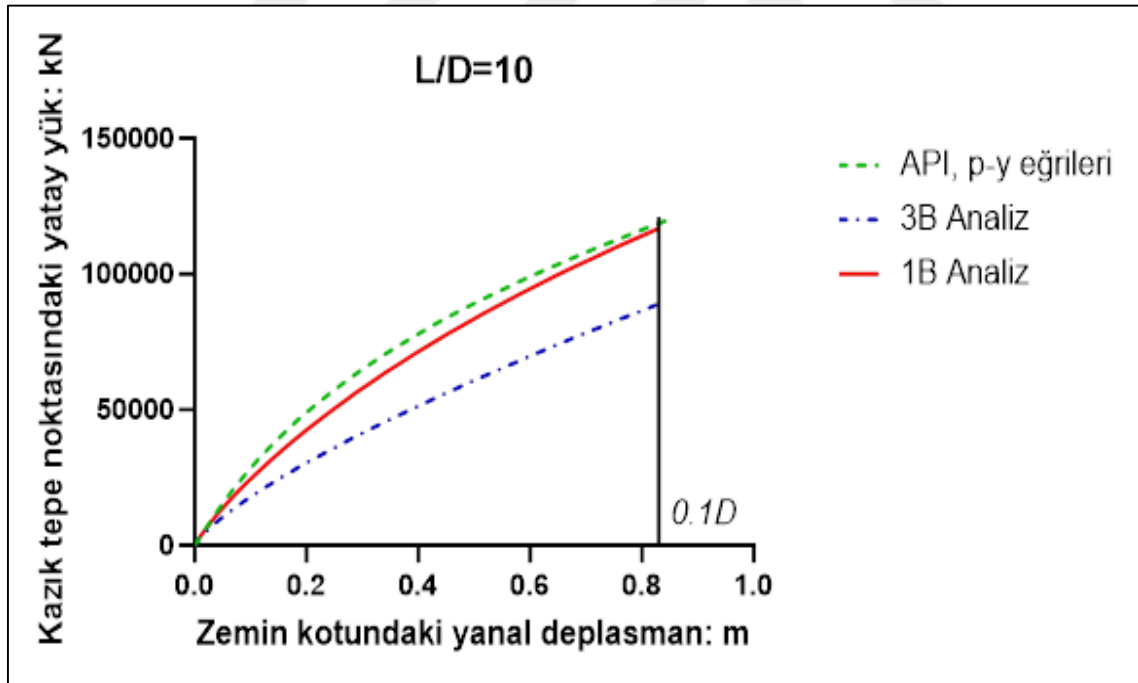
Şekil 5.24. Çalışma kapsamında yapılan $L/D = 7$ için 1B analiz, API (2014) p-y eğrileri ve PLAXIS 3D ortamından elde edilen yük deformasyon eğrileri



Şekil 5.25. Çalışma kapsamında yapılan $L/D = 8$ için 1B analiz, API (2014) p-y eğrileri ve PLAXIS 3D ortamından elde edilen yük deformasyon eğrileri



Şekil 5.26. Çalışma kapsamında yapılan $L/D = 9$ için 1B analiz, API (2014) p-y eğrileri ve PLAXIS 3D ortamından elde edilen yük deformasyon eğrileri

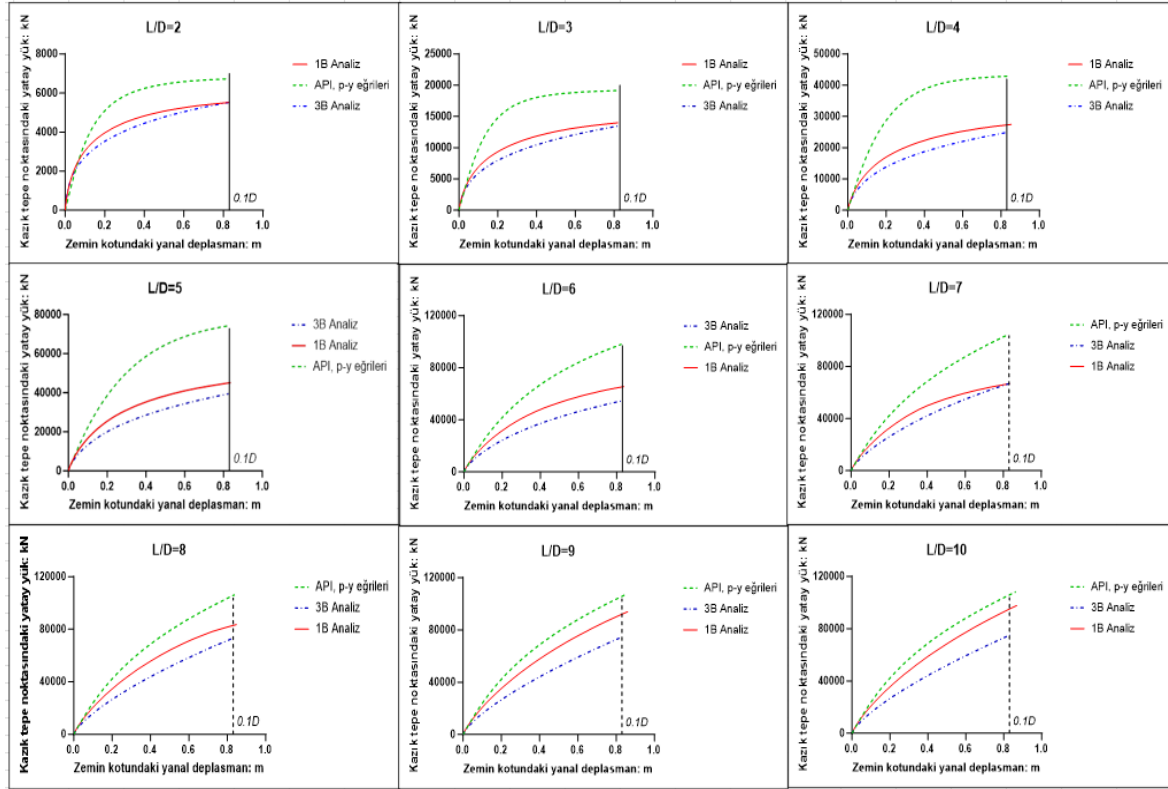


Şekil 5.27. Çalışma kapsamında yapılan $L/D = 10$ için 1B analiz, API (2014) p-y eğrileri ve PLAXIS 3D ortamından elde edilen yük deformasyon eğrileri

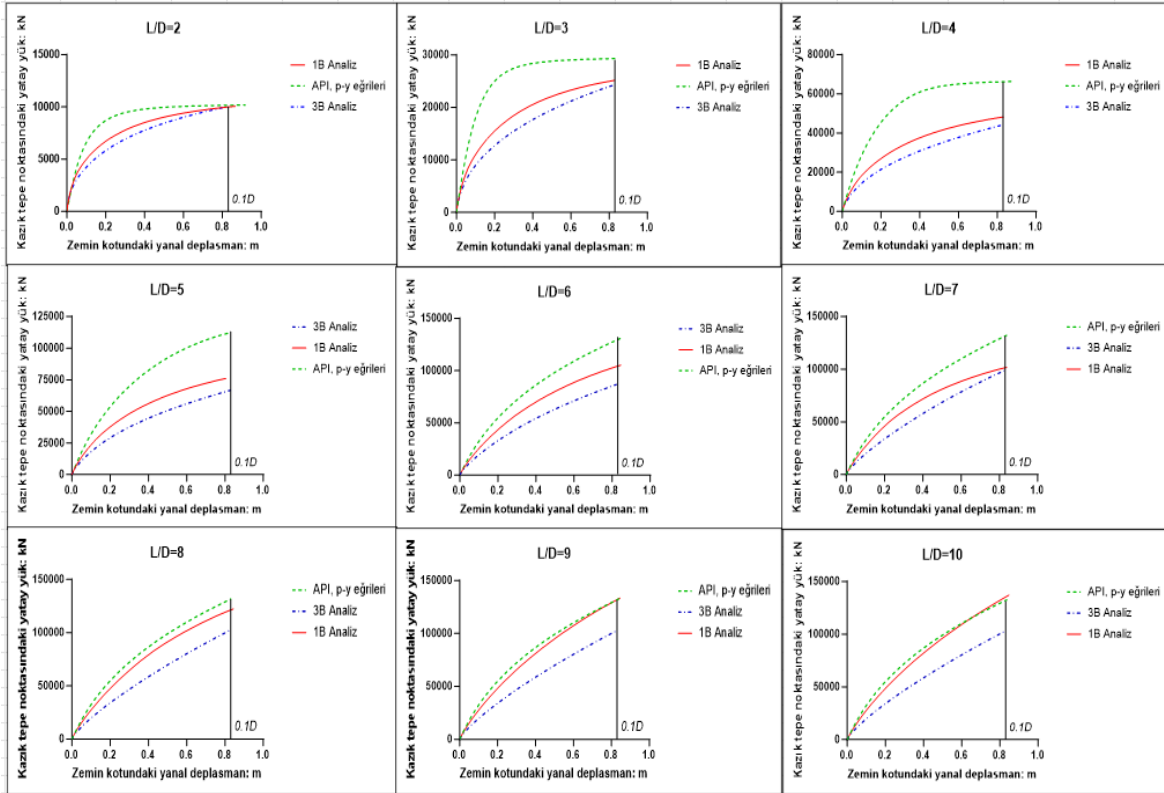
Şekil 5.24 ile Şekil 5.27 arasındaki şekiller incelendiğinde görülmektedir ki, L/D oranları arttıkça, kazık kısa kazık davranışından uzun kazık davranışına doğru geçtikçe, p – y eğrileri, 3 boyutlu analiz ve 1 boyutlu analizden elde edilen kazık göçme yükü değerleri birbirlerine

yaklaşmaktadır. Söz konusu bu davranışlar Bryne ve diğ. (2015) tarafından elde edilen sonuçlar ile uyum içerisinde.

Benzer şekilde aynı trendler $D_r = 30$ (Şekil 5.28) ve $D_r = 70$ (Şekil 5.29) değerleri için de gözlenmiştir.



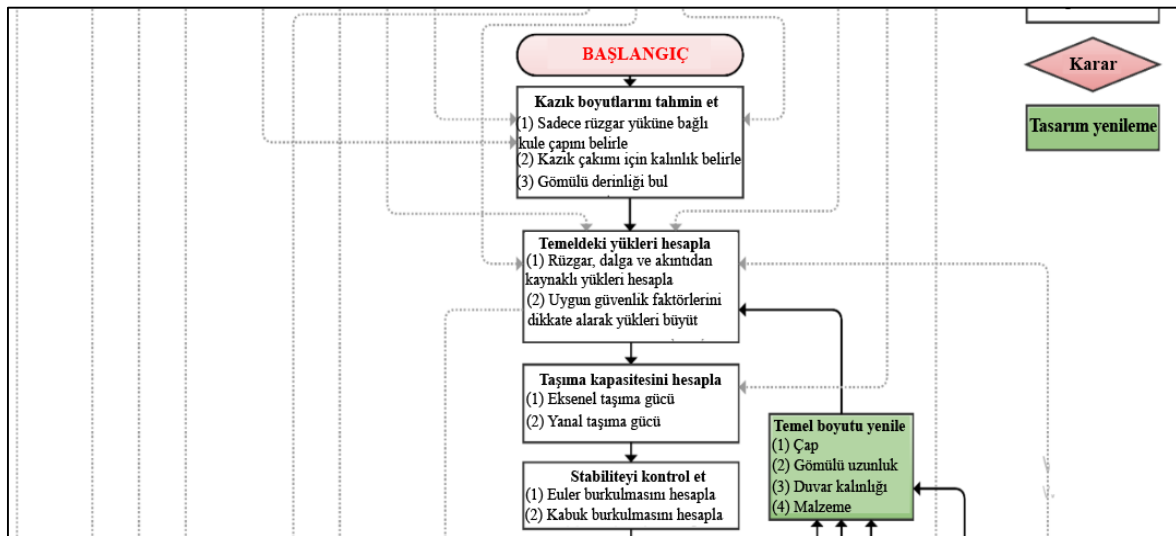
Şekil 5.28. $D_r = 30$ için elde edilen yük deformasyon eğrileri



Şekil 5.29. $D_r = 70$ için elde edilen yük deformasyon eğrileri

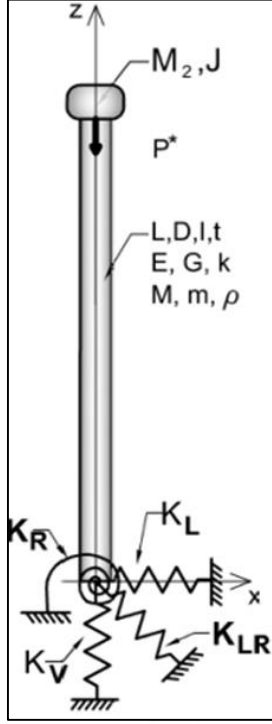
5.3. Açık Deniz Rüzgar Enerjisi Santralının (ADRES) Ön Boyutlandırması

Çalışmanın bu kısmında akış şeması olarak Arany ve diğ. (2017) tarafından verilen adımlar takip edilerek ADRES yapısının ön tasarımı yapılacaktır (Şekil 5.30).



Şekil 5.30. ADRES ön boyutlandırması (Arany ve diğ., 2017)

Ön boyutlama aşamasında yapıya gelen yükler için nihai limit durum analizinden elde edilecek yüklerle hesaplamalar yapılacaktır. Bu tasarım yönteminde temel tasarımı için Şekil 5.31'deki gibi üç yaylı sistem kullanılmıştır.



Şekil 5.31. Üç yaylı zemin modeli (Arany ve diğ., 2017)

Bu safhada yapılan tasarımda K_v yapı dikey olarak çok rijit olduğu için dikkate alınmamıştır (Arany ve diğ., 2017). Bundan sonraki aşamada ön boyutlandırma hesaplama aşamaları verilecektir.

5.3.1. Ön boyutlandırma hesaplama aşamaları

Bu bölümde Şekil 5.30 ile verilen basamaklar takip edilerek ön boyutlandırma işlemlerinin yapılması verilecektir.

Kazık başlangıç boyutlarının optimize edilmesi

Kazık boyutlarının belirlenmesindeki temel tasarım etkenleri, Nihai Limit Durum (ULS) ve Servis Limit Durumu (SLS) kriterlerine dayanmaktadır. Bu kapsamda tekil kazık boyutlarının ve rijitliğinin zemin – yapı etkileşimi dahil tüm sistemin yapısal doğal

frekansını, zemin kotundaki kazık deplasmanını ve zemin kotundaki kazık dönmesini etkileyeceği göz önünde bulundurulmalıdır. Kazık geometrisi temelde üç parametreyle tanımlanmaktadır. Bunlar, kazık çapı (D_P), kazık et kalınlığı (t_P) ve gömülü kazık derinliği (L_P) olarak tarif edilebilir.

Arany ve diğ. (2017) yapmış oldukları çalışmalarında kazık çapının başlangıçta bağımsız değişken bir parametre olarak seçilmesinin doğru olduğunu, diğer parametrelerin söz konusu bu parametreye bağlı olarak seçilmesi gerektiğini belirtmişlerdir.

Kazık çapı (D_P)

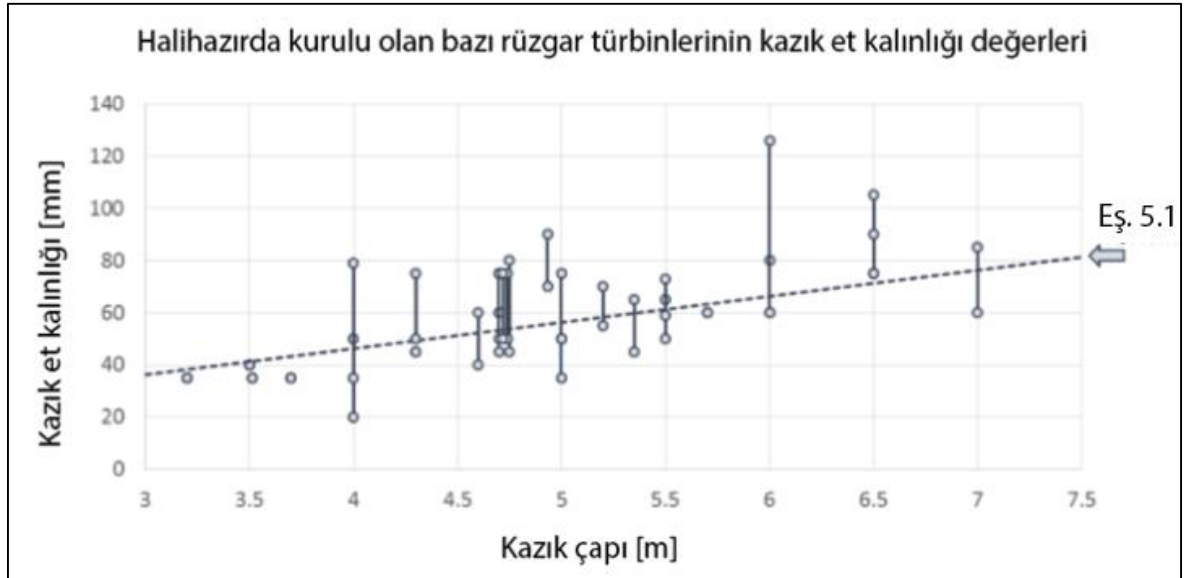
Kazık çapı ilk başta seçimi yapılması gereken bağımsız değişken parametredir. Diğer kazık geometrisini tarif ederken kullanılacak parametrelerin değerleri kazık çapı üzerinden hesaplanacaktır. Başlangıçta kazık çapı, maksimum rüzgar yükü yapıya etki ettiğinde kazık akmasının önlenmesini sağlayacak şekilde seçilir. Temel boyutları güncellenirken çap, kazık akması, zemin direnci ve yapısal doğal frekans kriterleri açısından temel parametre olarak öne çıkmaktadır (Arany ve diğ., 2017). Bu çalışmada kazık çapı literatürde Alkhoury ve diğ., (2020) tarafından DTU 10 MW referans rüzgar türbini için verilen 8,3 m olarak alınmıştır.

Kazık et kalınlığı (t_P)

API (2014) standardına göre minimum kazık et kalınlığı Eş 5.1 ile verilmiştir.

$$t_P = 6,35 + D/100 \text{ [mm]} \quad (5.1)$$

Bu duvar kalınlığı değeri, kazığın yerel veya genel burkulmasını önlemek ya da en basit kurulum yöntemiyle kazığın deniz tabanına çakılmasını sağlamak için yeterli stabiliteyi garanti etmeyebilir. Ayrıca, kazık ucunda oluşabilecek hasarların erken durmaya yol açmasını engellemek adına bu konuların ayrı ayrı ele alınması gerekmektedir. Buna ek olarak, yorulma tasarımı da kazığın duvar kalınlığında ilave gereksinimlere yol açabilir (Arany ve diğ., 2017). Şekil 5.32 farklı tekil kazık çaplarına sahip halihazırda bulunan açık deniz rüzgar türbinleri için kazık et kalınlıklarını göstermektedir (Arany ve diğ., 2017).



Şekil 5.32. Halihazırda kurulu olan bazı rüzgar türbinlerinin kazık et kalınlığı değerleri (Arany ve diğ., 2017)

Şekil 5.32’den görüleceği üzere bazı kazıkların duvar kalınlıkları, API (2014) tarafından önerilen minimum kalınlıklardan önemli ölçüde yüksektir. Bu çalışmada kazık et kalınlığı Eş 4.1’den 89,4 mm elde edilmiş fakat minimum değerden daha yüksek bir değer seçilmesi gerekliliğinden dolayı 90 mm olarak seçilmiştir.

Kazık gömülü derinliği (L_P)

Poulos ve Davis (1980), Barber (1953) çalışmasını göz önünde bulundurarak, zemin yatak katsayısı modülünün kullanımıyla kazık gömülü derinliği için bir yaklaşım sunmuştur. Kohezyonlu zeminlerde zemin yatak katsayısı modülü derinlikle sabit kabul edilebilir. Kazık Eş 5.2’yi sağlıyorsa kazık uzun kazık olarak kabul edilir.

$$L_P > 2,5 \left(\frac{E_P I_P}{k_h D_P} \right)^{\frac{1}{4}} \quad (5.2)$$

Kazık uzunluğu eğer Eş 5.3’ü sağlıyorsa kazık, kısa kazık olarak kabul edilir.

$$L_P < 1,5 \left(\frac{E_P I_P}{k_h D_P} \right)^{\frac{1}{4}} \quad (5.3)$$

Burada; E_p ; kazığın elastisite modülü, I_p ; kazığın atalet momenti ve k_h ; yatay zemin reaksiyon modülüdür. Normal konsolide killer ve kum gibi kohezyonsuz zeminlerde zemin yatak katsayısının derinlikle değişimi yaklaşık Eş 5.4'teki gibidir.

$$k_h = n_h \frac{z}{D_p} \quad (5.4)$$

Burada, z ; zemin kotundaki mesafe değişimi ve n_h ; yatay zemin reaksiyon katsayısıdır. Normal konsolide killer ve kum gibi kohezyonsuz zeminlerde Eş 5.5 sağlanıyorsa kazık uzun kazık olarak kabul edilir.

$$L_p > 4,0 \left(\frac{E_p I_p}{n_h} \right)^{\frac{1}{5}} \quad (5.5)$$

Kazık uzunluğu eğer Eş 5.6'yı sağlıyorsa kazık, kısa kazık olarak kabul edilir.

$$L_p < 2,0 \left(\frac{E_p I_p}{n_h} \right)^{\frac{1}{5}} \quad (5.6)$$

Bu çalışma boyunca üç farklı rölatif sıklıkta, gevşek – orta sıkı – sıkı, çalışma yapılmıştır. Çalışmanın bu kısmında zemin su altında kaldığından zeminin rölatif sıklığının gevşek olamayacağı düşünüldüğünden ve de balıkçı barınağı yakınında yapılan zemin incelemesinde de kumun orta sıklıkta olduğu bilindiğinden rölatif sıklık orta sıkı olarak ele alınmıştır. Rölatif sıklık değerleri zemin tanımlamasına göre Mitchell ve Soga (2005) tarafından Çizelge 5.5'teki gibi ifade edilmiştir.

Çizelge 5.5. Rölatif sıklık değerlerine göre zemin sınıflandırması (Mitchell ve Soga, 2005)

Rölatif sıklık, RD, %	Tanım
0 – 20	Aşırı gevşek
20 – 40	Gevşek
40 – 60	Orta sıkı
60 – 80	Sıkı
80 – 100	Çok sıkı

Yine bu çalışmada yatak katsayısı değeri ise Terzaghi (1955)'in çalışmasına dayanarak Çizelge 5.6'dan alınmıştır.

Çizelge 5.6. Terzaghi (1955)'e göre yatak katsayısı sabiti değerleri

Rölatif sıklık	n_h (kN/m ³)		
	Gevşek	Orta	Sıkı
Yeraltı su seviyesi üzerindeki zeminler için	2424	7272	19393
Yeraltı su seviyesi altındaki zeminler için	1385	4848	11774

Çizelge 5.6 dikkate alınarak zemin su altında olduğundan ve zemin orta sıkı zemin olarak alındığından, yatak katsayısı sabiti 4848 kN/m³ olarak alınmıştır. Maliyet ve tasarım açısından ise kazık yapısı kısa kazık olarak değerlendirildiğinden Eş. 5.6'dan S355 çeliğin elastisite modülü 210,00 GPa ve kazığın atalet momenti çap ile kalınlığı bilindiğinden 19,42 m⁴ hesaplanarak, gömülü kazık derinliği 31 m olarak bulunmuştur.

Zemin seviyesi üzerindeki platform yüksekliği (L_s)

Platform yüksekliği genellikle geçiş parçasının en üst noktası (aynı zamanda kule tabanı) en düşük gelgit seviyesinin üzerindeki yüksekliği olarak tanımlanır. Ancak burada platform yüksekliği, geçiş parçasının üstü, yani kule tabanı ile zemin üst seviyesi arasındaki mesafe olarak tanımlanmıştır. Zemin üzerindeki platform yüksekliği, DNV (2014) standardı doğrultusunda belirlenmiştir. Ortalama Su Seviyesi (MWL) üzerindeki astronomik gelgit ve pozitif fırtına kabarması dikkate alınarak 50 yıllık dönüş periyoduna sahip maksimum su seviyesi (HWL) temel alınabilir. Buna, 50 yıl tekerrür seviyesine sahip maksimum dalga yüksekliği ve hava payı eklenir. Hava boşluğu burada olarak 50 yıllık belirgin dalga yüksekliğinin %20'si alınmıştır. Böylece, zemin seviyesi üzerindeki platform yüksekliği Eş 5.7'deki gibi ifade edilir.

$$L_s = S + H_{m,50} + 0,2H_{s,50} \quad (5.7)$$

Burada, S ; maksimum su seviyesidir. Bu çalışmada L_s değeri 38,19 m olarak hesaplanmıştır.

Geçiş yapısı çapı (D_s)

Kule genellikle tekil kazığa bir geçiş parçası aracılığıyla bağlanır. Geçiş parçası ile tekil kazık arasında beton harç için bir boşluk bırakılır ve et kalınlığı olan bir geçiş parçası kullanılır. Alt yapıya etki eden dalga yüklerini hesaplarken, geçiş parçası çapı dikkate alınmalıdır ve bu genellikle tekil kazık çapından daha büyüktür. Geçiş yapısı çapı Eş. 5.8 ile ifade edilir.

$$D_s = D_p + 2t_g + 2t_{TP} \quad (5.8)$$

Burada, t_g ; beton harcın kalınlığı ve t_{TP} ; geçiş yapısının et kalınlığıdır. Bu çalışmada beton harcın kalınlığı, dalga enerji üreticinin ankrajları da bu yapıya bağlanacağından 0,41 m geçiş yapısının et kalınlığı da sürekliliği sağlamak için 0,09 m olarak alınmıştır.

Temele gelen yüklerin hesaplanması

Rüzgar türbini rotoru ve geçiş yapısına etki eden yükler nihayetinde temele aktarılır ve iki gruba ayrılabilir. Bunlar; bileşenlerin kendi ağırlığından kaynaklanan statik ya da ölü yükler ve rüzgar, dalga, 1P ve 3P yüklerinden kaynaklanan çevrimsel/dinamik yükler olarak söylenebilir (Arany ve diğ., 2017).

- Dönen kanatlar, kule tepesindeki göbek seviyesinde ve akıntı türbinindeki göbek seviyesinde çevrimsel/dinamik yatay yük uygular. Bu yük, rüzgar hızındaki türbülans yoğunluğu tarafından belirlenir. Dinamik yük bileşeninin büyüklüğü, türbülanslı rüzgar hızının bileşenine ve akıntı hızına bağlıdır.
- Dalgalar, yapıya çarparak temelde yatay yük uygular. Bu yükün büyüklüğü, dalga yüksekliği, dalga periyodu ve su derinliğine bağlıdır. Ayrıca dalga enerji üreticinin bağlı olduğu ankrajlar da dalgalar ile kazık ve dolayısıyla kazık temeline yük uygular.
- Rotor ve göbeğin kütle dengesizliği ile kanatların aerodinamik dengesizlikleri, göbek seviyesinde titreşim oluşturur ve yatay yük ile devrilme momenti uygular. Bu yükün frekansı, rotorun dönüş frekansına eşittir (literatürde 1P yüklemesi olarak adlandırılır).

Çoğu endüstriyel rüzgar türbini değişken hızlı makineler olduğundan, 1P tek bir frekans değil, en düşük ve en yüksek devir/dakika ile ilişkili frekanslar arasında bir frekans bandıdır.

- Kanat gölgeleme etkileri (literatürde 2P/3P olarak adlandırılır) kule üzerinde de yük oluşturur. Bu yük, üç kanatlı türbinlerde rotor dönüş frekansının üç katı (3P) ve iki kanatlı türbinlerde iki katı (2P) frekansa sahip bir dinamik yük olarak tanımlanır. Kanatlar tarafından türbülansın döngüsel örneklenmesi ve rüzgar kayması, temelde de 2P/3P yüklerine neden olabilir. 2P/3P uyarımları da tıpkı 1P gibi bir frekans bandında etki eder ve 1P bandının sınırlarının kanat sayısı ile çarpılmasıyla elde edilir.

Bundan sonraki kısımda yapıya gelen yüklerin detaylı hesaplamaları verilecektir.

Temel tasarımı için yükleme senaryoları

IEC – 61400 – 1 ve DNV (2014) kodu, rüzgar türbinlerinin 20 – 30 yıllık kullanım ömrü boyunca güvenli bir şekilde çalışmasını sağlamak için analiz edilmesi gereken yüzlerce yük durumu tanımlamaktadır. Ancak, temel tasarımı açısından bu yük durumlarının tümü önemli değildir. Temel tasarımı açısından önemli olan beş yük durumu belirlenmiş ve Çizelge 5.7’de açıklanmıştır (Arany ve diğ., 2017)

Çizelge 5.7. Temel tasarımı için seçilen yük durumlarını belirleyen çevresel senaryolar (Arany ve diğ., 2017)

	İsimlendirme ve Tanımı	Rüzgar modeli	Dalga modeli	Yönleri
E – 1	Normal çalışma durumu <i>Rüzgar ve dalga aynı doğrultuda etkir.</i>	NTM – U_R (U – 1)	1 yıl ESS (W – 1)	Aynı yönde
E – 2	Ekstrem dalga yükü durumu <i>Rüzgar ve dalga aynı doğrultuda etkir.</i>	ETM – U_R (U – 2)	50 yıl EWH (W – 4)	Aynı yönde
E – 3	Ekstrem rüzgar yükü durumu <i>Rüzgar ve dalga aynı doğrultuda etkir.</i>	EOG – U_R (U – 3)	1 yıl EWH (W – 2)	Aynı yönde
E – 4	Çalışma durma ve ani rüzgar durumu <i>Rüzgar ve dalga aynı doğrultuda etkir.</i>	EOG – U_{out} (U – 4)	50 yıl EWH (W – 4)	Aynı yönde
E – 5	Rüzgar ve dalganın farklı hiza durumu <i>Rüzgar ve dalgalar 90°'lik açı farkıyla farklı hizalarda etkir.</i>	ETM – U_R (U – 2)	50 yıl EWH (W – 4)	Farklı yönde

Çizelge 5.7'den de görüleceği üzere tasarım için yük durumları, dört farklı rüzgar durumu ve dört farklı deniz durumu kombinasyonu olarak oluşturulmaktadır. Bunlardan rüzgar koşulları aşağıdaki gibi tarif edilebilir.

- (U – 1) Normal türbülans senaryosu; ortalama rüzgar hızı, en yüksek itme kuvvetinin beklendiği nominal rüzgar hızı seviyesindedir (U_R) ve rüzgar türbülansı Normal Türbülans Modeli (NTM) ile modellenir. NTM'nin standart sapması, IEC – 61400 – 1 tarafından tanımlanmıştır.
- (U – 2) Ekstrem türbülans senaryosu; Ortalama rüzgar hızı, nominal rüzgar hızı seviyesindedir ve rüzgar türbülansı çok yüksektir. Bu durumda, Ekstrem Türbülans Modeli (ETM) kullanılır. ETM'nin standart sapması, IEC – 61400 – 1 tarafından tanımlanmıştır.
- (U – 3) Nominal rüzgar hızında ekstrem ani esinti senaryosu; Ortalama rüzgar hızı, nominal rüzgar hızı seviyesindedir ve rotor, 50 yıllık Ekstrem Ani Esinti (EOG) ile karşılaşır. EOG, rüzgar hızında ani bir değişimdir ve bu değişim rüzgar türbininin pitch kontrolünün yükü hafifletmek için zaman bulamayacağı kadar hızlı gerçekleşir. Bu varsayım oldukça kısıtlayıcıdır ve basitleştirilmiş temel tasarımı için önerilmektedir. EOG hızı, IEC – 61400 – 1 tarafından tanımlanmıştır.
- (U – 4) Kapanma rüzgar hızında ekstrem ani esinti senaryosu; Ortalama rüzgar hızı, türbin kapanma rüzgar hızının (U_{out}) hemen altındadır ve rotor 50 yıllık Ekstrem Ani Esintiye maruz kalır. Rüzgar hızındaki ani değişim nedeniyle türbin kapanma işlemini gerçekleştiremez. Kapanma rüzgar hızında hesaplanan EOG hızı, nominal rüzgar hızında değerlendirilen EOG hızından farklıdır ve IEC – 61400 – 1 tarafından tanımlanmıştır.

Dalga koşulları ise aşağıdaki gibi tanımlanmıştır.

- (W – 1) 1 yıllık ekstrem deniz durumu (ESS); 1 yıllık belirgin dalga yüksekliği ($H_{s,1}$) olan bir dalga geçiş yapısına etki eder.
- (W – 2) 1 yıllık ekstrem dalga yüksekliği (EWH); 1 yıllık maksimum dalga yüksekliği ($H_{m,1}$) olan bir dalga geçiş yapısına etki eder.
- (W – 3) 50 yıllık ekstrem deniz durumu (ESS); 50 yıllık belirgin dalga yüksekliği ($H_{s,50}$) olan bir dalga geçiş yapısına etki eder.

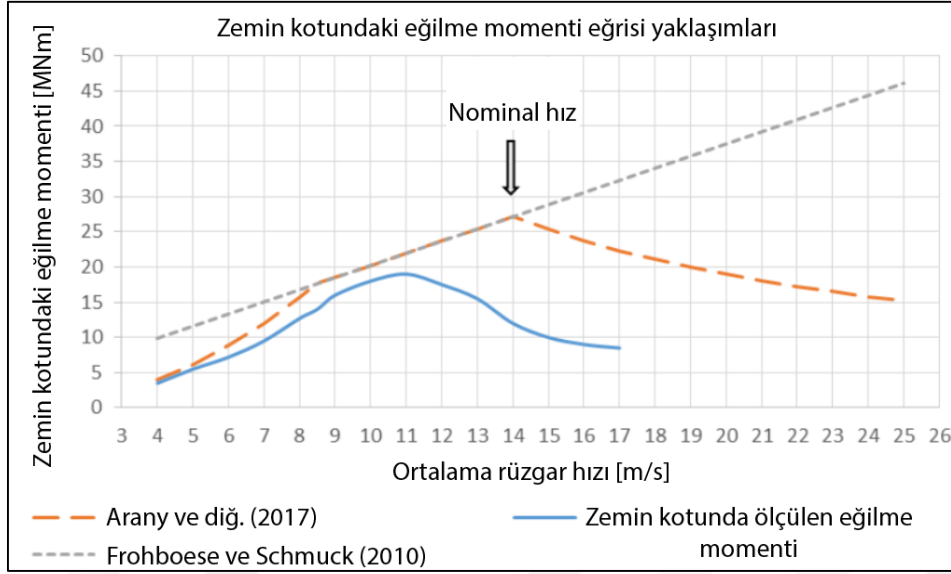
- $(W - 4)$ 50 yıllık ekstrem dalga yüksekliği (EWH); 50 yıllık maksimum dalga yüksekliği ($H_{m,50}$) olan bir dalga geçiş yapısına etki eder.

1 yıllık ekstrem deniz durumu ve 1 yıllık ekstrem dalga yüksekliği IEC – 61400 – 1 tarafından tanımlanan Normal Dalga Yüksekliği'nin (NWH) tutucu bir üst tahmini olarak kullanılmaktadır. Ekstrem Deniz Durumu kapsamında, belirgin dalga yüksekliği ile maksimum dalga yüksekliği arasındaki farklara dikkat edilmelidir. Belirgin dalga yüksekliği, 3 saatlik bir deniz durumunda tüm dalgaların en yüksek üçte birlik kısmının ortalamasını temsil ederken, maksimum dalga yüksekliği aynı 3 saatlik süre içindeki en yüksek tek dalgayı ifade eder.

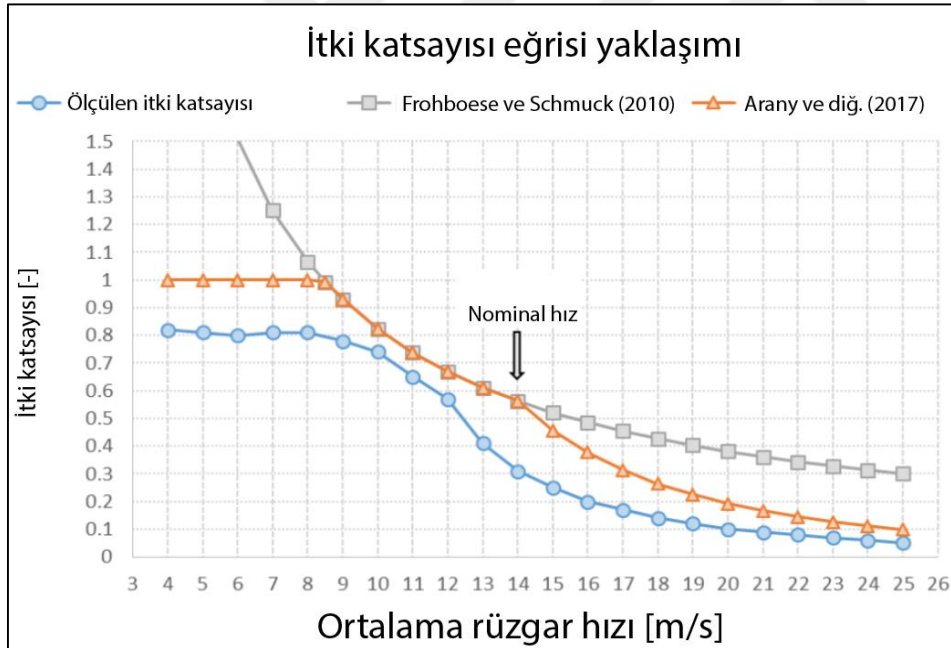
IEC – 61400 – 1 ve DNV (2014)'e göre 50 yıllık yinleme süresine sahip en şiddetli durumlar dikkate alınmalıdır; ancak bu, rüzgâr ve dalga için ayrı ayrı 50 yıllık tekrür süresini ifade etmez. Aşırı dalgalar ve yüksek rüzgâr hızları genellikle aynı anda meydana gelse de en yüksek rüzgar yükünün en yüksek rüzgar hızlarında ortaya çıkması beklenmez. Bunun nedeni şunlardır;

- Türbin kontrolü, nominal rüzgâr hızının üzerindeki yükleri azaltır.
- Güvenlik nedeniyle türbinler yüksek rüzgâr hızlarında kapatılır.

Boşta duran veya kapalı türbinler ile türbin kapama rüzgar hızına yakın çalışan türbinlerde, azaltılmış itme katsayısı nedeniyle nominal rüzgâr hızındaki itme kuvvetine kıyasla itme kuvveti önemli ölçüde azalır (Şekil 5.33 ve Şekil 5.34).



Şekil 5.33. Horns Rev deniz üzeri rüzgar türbininden ölçülen ve hesaplanan zemin kotundaki eğilme momenti değerleri, ölçülen değerler Hald ve diğ. (2009) tarafından verilmiştir (Arany ve diğ., 2017)



Şekil 5.34. Hald ve diğ. (2009) tarafından Horns Rev'deki Vestas V80 türbininde ölçülen ve yaklaşımda bulunulan itke katsayıları (Arany ve diğ., 2017)

En yüksek rüzgar yükü senaryo U – 3 tarafından, en yüksek dalga yükü ise senaryo W – 4 tarafından oluşturulmaktadır. Ancak pratikte, 50 yıllık aşırı rüzgar yükü ile 50 yıllık aşırı dalga yükünün aynı anda meydana gelme olasılığı çok düşüktür. Bu nedenle DNV (2014) standardı, bu aşırı yük durumlarının birlikte değerlendirilmesini zorunlu kılmamaktadır. Rüzgar ve dalga yüklerinin birleşik olasılığına dayalı olarak, 50 yıllık tekerrür süresine sahip

en şiddetli durumu belirlenmesi gerekmektedir. Bu çalışmada dört farklı senaryo için ayrı ayrı hesaplama Çizelge 5.8’de hesaplanmıştır.

Çizelge 5.8. Farklı senaryolar için dalga ve rüzgar yükleri

Dalga ve Rüzgar Yükleri							
		Rüzgar senaryosu		Dalga senaryosu		Kombine	Birim
E – 1	Kuvvet	U – 1	1,41	W – 1	3,84	5,23	MN
	Moment	U – 1	202,9	W – 1	70,0	272,9	MNm
E – 2	Kuvvet	U – 2	1,69	W – 4	8,75	10,44	MN
	Moment	U – 2	243,8	W – 4	201,0	444,8	MNm
E – 3	Kuvvet	U – 3	2,95	W – 2	6,93	9,88	MN
	Moment	U – 3	424,5	W – 2	143,4	567,9	MNm
E – 4	Kuvvet	U – 4	0,60	W – 4	8,75	9,35	MN
	Moment	U – 4	86,3	W – 4	201,0	287,3	MNm

Çizelge 5.8’den de görüleceği üzere rüzgar senaryosunda U – 3 senaryosu ve dalga senaryosunda ise W – 2 senaryosunun kombine biçimde ele alınması maksimum kuvvet ile momenti vermektedir. Bundan sonraki kısımda bu yüklerin nasıl hesaplandığı üzerinde durulacaktır.

Rüzgar yükü

Rotor seviyesindeki rüzgardan kaynaklı itki kuvveti Eş 5.9 ile ifade edilebilir.

$$Th = \frac{1}{2} \rho_{hava} A_R C_T U^2 \quad (5.9)$$

Burada, Th; rotor seviyesindeki rüzgar itki kuvveti, ρ_{hava} ; havanın yoğunluğu, A_R ; rotor alanı, C_T ; itki katsayısı ve U; rüzgar hızıdır. Rüzgar hızı çalışma başlangıç hızı ve kapama hızı aralığında belirli değerler alır (Şekil 5.34). Türbinin bu çalışma aralığında itme katsayısı üç farklı bölge için aşağıda verilen şekilde hesaplanır (Arany ve diğ., 2017).

- Çalışma başlangıç hızı ile nominal hız arasında itki katsayısı Frohboese ve Schmuck (2010) yöntemine göre Eş. 5.10 ile ifade edilir.

$$C_T = \frac{3,5 \left[\frac{m}{s} \right] \left(2U_R + 3,5 \left[\frac{m}{s} \right] \right)}{U_R^2} \approx \frac{7 \left[\frac{m}{s} \right]}{U_R} \quad (5.10)$$

- Nominal hızın üzerinde, pitch kontrolünün aktif olduğu bölgede, gücün sabit olduğu varsayımı yapılır ve itki katsayısı Eş. 5.11 ile tanımlanır.

$$C_T = 3,5 \left[\frac{m}{s} \right] U_R \left(2U_R + 3,5 \left[\frac{m}{s} \right] \right) \frac{1}{U^3} \approx 7 \left[\frac{m}{s} \right] \frac{U_R^2}{U^3} \quad (5.11)$$

- Frohboese ve Schmuck (2010) formülünde itme katsayısını fazla tahmin ettiğinde, değer 1 ile sınırlandırılır.

Rüzgar hızı yavaş değiştiğinde, itme kuvveti, rüzgar hızındaki değişimi takip eden pitch kontrolü ile ortalama itme eğrisini izler. Ancak ani bir rüzgar esintisi artışı, rotorun üzerine geldiğinde, pitch kontrolünün zaman sabiti bu ani değişimi takip edemeyebilir. Bu durumda, itme katsayısı önceki değerde kilitlenir.

Rüzgar hızı ortalama hız ve türbülanslı hız olmak üzere iki kısımda incelenebilir. Her bir yük durumu için bu bileşenler ayrı ayrı ele alınır ve toplamaları Eş. 5.12'deki gibi elde edilir.

$$U = \bar{U} + u' \quad (5.12)$$

Burada, $\bar{U}$; ortalama rüzgar hızı ve u' ; rüzgar hızının türbülans bileşenidir. Bu yaklaşımı kullanarak rüzgar yükü ortalama rüzgar yükü ve türbülans rüzgar yükü olarak Eş. 5.13'teki gibi hesaplanır.

$$Th = Th_{ortalama} + Th_{türbülans} = \frac{1}{2} \rho_a A_R C_T \bar{U}^2 + \frac{1}{2} \rho_a A_R C_T (2\bar{U}u' + u'^2) \quad (5.13)$$

Eş. 5.13'te itki katsayısı Eş. 5.10 ile hesaplanır.

Şekil 5.33, Vestas V80 türbini için Horns Rev açık deniz rüzgar türbininde ölçülen ortalama taban momentlerini ve Eş. 5.10 ile Eş. 5.12 arasındaki eşitliklere dayalı yaklaşımla karşılaştırır. Buradan aşağıdaki çıkarımlar yapılabilir;

- Maksimum itme kuvveti nominal rüzgar hızından önce (pitch kontrol aktif hale gelmeden hemen önce) meydana gelir.
- Gerçek ölçümlerde bu hız yaklaşık 11 m/s'dir, oysa teorik modelde maksimum değer 14 m/s'de kabul edilir ki aslında bu da güvenli bölgede kalınması için doğru bir yaklaşımdır.

Pitch kontrol mekanizmasının doğası ve türbinin itme katsayısı eğrisi erken tasarım aşamalarında genellikle bilinmemesinden kaynaklı, tasarım aşamasında, U_R değerinin kullanılması önerilir. Bu değer genellikle bilinir ve güvenli tasarım için bir ön değer sağlar (Arany ve diğ., 2017). Bu kısımdan sonraki kısımlarda rüzgar senaryoları için yapıya gelen yüklerin hesaplamaları ele alınacaktır.

U – 1: Nominal rüzgar hızında Normal Türbülans Modeli

Bu senaryo türbinin normal işletmesi için yükleme durumunu temsil eder. IEC – 61400 – 1 standardına göre normal türbülans koşullarında rüzgar hızının standart sapması Eş. 5.14 ile ifade edilir.

$$\sigma_{U,NTM} = I_{ref}(0,75U + b) ; b = 5,6 \text{ m/s} \quad (5.14)$$

Burada, $\sigma_{U,NTM}$; normal türbülans koşullarında rüzgar hızının standart sapması, I_{ref} , 15 m/s hızda referans türbülans yoğunluğunun beklenen değeri ve b; sabit bir katsayıdır. Maksimum türbülanslı rüzgar hızı bileşeni, u_{NTM} , değerinin hesaplanmasında, pitch kontrolünün zaman sabitinin rotorun dönüş süresiyle aynı olduğu varsayılır. Başka bir deyişle, pitch kontrolünün türbinin dönüş hızından daha düşük frekansta meydana gelen rüzgar hızındaki değişiklikleri takip edebildiği kabul edilir. Bu durumda, u_{NTM} , yüksek frekansta meydana gelen rüzgar hızı varyasyonlarının toplam rüzgar hızının standart sapmasına olan katkısının hesaplanmasıyla belirlenebilir. Rüzgar türbülansı sürecinde kullanılan Kaimal spektrumuna göre bu değer Eş. 5.15 ile hesaplanır.

$$\sigma_{U,NTM,f>f_{1P}} = \sqrt{\int_{f_{1P,max}}^{\infty} S_{uu}(f)df} = \sigma_{U,NTM} \sqrt{\frac{1}{\left(\frac{6L_k}{U_R} f_{1P,max} + 1\right)^{\frac{2}{3}}}} \quad (5.15)$$

Normal türbülans koşullarında, normal işletimde karşılaşılan türbülanslı rüzgar hızı, türbülans bileşeninin normal dağılımı varsayılarak ve %90 güven aralığı değerine bakılarak bulunur. Bu değer, Eş. 5.13'e yerleştirilirse Eş. 5.16 elde edilir.

$$u_{NTM} = 1,28\sigma_{U,NTM,f>f_{1P}} \quad (5.16)$$

Kuvvet ve moment değerleri ise Eş. 5.17 ile hesaplanır.

$$F_{wind,NTM} = \frac{1}{2}\rho_a A_R C_T (U_R + u_{NTM})^2 ; M_{wind,NTM} = F_{wind,NTM} (S + z_{göbek}) \quad (5.17)$$

U – 2: Nominal rüzgar hızında Ekstrem Türbülans Modeli

Ekstrem Türbülans Modeli, nominal rüzgar hızındaki rüzgar hızının standart sapmasını ve bu değerden yola çıkarak aşırı türbülans koşullarında normal işletimdeki maksimum rüzgar yükünü hesaplamak için kullanılır. ETM'deki rüzgar hızının standart sapması, IEC – 61400 – 1 standardına göre Eş. 5.18 ile ifade edilir.

$$\sigma_{U,ETM} = c I_{ref} \left[0,72 \left(\frac{u_{ort}}{3} \right) \left(\frac{U_R}{c} - 4 \right) + 10 \right] ; c = 2 \text{ m/s} \quad (5.18)$$

Burada, $\sigma_{U,ETM}$; ekstrem türbülans koşullarında rüzgar hızının standart sapması, u_{ort} ; ortalama rüzgar hızı ve c ; sabit bir katsayıdır. Maksimum türbülanslı rüzgar hızı bileşeni u_{ETM} önceki duruma benzer şekilde Eş 5.19 ile hesaplanır.

$$\sigma_{U,ETM,f>f_{1P}} = \sqrt{\int_{f_{1P,max}}^{\infty} S_{uu}(f)df} = \sigma_{U,ETM} \sqrt{\frac{1}{\left(\frac{6L_k}{U_R} f_{1P,max} + 1\right)^{\frac{2}{3}}}} \quad (5.19)$$

Ekstrem türbülans koşullarında, normal işletimde karşılaşılan türbülanslı rüzgar hızı, türbülans bileşeninin normal dağılımı varsayılarak bulunur. Normal türbülans durumlarından farklı olarak, burada %95 güven aralığı değeri kullanılır. Bu değer Eş 5.20 ile hesaplanır.

$$u_{ETM} = 2\sigma_{U,ETM,f>f_{1P}} \quad (5.20)$$

Kuvvet ve moment değerleri ise Eş. 5.21 ile hesaplanır.

$$F_{wind,ETM} = \frac{1}{2} \rho_a A_R C_T (U_R + u_{ETM})^2 ; M_{wind,NTM} = F_{wind,ETM} (S + z_{göbek}) \quad (5.21)$$

U – 3: Nominal rüzgar hızında ekstrem ani esinti senaryosu

Maksimum kuvvetin, maksimum ortalama itme kuvvetinin etkili olduğu ve 50 yıllık ekstrem ani esintinin rotor üzerine çarptığında meydana geldiği varsayılır. Bu ani rüzgar darbesi nedeniyle, rüzgar hızının çok hızlı değiştiği ve pitch kontrol sisteminin kanat açısını ayarlayacak zamanı olmadığı kabul edilir. Bu varsayım oldukça tutucu bir yaklaşımdır çünkü gerçekte pitch kontrolünün bir zaman sabiti vardır ve bu, kanat açısında bir miktar ayar yapılmasına olanak tanır.

50 yıllık ekstrem ani esinti hızının büyüklüğünün hesaplama yöntemi, DNV (2014) tarafından açıklanmıştır. Bu yöntem, sahadaki 10 dakikalık ortalama rüzgar hızlarının uzun vadeli dağılımına dayanır ve genellikle Weibull dağılımıyla temsil edilir. Kümülatif dağılım fonksiyonu (CDF) Eş. 5.22 ile ifade edilir.

$$\Phi_{U10}(K, s) = 1 - e^{-\left(\frac{U}{k}\right)^s} \quad (5.22)$$

Burada, Φ ; kümülatif dağılım fonksiyonu, k ; Weibull skala parametresi ve s ; Weibull şekil parametresidir. Bu dağılımda 1 yıllık rüzgar hızının kümülatif dağılımı Eş. 5.23'teki gibi elde edilir.

$$\Phi_{U_{10,1\text{ yıl}}}(K, s) = \Phi_{U_{10}}(K, s)^{52596} \quad (5.23)$$

Burada 52596, bir yıldaki 10 dakikalık zaman aralıklarının sayısını ifade eder. 50 yıllık aşırı rüzgar hızı, kümülatif dağılımda 0,98 olduğu rüzgar hızı olarak Eş. 5.24 ile belirlenir (yani, 1 yıllık 10 dakikalık ortalama rüzgar hızının %2 olasılıkla meydana gelmesi).

$$\Phi_{U_{10,50\text{ yıl}}} = K \left[-\ln \left(1 - 0,98^{\frac{1}{52596}} \right) \right]^{\frac{1}{s}} \quad (5.24)$$

Ekstrem ani rüzgar esintisi hızı, nominal rüzgar hızında Eş. 5.25 ile hesaplanır.

$$u_{EOG} = \min \left\{ 1,35(U_{10,1\text{ yıl}} - U_R); \frac{3,3\sigma_{U,c}}{1 + \frac{0,1D}{\Lambda_1}} \right\} \quad (5.25)$$

Eş. 5.25'teki parametrelerin hesaplanması ise Eş. 5.26 ve Eş. 5.27 ile yapılır.

$$\Lambda_1 = L_k/8 \quad (5.26)$$

$$\sigma_{U,c} = 0,11U_{10,1\text{ yıl}} \quad (5.27)$$

Burada, L_k ; integral uzunluk ölçeği ve $\sigma_{U,c}$; rüzgar hızının karakteristik standart sapmasıdır. Eş. 5.27'deki 1 yıllık rüzgar değeri ise Eş. 5.28 ile hesaplanır.

$$U_{10,1\text{ yıl}} = 0,8U_{10,50\text{ yıl}} \quad (5.28)$$

Bu eşitlikleri kullanarak kuvvet ve moment değerleri Eş. 5.29 ile bulunur.

$$F_{wind,EOG} = \frac{1}{2} \rho_a A_R C_T (U_R + u_{EOG})^2 ; M_{wind,EOG} = F_{wind,EOG} (S + z_{göbek}) \quad (5.29)$$

U – 4: Kapanma rüzgar hızında ekstrem ani esinti senaryosu

Bu yük durumu burada incelenmiştir çünkü içgüdüsel olarak türbinin en yüksek operasyonel rüzgar hızında çalışırken en yüksek yükleri oluşturması doğal görünebilir, ancak durum böyle değildir. Ekstrem ani esintinin en yüksek operasyonel rüzgar hızı olan kapanma rüzgar hızında neden olduğu rüzgar yükü, Frohboese ve Schmuck (2010) tarafından önerilen itme katsayısı ifadesinin artık geçerli olmadığı dikkate alınarak hesaplanır. Bu durumda itme katsayısı, pitch kontrolünün gücü sabit tuttuğu varsayımından belirlenir. Bu, itme kuvvetinin nominal rüzgar hızının üzerindeki hızlarda rüzgar hızı ile ters orantılı olduğu ve itme katsayısının rüzgar hızının küpü ile ters orantılı olduğu anlamına gelir (Eş. 5.30).

$$C_T = 7 \left[\frac{m}{s} \right] \frac{U_R^2}{U^3} \quad (5.30)$$

Kapanma rüzgar hızındaki aşırı işletim rüzgar darbesi hızı, farklı ortalama rüzgar hızları için değiştiğinden farklı olarak belirlenir. Kuvvet ve moment değerleri ise Eş. 5.31 ile hesaplanır.

$$F_{wind,U_{out}} = \frac{1}{2} \rho_a A_R C_T (U_{out} + u_{EOG,out})^2 ; M_{wind,U_{out}} = F_{wind,U_{out}} (S + z_{göbek}) \quad (5.31)$$

Dalga yükü

Dalga yük tahmini için kullanılan basitleştirilmiş bir yaklaşım, Morison Denklemi (Morison ve diğ., 1950) olarak bilinir. Bu denklemlerde, geçiş parçasının çapı, daha önce verildiği üzere, geçiş parçası ve dolgu kalınlıklarını hesaba katmak için Eş. 5.32 kullanılır.

$$D_S = D_P + 2t_{TP} + 2t_G \quad (5.32)$$

Dairesel geçiş parçası alanı bu çaptan hesaplanır. Bu çalışmada kullanılan yöntem, lineer (Airy) dalga teorisine dayanmaktadır. Dalga yüzey profili (η), yatay parçacık hızı (w) ve yatay parçacık ivmesi (w^*) Eş. 5.33 ile Eş. 5.35 arasındaki eşitlikler ile verilir.

$$\eta(x, t) = \frac{H_m}{2} \cos\left(\frac{2\pi}{T_s} - kx\right) \quad (5.33)$$

$$w(x, z, t) = \frac{\pi H_m \cosh(k(S + z))}{T_s \sinh(kS)} \cos\left(\frac{2\pi}{T_s} - kx\right) \quad (5.34)$$

$$w^*(x, z, t) = \frac{-2\pi^2 H_m \cosh(k(S + z))}{T_s^2 \sinh(kS)} \sin\left(\frac{2\pi}{T_s} - kx\right) \quad (5.35)$$

Burada, x ; yatay koordinat ve k ; dalga numarasıdır. Dalga numarası Eş. 5.36 ile bulunur.

$$\omega^2 = gk \tanh(kS) ; \omega = \frac{2\pi}{T_s} \quad (5.36)$$

Geçiş yapısının birim uzunluk üzerindeki kuvvet, sürüklenme kuvveti (F_s) ve atalet kuvvetinin (F_A) toplamıdır (Eş. 5.37).

$$\begin{aligned} dF_{dalga}(x, t) &= dF_s(z, t) + dF_A(z, t) \\ dF_{dalga}(x, t) &= \frac{1}{2} \rho_w D_s C_D w(z, t) |w(z, t)| + C_m \rho_{su} A_s w^*(z, t) \end{aligned} \quad (5.37)$$

Burada; dF_{dalga} ; birim uzunluğa gelen dalga kuvveti, C_D ; sürüklenme katsayısı, C_m ; atalet katsayısıdır.

Toplam yatay kuvvet ve zemin üst kotundaki moment integrasyon ile Eş. 5.38 ve Eş. 5.39 ile hesaplanır.

$$F_{dalga}(t) = \int_{-S}^{\eta} dF_s dz + \int_{-S}^{\eta} dF_A dz \quad (5.38)$$

$$M_{dalga}(t) = \int_{-S}^{\eta} dF_S(S + z_{göbek})dz + \int_{-S}^{\eta} dF_A(S + z_{göbek})dz \quad (5.39)$$

Sürüklenme ve atalet kuvvetlerinin maksimum değerleri farklı zamanlarda meydana gelir, bu nedenle maksimum değerler ayrı ayrı değerlendirilir. Maksimum atalet kuvveti $\eta = 0$ ve $t = 0$ anında (Eş. 5.40) meydana gelir. Maksimum sürüklenme yükü ise $\eta = H_m/2$ ve $t = T_s/4$ anında (Eş. 5.44) oluşur. Maksimum kuvvetler Eş. 5.38 ve Eş. 5.39'un integrasyonları ile hesaplanır.

$$F_{S,maksimum}(t) = \frac{1}{2} \rho_{su} D_S C_D \frac{\pi^2 H_s^2}{T_s^2 \sinh^2(kS)} P_S(k, S, \eta) \quad (5.40)$$

$$M_{S,maksimum}(t) = \frac{1}{2} \rho_{su} D_S C_D \frac{\pi^2 H_s^2}{T_s^2 \sinh^2(kS)} Q_S(k, S, \eta) \quad (5.41)$$

$$P_S(k, S, \eta) = \frac{e^{2k(S+\eta)} - e^{-2k(S+\eta)}}{8k} + \frac{S + \eta}{2} \quad (5.42)$$

$$Q_S(k, S, \eta) = \left(\frac{S + \eta}{8k} - \frac{1}{16k^2} \right) e^{2k(S+\eta)} - \left(\frac{S + \eta}{8k} + \frac{1}{16k^2} \right) e^{-2k(S+\eta)} + \left(\frac{S + \eta}{2} \right)^2 + \frac{1}{8k^2} \quad (5.43)$$

$$F_{A,maksimum}(t) = \frac{1}{2} \rho_{su} D_S^2 C_m \frac{\pi^3 H_s}{T_s^2 \sinh(kS)} P_A(k, S, \eta) \quad (5.44)$$

$$M_{A,maksimum}(t) = \frac{1}{2} \rho_{su} D_S^2 C_m \frac{\pi^3 H_s}{T_s^2 \sinh(kS)} Q_A(k, S, \eta) \quad (5.45)$$

$$P_A(k, S, \eta) = \frac{\sinh(k(S + \eta))}{k} \quad (5.46)$$

$$Q_A(k, S, \eta) = \left(\frac{S + \eta}{2k} - \frac{1}{2k^2} \right) e^{k(S+\eta)} - \left(\frac{S + \eta}{2k} + \frac{1}{2k^2} \right) e^{-k(S+\eta)} + \frac{1}{k^2} \quad (5.47)$$

Temel yüklerini elde etmek için kullanılan basitleştirilmiş yöntemde, sürüklenme ve atalet kuvvetlerinin maksimum değerlerinin toplamının tasarım olarak alınabilir fakat bu tutucu bir varsayımdır. Bunun sebebi ise sürüklenme kuvveti ile atalet kuvvetinin maksimumlarının farklı zaman dilimlerinde meydana gelmesindendir. Tüm dalga senaryoları, $(W - 1)$, $(W - 2)$, $(W - 3)$, $(W - 4)$, aynı prosedür kullanılarak değerlendirilir. Ancak bu prosedür uygulanırken farklı dalga yükseklikleri ve dalga periyotları kullanılır.

Bu yüklere ek olarak yanal kuvvet olarak akıntı türbinine gelen akıntı yükü ve dalga enerji üreticinin ankrajından gelen yanal yükler söylenebilir.

Akıntı türbinine gelen yük için itme kuvveti hesabı rüzgar türbinine gelen kuvvet hesabı ile benzerdir (Eş. 5.48).

$$F_{akıntı,itme} = \frac{1}{2} \rho_{su} A_R C_T u^2 ; M_{akıntı,itme} = F_{akıntı,itme} (z_{akıntı göbek}) \quad (5.48)$$

Akıntı türbininin kollarına gelen akıntıdan kaynaklanan kuvvet ise Eş. 5.49 ve Eş. 5.50 ile hesaplanır.

$$F_{türbin kolu,sürüklenme} = \frac{1}{2} \rho_{su} C_D D u |u| \quad (5.49)$$

$$M_{türbin kolu,sürüklenme} = F_{türbin kolu} (z_{türbin kolu})$$

$$F_{türbin kolu,atalet} = \frac{1}{2} (1 + C_a) A w^* \quad (5.50)$$

$$M_{türbin kolu,atalet} = F_{türbin kolu} (z_{türbin kolu})$$

Eş. 5.48 ve Eş. 5.49 ile yapılan hesaplamalar Çizelge 5.9 ile verilmiştir.

Çizelge 5.9. Hidrokinetik türbini gelen kuvvet ve moment değerleri

Hidrokinetik Türbin	
$F_{\text{türbin kolları, atalet}}$	0,06 MN
$M_{\text{türbin kolları, atalet}}$	0,82 MNm
$F_{\text{türbin kolları, sürüklenme}}$	0,63 MN
$M_{\text{türbin kolları, sürüklenme}}$	7,90 MNm
$F_{\text{akıntı, itme}}$	1,50 MN
$M_{\text{akıntı, itme}}$	21 MNm
$F_{\text{akıntı türbini}}$	2,19 MN
$M_{\text{akıntı türbini}}$	29,72 MNm

Türbin kollarına gelen kuvvetler ise Çizelge 5.10'daki gibi hesaplanmıştır.

Çizelge 5.10. Hidrokinetik türbin destek yapısına gelen kuvvet ve moment değeri

Hidrokinetik Türbin Destek Yapısına Gelen Kuvvet						
x (m)	D (m)	v (m/s)	Re (-)	C_D (-)	A (m ²)	F (N)
0	0,75	2,25	0,92213	1	0,945	2053,16
1,2	0,825		1,01434		1,035	2248,7
2,4	0,9		1,10656		1,125	2444,24
3,6	0,975		1,19877		1,215	2639,78
4,8	1,05		1,29098		1,305	2835,32
6	1,125		1,3832		1,395	3030,86
7,2	1,2		1,47541		1,485	3226,39
8,4	1,275		1,56762		1,575	3421,93
9,6	1,35		1,65984		1,665	3617,47
10,8	1,425		1,75205		1,755	3813,01
12	1,5		1,84426			0,05866 MN
						0,82 MN.m

Dalga enerjisi üretici yapıya ankraj ile bağlanacaktır. Dalga enerji üreticisine gelen kuvvetler aşağıdaki gibi özetlenebilir.

- Dalgadan kaynaklı direnç kuvveti

Dalga'nın orbital hızı nedeniyle dalga direnç kuvveti oluşmaktadır. Bu kuvvet Eş. 5.51 ile bulunur.

$$F_{dalga,sürüklenme} = \frac{1}{2} C_D A \rho_{su} u^2$$

$$u_x = \frac{\pi H \cosh[k(d+z)]}{T} \frac{1}{kd} \cos(kx - \sigma t)$$
(5.51)

Burada; u_x ; yatay dalga orbital hızıdır. Sürüklenme katsayısı, elemanın şekline, yüzey pürüzlülüğüne, Reynolds sayısına ve komşu elemanlar arasındaki ayrılma mesafesine bağlıdır (Balas ve diğ., 2012). Ayrıca akımın salınımının doğası nedeniyle Keulegan Carpenter katsayısı ile de bu değer değişmektedir. Silindirik bir yapı için $C_D = 1,0$ olarak alınır. Dikdörtgen kesitli elemanlar için sürüklenme katsayısı 1,3 ila 1,6 arasında değişmektedir (OCDI, 2002).

- Atalet kuvveti

Dalganın orbital ivmesinden dolayı atalet kuvveti oluşmaktadır (Balas ve diğ., 2012). Atalet kuvveti Eş. 5.52 ile bulunmaktadır.

$$F_{dalga,atalet} = C_m \rho_{su} V \frac{\partial u}{\partial t}$$

$$a_x = \frac{2\pi^2 H \cosh[k(d+z)]}{T^2} \frac{1}{\sinh(kd)} \sin(kx - \sigma t)$$
(5.52)

Burada, a_x ; yatay dalga orbital ivmesidir. Atalet direnç katsayısının belirlenmesi için farklı dalga teorileri, laboratuvar ve saha deneyleri yapılmıştır (Balas ve diğ., 2012). Bunların sonuçlarına göre SPM (Shore Protection Manual – Kıyı Koruma El Kitabı) Eş. 5.53'ü önermişlerdir (Coastal Engineering Research Center, 1984).

$$C_m = 2,0 ; Re < 2,5 \times 10^5$$

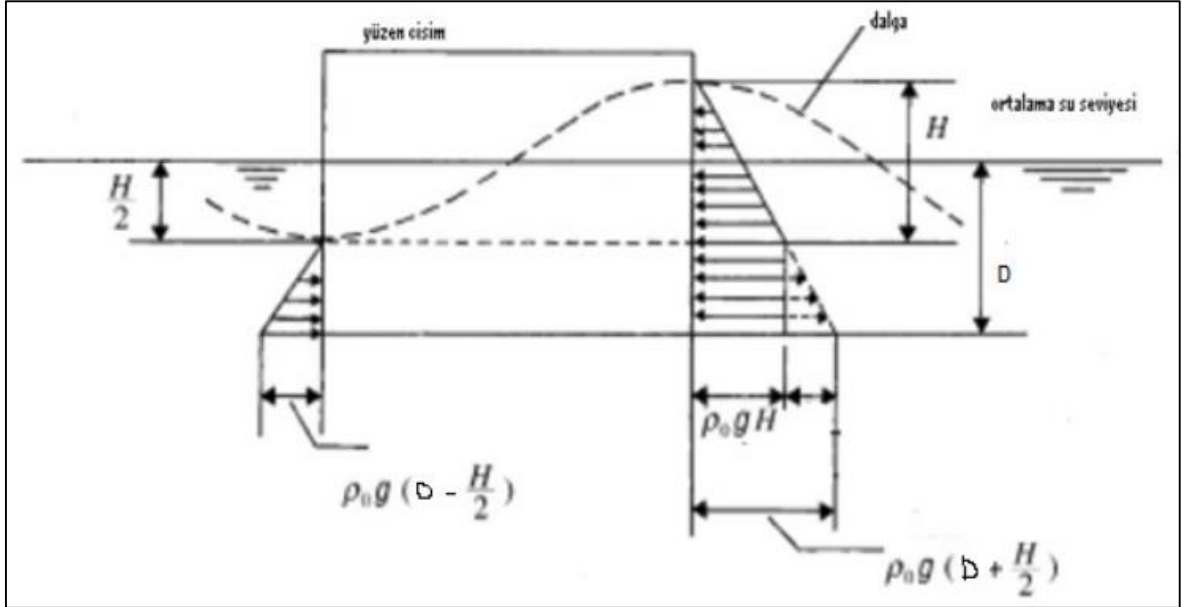
$$C_m = 2,5 - \frac{Re}{5 \times 10^5} ; 2,5 \times 10^5 < Re < 5 \times 10^5$$

$$C_m = 1,5 ; Re > 5 \times 10^5$$
(5.53)

Burada, Re ; Reynolds sayısıdır. MacCamy ve Fuchs (1954) kazık çapının dalga boyuna oranının küçük olduğu durumlarda $C_m = 2,0$ olarak kullanılabileceğini belirtmişlerdir.

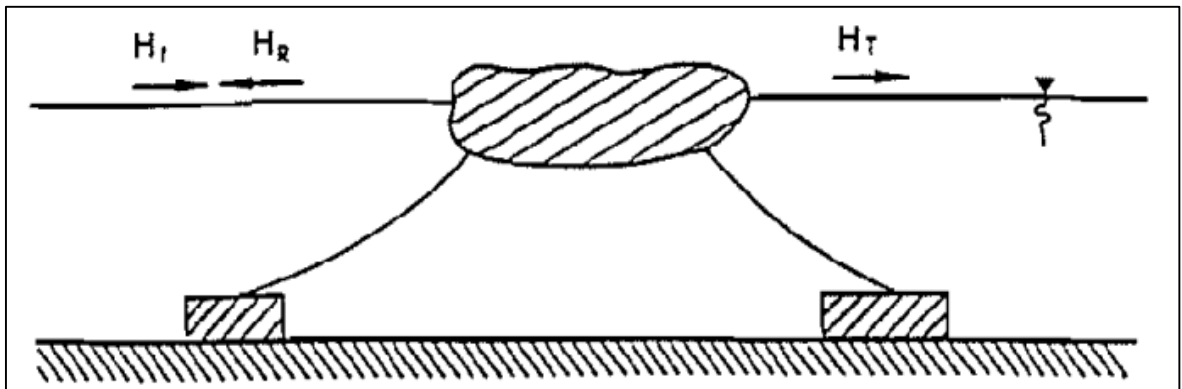
- Hidrostatik basınç kuvveti

Yüzen bir cisme etki eden hidrostatik basıncın dalga tepesindeki ve çukurundaki dalga dağılımı Şekil 5.35'deki gibidir (OCDI, 2002).



Şekil 5.35. Hidrostatik basınç dağılımı (OCDI, 2002)

Yüzen bir cismin arkasındaki dalga yüksekliği, dalga iletimi göz önünde bulundurularak hesaplanmaktadır. Gelen dalga yüksekliği H_I ile, yansıyan dalga yüksekliği H_R ile ve iletilen dalga yüksekliği H_T ile simgelenmekte ve C_R ile C_T sırasıyla yansıma ve iletim katsayıları olmak üzere Şekil 5.36 ile tonozlarla zemine sabitlenmiş yüzer bir yapıya etki eden dalgalar gösterilmektedir (PIANC, 1994).



Şekil 5.36. Dalga iletimi (PIANC, 1994)

Yansıyan ve iletilen dalga için hesaplamalar Eş. 5.54 ile yapılmaktadır.

Dolayısıyla yatay hidrostatik basınç Eş. 5.55 ile verilir.

$$\begin{aligned} H_R &= C_R H_i \\ H_T &= C_T H_i \end{aligned} \quad (5.54)$$

Dolayısıyla yatay hidrostatik basınç Eş. 4.55 ile verilir.

$$F_{hidrostatik\ basınç} = (P_1 - P_2) A_x \quad (5.55)$$

- Rüzgar sürüklenme kuvveti

Rüzgar sürüklenme kuvveti, yüzen yapının üzerine etki eder ve Eş. 5.56 ile hesaplanır.

$$F_{rüzgar} = \frac{1}{2} C_{Dw} \rho_{hava} v_w^2 A' \quad (5.56)$$

Burada; C_{Dw} ; rüzgar sürüklenme katsayısı, v_w ; rüzgar hızı ve A' ; rüzgarın sürüklemeye sebebiyet verdiği alandır. Rüzgar direnç katsayısı dikdörtgen kesite sahip elemanlar için 2,0 olarak verilmiştir (OCDI, 2002).

- Akıntı direnç kuvveti

Yüzen yapıya etki eden akıntı kuvveti Eş. 5.57 ile hesaplanır (Balas, 2012).

$$F_{akıntı\ direnç} = \frac{1}{2} C_D A_C \rho_{su} |U_{akıntı} - U| (U_{akıntı} - U) \quad (5.57)$$

Burada, $U_{akıntı}$; akıntı hızıdır.

Zincire etkiyen maksimum gerilme, bağlama ankrajına etkiyen düşey kuvvet, dubayla zincir arasındaki noktaya etkiyen düşen kuvvet, bağlama ankrajının tutma gücü Eş. 5.60 ile Eş. 5.63 arasında verilmiştir (Balas ve diğ., 2012).

$$T_c = P \sec \theta_2 \quad (5.60)$$

$$V_a = P \tan \theta_1 \quad (5.61)$$

$$V_b = P \tan \theta_2 \quad (5.62)$$

$$T_A = (T_c - w_* l) \quad (5.63)$$

Burada, T_c ; yüzen cismin zincire bağlama noktasındaki gerilme, P ; yatay dış kuvvet; θ_2 ; Zincirin, dubayla bağlama zinciri arasındaki noktayla yatay düzlem arasında yaptığı açı, θ_1 ; Zincirin, zincirle bağlama ankrajı arasındaki noktayla yatay düzlem arasında yaptığı açı, V_a ; bağlama ankrajına etkiyen düşey kuvvet, V_b ; dubayla zincir arasındaki noktaya etkiyen düşey kuvvet, T_A ; bağlama ankrajının tutma gücü, w_* ; birim uzunlukta batık zincir ağırlığı ve l ; zincirin uzunluğudur.

Normal çaptaki bir zincir yaklaşık olarak düz bir çizgi şeklinde kabul edildiğinde θ_2 , θ_1 ve K_h değerleri Eş. 5.64 ile Eş. 5.67 arasındaki eşitliklerle hesaplanır.

$$l = P/w^*(\tan \theta_2 - \tan \theta_1) \quad (5.64)$$

$$h = P/w^*(\sec \theta_2 - \sec \theta_1) \quad (5.65)$$

$$\theta_2 \cong \theta_1 = \sin^{-1}(h/l) \quad (5.66)$$

$$K_h = \sqrt{(l^2 - h^2)} \quad (5.67)$$

Burada, K_h ; zincirle duba arasındaki noktaya bağlama ankrajı arasındaki yatay mesafe ve h ; dubanın su altındaki derinliğidir. Dalga enerji üreteline gelen yükler Çizelge 5.11'deki gibi hesaplanmıştır.

Çizelge 5.11. Dalga enerji üreteline gelen kuvvetler

Dalga Enerji Üreteline Gelen Kuvvetler			
	Simge	Miktar	Birim
Gelen dalga yüksekliği	H_i	5,82	m
İletilen dalga yüksekliği	H_T	4,95	m
Dubanın altındaki su derinliği	h	23	m
Maksimum orbital hızı	U_{max}	2,21	m/s
Kesit alanı	A	50,4	m ²
Sürüklenme kuvveti	F_d	127,2	kN
Orbital ivmesi	a_x	1,51	m/s ²
Atalet kuvveti	F_i	894,8	kN
Yatay hidrostatik kuvvet	F_{hydx}	142,6	kN
Düşey hidrostatik kuvvet	F_{hydy}	2910	kN
Rüzgar direnç kuvveti	F_w	0,4	kN
Akıntı direnç kuvveti	F_c	12,4	kN
Dalga direnç kuvveti	F_{wave}	514	kN
Dubayla zincir arasındaki noktaya etkiyen düşey kuvvet	V_b	948	kN
Bağlama ankrajına etkiyen düşey kuvvet	V_a	948	kN
Yatay dış kuvvet	P	1690,9	kN

Düşey ölü yükler

Temele gelen toplam yük üzerindeki yapıların ağırlıkları toplamıdır (Eş. 5.68).

$$m = m_{RNA} + m_{kule} + m_{geçiş} + m_{kazık} \quad (5.68)$$

Burada, m_{RNA} ; rotor – nasel birleşiminin kütlesi, m_{kule} ; kulenin ana kütlesi (Eş. 5.69), $m_{geçiş}$; geçiş parçasının kütlesi (Eş. 5.70) ve $m_{kazık}$; zemin içerisindeki tekil kazığın kütlesidir (Eş. 5.71).

$$m_{kule} = \rho_{kule} D_{kule} \pi t_{kule} L_{kule} \quad (5.69)$$

$$m_{ge\i\i\i} = \rho_{ge\i\i\i} (D_{kazık} + 2t_g + t_{ge\i\i\i}) \pi t_{ge\i\i\i} L_{ge\i\i\i} \quad (5.70)$$

$$m_{kazık} = \rho_{kazık} D_{kazık} \pi t_{kazık} (L_{kazık} + L_{ge\i\i\i}) \quad (5.71)$$

Buradaki kütleler Çizelge 5.12'deki gibi elde edilmiştir.

Çizelge 5.12. Yapı parçalarının ağırlıkları

Kule kütlesi	673,65 ton
Geçiş parçası kütlesi	100, 00 ton
Tekil kazık kütlesi	558,83 ton

Tekil temelin nihai taşıma kapasitesi

Basitleştirilmiş bir yaklaşımla, kohezyonlu ve kohezyonsuz zeminlerde kazıkların yanal ve düşey taşıma kapasitesi, Broms (1964) yöntemine göre hesaplanabilir. Burada yalnızca yatay kapasite ele alınmaktadır, çünkü genelde tekil kazıklar için yatay yük ve devrilme momenti belirleyici sınırlamalardır. Bu gereklilikler sağlandığında düşey kapasite genellikle tatmin edicidir.

Zemin direncinin derinlikle doğrusal olarak arttığı (örneğin, bazı kohezyonsuz zeminler ve hafif aşırı konsolide kil) durumlarda, zeminin önce hasar gördüğü (kazıkta plastik mafsall oluşmadığı) varsayılarak kazıklı temelin yatay yük ve moment kapasitesi Eş. 5.72 ile ifade edilir.

$$F_R = \frac{0,5\gamma D_p L_p^3 K_p}{e + L_p} = \frac{3}{2} \gamma' D_p K_p f^2$$

$$K_p = \frac{1 + \sin \phi'}{1 - \sin \phi'}$$

$$M_R = F_R \left(e + \frac{2}{3} f \right)$$

$$f = 0,82 \sqrt{\frac{F_R}{D_p K_p \gamma}}$$
(5.72)

Burada, γ' ; derinlik boyunca sabit olduğu varsayılan kohezyonsuz zeminin batık birim hacim ağırlığı, e ; yük eksantrikliği, ϕ' ; içsel sürtünme açısının efektif değeri, M_R ; temelin moment taşıma kapasitesi ve F_R ; temelin yanal yük taşıma kapasitesidir.

Temelin rijitliği

Basitleştirilmiş hesap çerçevesinde, temel rijitliğini hesaba katmak için, daha önce de belirtildiği üzere, üç yaylı bir yaklaşım önerilmiştir. Bu yaklaşım, Zaaier (2006), Adhikari ve Bhattacharya (2011), Lombardi ve diğ. (2013), Zania (2014), Damgaard ve diğ. (2014) ve Arany ve diğ. (2015) gibi çalışmalara dayanmaktadır (Arany ve diğ., 2017). Temel rijitlik parametreleri aşağıdaki gibi sıralanabilir.

- K_V ; düşey rijitlik,
- K_L ; yanal rijitlik,
- K_R ; dönme rijitliği,
- K_{LR} ; çapraz rijitlik

Bu rijitliklerin hesaplanması için gerekli girdiler şunlardır.

- a. Kazık boyutları,
- b. Zemin profili (derinlikle zemin rijitliğinin değişimi),
- c. Kazık çapı kadar derinlikteki zemin rijitliği (E_{s0})

Alternatif olarak, zemin yatak katsayısı k_h veya bunun derinlikle değişim oranı n_h ile tanımlanabilir.

Kazık başındaki zemin rijitliğinin hesaplama sürecindeki ilk adım, kazık davranışının sınıflandırılmasıdır. Kazık uzun esnek bir kazık mı yoksa kısa rijit bir kazık mı davranışı gösterecek. Ardından belirli eşitlikler kullanılarak K_L , K_R ve K_{LR} değerleri belirlenir. Düşey rijitlik (K_V), yapı düşeyde çok rijit olduğundan basitleştirilmiş hesaplamalar için genellikle gerekli değildir (Arany ve diğ., 2017).

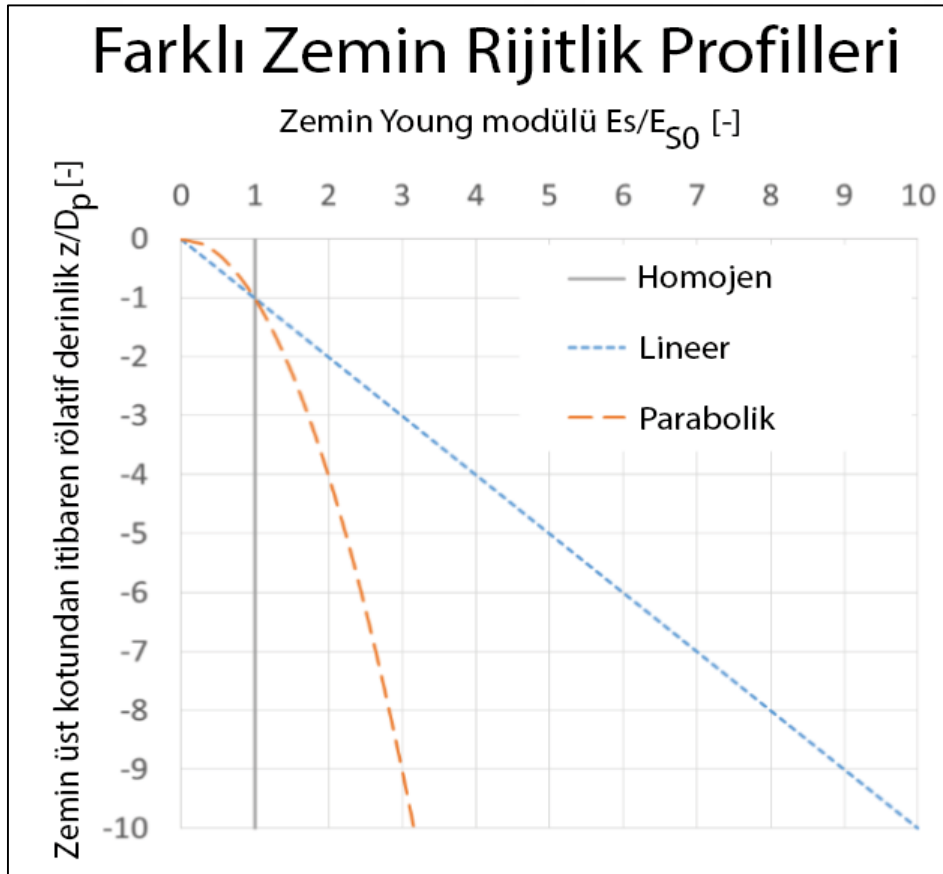
Daha önce de bahsedildiği üzere zemin rijitliği iki parametre ile tanımlanabilir. Bunlar;

- E_{s0} ,
- Zemin profili

Zemin rijitlik profili Eş. 5.73 ile hesaplanır.

$$E_s(z) = E_{s0} \left(\frac{|z|}{D_p} \right)^n \quad (5.73)$$

Burada, E_s ; zemin elastisite modülü, n ise homojen zemin profili için $n = 0$, doğrusal değişim için $n = 1$ ve parabolik değişim için $n = 0,5$ değeri alan fonksiyon üstel değeridir (Şekil 5.38).



Şekil 5.38. Farklı zemin rijitlik profilleri (Arany ve diğ., 2017)

Analitik çözümler, genel durumlar için yatak katsayısı yaklaşımıyla nadiren elde edilebilir, ancak rijit ve esnek kazıklar için basitleştirilmiş ifadeler mevcuttur (Poulos ve Davis 1980). Temel yüklerini (yanal yük F_x ve eğilme momenti M_y) kazık başının deformasyonu (ρ) ve kazık başının dönmesi (θ) ile ilişkilendirmek için çeşitli yaklaşımlar geliştirilmiştir. Bu

ifadeler, kuvvet – tepki ilişkisinin üçlü yay (K_L , K_{LR} , K_R) formunda kolayca matris biçimine dönüştürülebilir (Eş. 5.74).

$$\begin{bmatrix} F_x \\ M_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_L & K_{LR} \\ K_{LR} & K_R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \rho \\ \theta \end{bmatrix} \quad (5.74)$$

Deformasyonlar ise Eş. 5.75 ve Eş. 5.76 ile hesaplanır.

$$\rho = \frac{K_R}{K_L K_R - K_{LR}^2} F_x - \frac{K_{LR}}{K_L K_R - K_{LR}^2} M_y \quad (5.75)$$

$$= -\frac{K_{LR}}{K_L K_R - K_{LR}^2} F_x + \frac{K_L}{K_L K_R - K_{LR}^2} M_y \quad (5.76)$$

Üçlü yaylar için Eş. 5.57 ve Eş. 5.75'teki katsayılar kazığın uzun, narin veya kısa, rijit olmasına göre Çizelge 5.13 ve Çizelge 5.14'ten alınır.

Çizelge 5.13. Uzun, narin kazıklar için rijitlik katsayıları (Arany ve diğ., 2017)

K_L	K_{LR}	K_R
Poulos ve Davis (1980)'e göre homojen zemin rijitlik profilinde, ($n = 0$)		
$\frac{k_h D_p}{\beta}$	$-\frac{k_h D_p}{\beta^2}$	$\frac{k_h D_p}{2\beta^3}$
Poulos ve Davis (1980)'e göre homojen olmayan lineer zemin rijitlik profilinde, ($n = 1$)		
$1,074n_h^{3/5}(E_p I_p)^{2/5}$	$-0,99n_h^{2/5}(E_p I_p)^{3/5}$	$1,48n_h^{1/5}(E_p I_p)^{4/5}$

Çizelge 5.14. Kısa, rijit kazıklar için rijitlik katsayıları (Arany ve diğ., 2017)

K_L	K_{LR}	K_R
Poulos ve Davis (1980)'e göre homojen zemin rijitlik profilinde, ($n = 0$)		
$k_h D_p L_p$	$-\frac{k_h D_p L_p^2}{2}$	$\frac{k_h D_p L_p^3}{3}$
Poulos ve Davis (1980)'e göre homojen olmayan lineer zemin rijitlik profilinde, ($n = 1$)		
$\frac{1}{2} L_p^2 n_h$	$-\frac{1}{3} L_p^3 n_h$	$\frac{1}{4} L_p^4 n_h$

Burada, β parametresi Eş. 5.77 ile ifade edilmiştir.

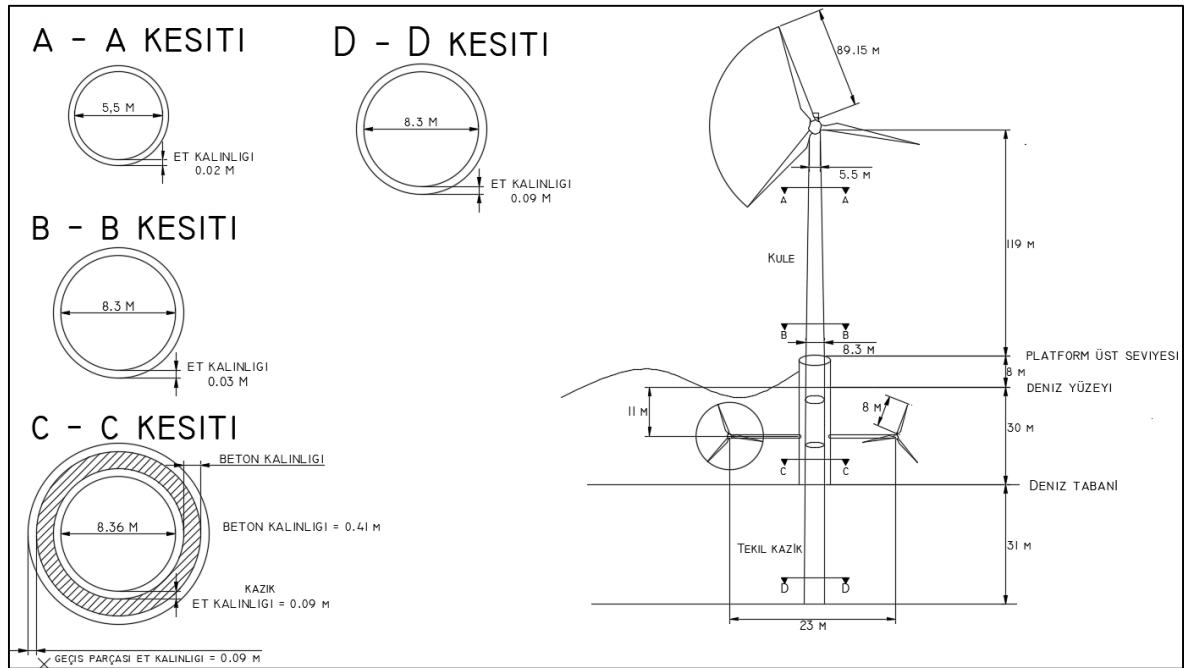
$$\beta = \sqrt[4]{\frac{k_h D_p}{E_p I_p}} \quad (5.77)$$

Bu kısımda her bir başlık altında yapılan hesaplamalar neticesinde kombine hibrit sistemin geometrik değerleri Çizelge 5.15'te verilmiştir.

Çizelge 5.15. Kombine hibrit sistemin geometrik özellikleri

Kanat	Rotor çapı	178,332 m	(Çizelge 4.6)
	Uzunluk	86,366 m	
Göbek ve nasel	Göbek çapı	5,6 m	
	Göbek yüksekliği	119 m	
Kule	Tepe çapı	5,5 m	
	Taban çapı	8,3 m	
	Tepe kalınlığı	0,019 m	
	Taban kalınlığı	0,038 m	
Kazık	Duvar kalınlığı	0,09 m	Eş. 5.1
	Gömülü derinliği	31 m	Eş. 5.6
	Platform yüksekliği	38 m	Eş. 5.7
	Geçiş yapısı çapı	0,41 m	Eş. 5.8
	Geçiş yapısı duvar kalınlığı	0,09 m	Eş. 5.1

Çizelge 5.15'teki değerlere göre kombine hibrit sistem Şekil 5.39'daki gibi elde edilmiştir.



Şekil 5.39. Kombine türbin sisteminin ana taşıyıcı unsurları ve detayları

Dalga enerji üretici ile tüm sistemin görselleştirmiş hali ise Şekil 5.40’de verilmiştir.



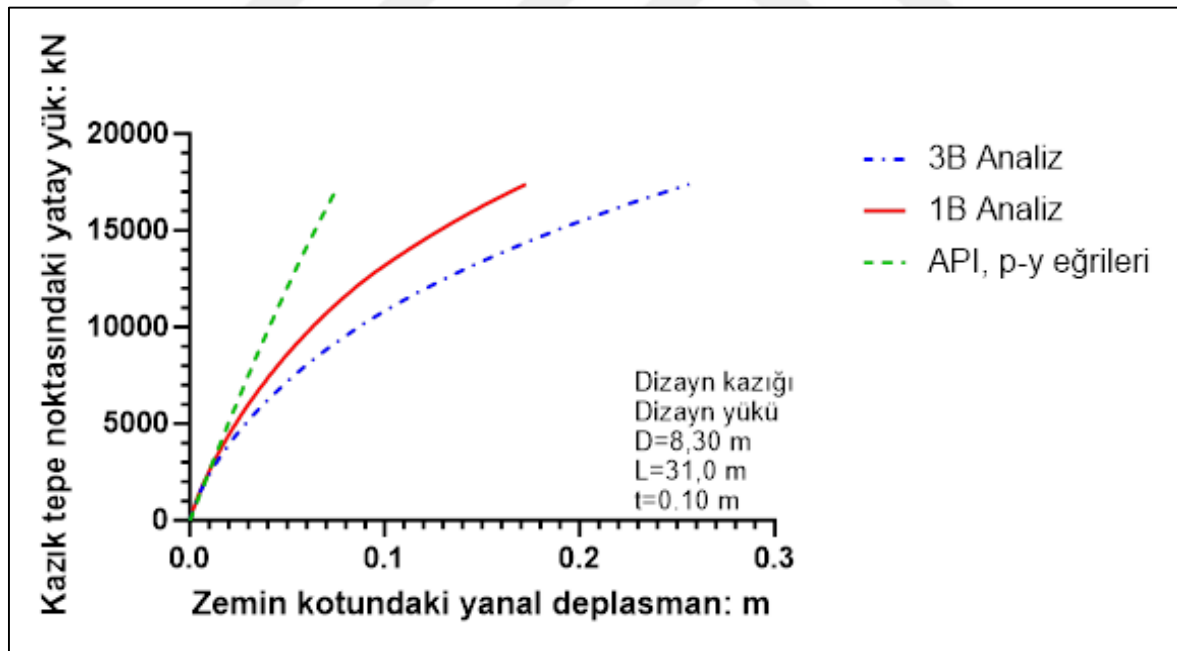
Şekil 5.40. Kombine sistemin görselleştirilmiş hali

Bu kısımda anlatılan basitleştirilmiş deformasyon analizi yöntemi, daha önce anlatılan 3 boyutlu sonlu elemanlar analiz yöntemi, 1 boyutlu model ve $p - y$ eğrileri ile yapılan analizlerin sonuçları Çizelge 5.16’da verilmiştir.

Çizelge 5.16. Analiz yöntemlerine göre dönme ve deformasyon miktarlarının mukayeseleri

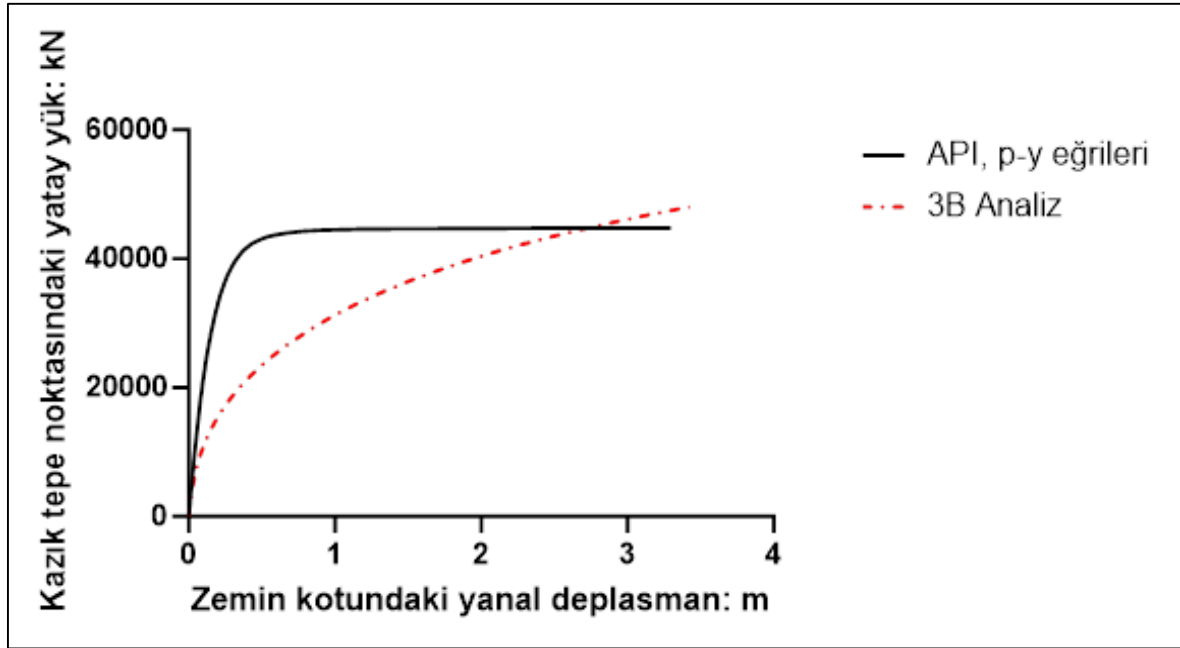
Analiz yöntemi	Deformasyon	Dönme
Basitleştirilmiş üç yay, Poulos ve Davis (1980)	0,19 m	0,52°
$p - y$ eğrileri, API (2014)	0,08 m	0,28°
1B Analiz, Bryne ve diğ. (2015)	0,17 m	0,48°
3B Analiz, PLAXIS 3D	0,26 m	0,59°

Çizelge 5.16’dan da görüleceği üzere $p - y$ eğrileri en az deformasyon ve dönme değerlerini verirken PLAXIS 3D ortamında yapılan üç boyutlu analizlerden elde edilen sonuçlarda deformasyon ve dönme değerleri maksimum değeri almıştır (Şekil 5.41).



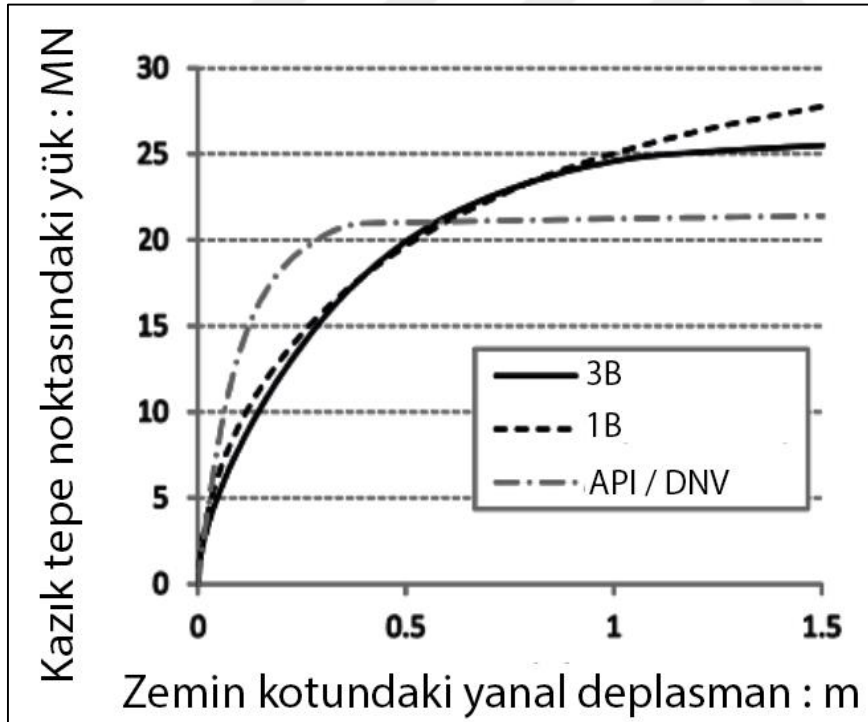
Şekil 5.41. Nihai limit durumu için analiz yöntemlerinden elde edilen deplasman sonuçları

Bu sonuç daha önce anlatıldığı üzere yöntemlerin farklılığından kaynaklı beklenen bir durumdur. Bu davranış farklılığı söz konusu bu yükleme artırıldığında Şekil 5.42’deki gibi daha belirgin hale gelir.



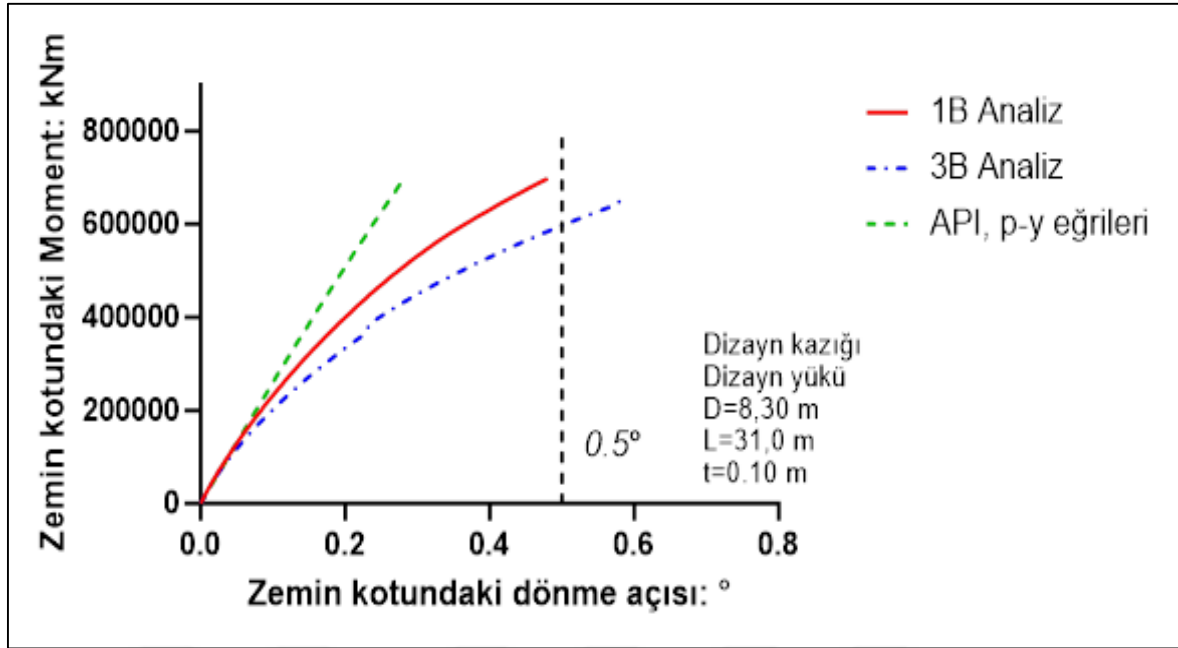
Şekil 5.42. API p – y eğrileri ile 3B analiz sonuçları arasındaki farklılıklar

Bu farklılık Bryne ve diğ. (2015) çalışması ile tutarlılık göstermektedir (Şekil 5.43).



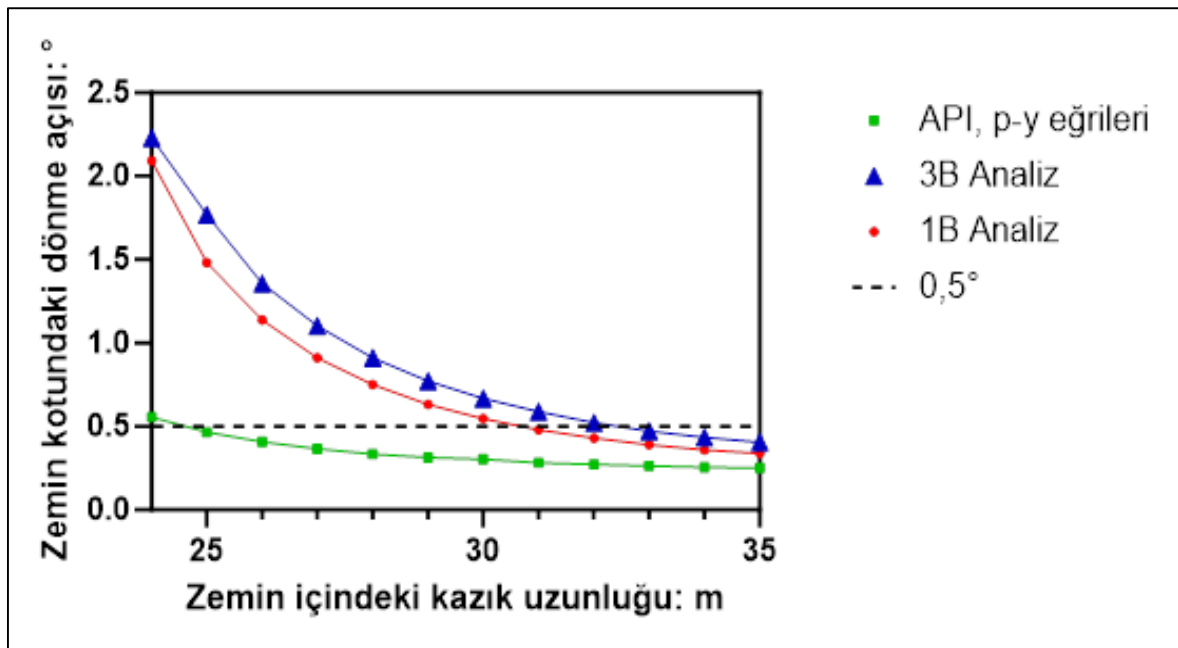
Şekil 5.43. Kısa kazıklarda analiz yöntemlerinde kazık davranışları (Bryne ve diğ., 2015)

Kazık dönme analizinden elde edilen sonuçlar ise Şekil 5.44'de verilmiştir.



Şekil 5.44. Servis limit durumu için analiz yöntemlerinden elde edilen deplasman sonuçları

Şekil 5.44'deki 0,5° daha önce belirtildiği üzere göçme kriteridir. Dolayısıyla Şekil 5.44'den de görüleceği üzere 3B PLAXIS analizine göre dönme analizinde göçme durumu meydana gelmektedir. Gömülü kazık derinliğinin artması mukavemeti arttıracığından gömülü kazık derinliği arttırılarak göçme durumundan uzak durulacak gömülü kazık derinliği Şekil 5.45'te verilmiştir.



Şekil 5.45. Kritik göçme derinliği ile gömülü kazık derinliği arasındaki bağıntı

API p – y eğrileri, kazık için en düşük dönme değerlerini sürekli olarak tahmin etmektedir; bu, daha rijit bir zemin-kazık tepkisini işaret edebilir. 0,5°deki kesik çizgi kabul edilebilir dönme için bir eşik değeri temsil eder ve tüm yöntemler belirli bir gömülü uzunlukta bu sınırın altında birleşir (Şekil 5.45). Servis limit durumu 3B analizi, gereken kazık uzunluğunu 33 metre olarak belirlemiştir. Kritik derinlikler nihai limit durum analizi için 3B analizde 25 metre, 1B analizde 24 metre ve p – y eğrileri için 22 metre olarak hesaplanmıştır. Servis limit durumu için ise, 3B analizde kritik derinlik 33 metre, 1B analizde 31 metre ve p – y eğrileri için 25 metre olarak belirlenmiştir. Burada belirleyici mekanizma servis limit durumu için 3B analizi olup, kazık derinliği 33 metre olarak belirlenmiştir. Ayrıca, Arany ve diğerleri (2017) tarafından yapılan öneri, basitleştirilmiş üçlü yay yöntemi, izlenerek, kazık gömme derinliği elde edilen sonuçlarda 31 metre olarak bulunmuştur. Bu değer, 3B analizden ve p – y eğrilerinden türetilen değerler arasında bir konumda yer almaktadır.

5.4. Monte Carlo Simülasyonu ile Temel Tasarımı

Zemin belirsizliği, geoteknik mühendisliği ve zemin mekaniği alanında, yapıların güvenliği ve performansı üzerinde önemli etkiler yaratan kritik bir parametredir. Doğal zemin malzemelerinin heterojen yapısı, sınırlı arazi araştırmaları ve ölçüm yöntemlerinin doğasından kaynaklanan belirsizlikler, mühendislik analizlerinde ve tasarım kararlarında dikkate alınması gereken bir dizi belirsizlik faktörüne neden olur. Bu belirsizlik, zemin özelliklerinin mekansal ve istatistiksel varyasyonu ile ilişkilidir ve proje sahasında elde edilen verilerin doğruluğuna, kapsamına ve modellenmesine bağlı olarak değişir. Monte Carlo simülasyonu gibi istatistiksel yöntemler, bu belirsizliğin etkilerini anlamak, değerlendirmek ve yönetmek için güçlü bir araç sağlar. Özellikle mühendislik uygulamalarında, zemin belirsizliğinin modellenmesi ve analiz edilmesi, yapıların performansını optimize etmek ve riskleri minimize etmek için kritik öneme sahiptir (Williams ve diğ., 1998; Balas ve Koç, 2002; Ergin ve Balas, 2006; Korçak ve Balas, 2020). Bu çalışmada da zemin belirsizlikleri Monte Carlo Simülasyonu ile modellenip analizler yapılacaktır.

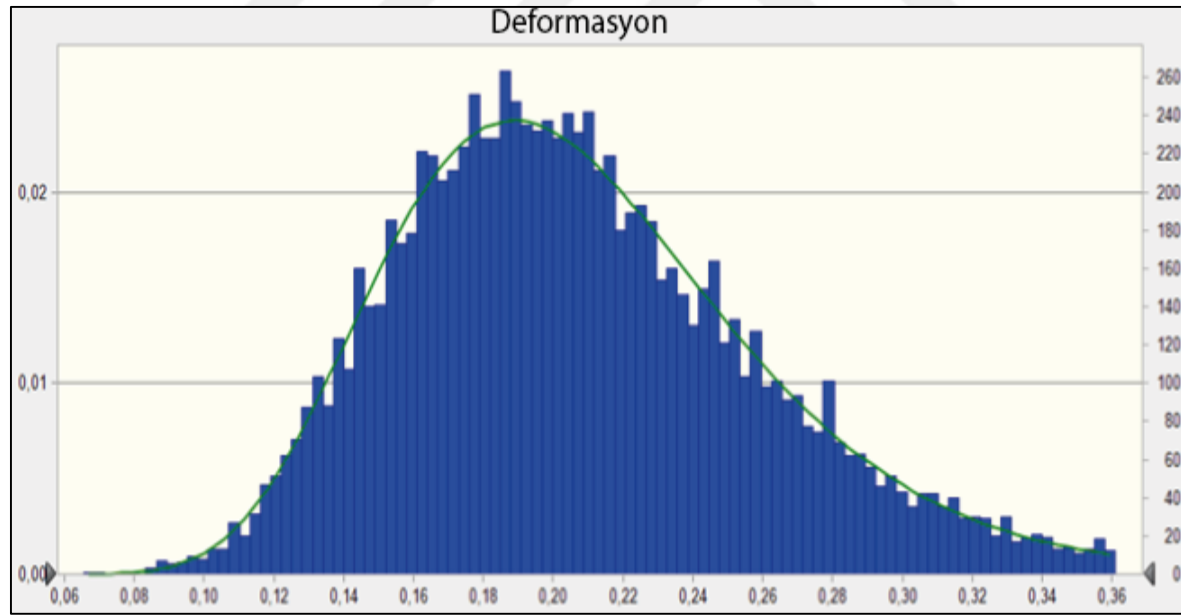
Hesaplanan deformasyon ve dönme değerleri, bu noktaya kadar Arany ve diğerleri (2017) tarafından önerilen basitleştirilmiş üçlü yay yöntemine göre elde edilen sonuçların maksimum ve minimum değerler arasında kaldığını göstermiştir. Bu nedenle basitleştirilmiş üçlü yay yöntemine göre MCS analizi yapmak hem hızlı hem de mantıklı gözükmemektedir.

MCS analizi için bir kod Excel ortamında yazılmış ve Oracle Crystal Ball eklentisi kullanılarak çalıştırılmıştır. Bu sayede, stokastik değişkenlere dayalı anlamlı deformasyon ve dönme değerleri elde edilmiştir. MCS analizinde stokastik değişkenlerin belirlenmesinde Yeter ve diğ., (2019) ile Orakçı ve diğ., (2023) tarafından yapılan çalışmalar dikkate alınmıştır (Çizelge 5.17).

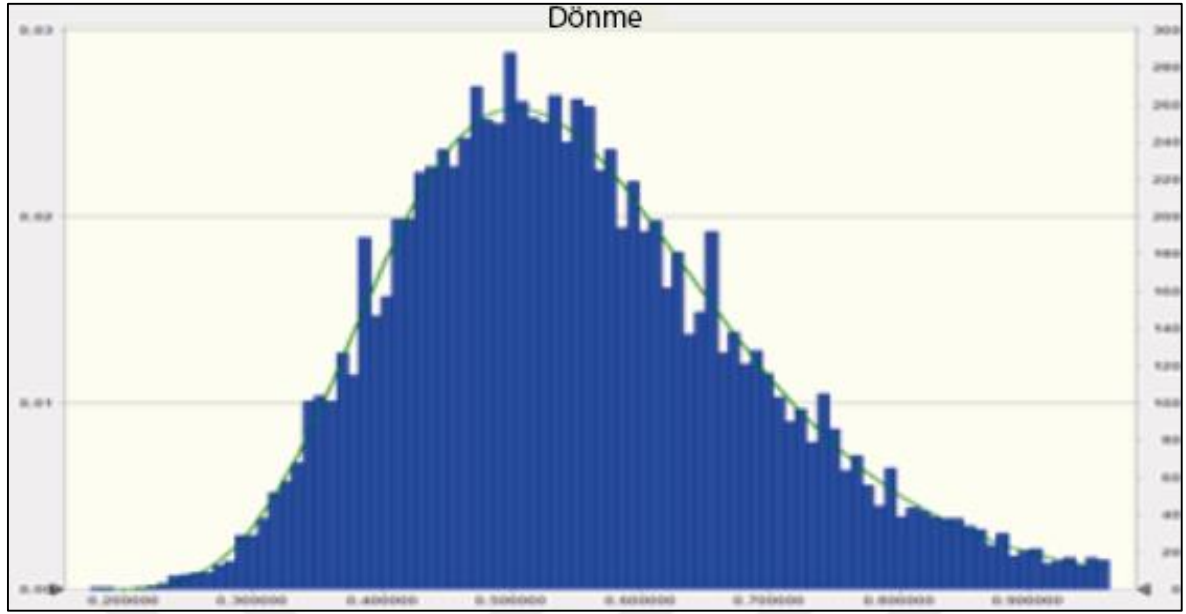
Çizelge 5.17. MCS analizi için stokastik değişkenler

Değişken	Dağılım türü	Ortalama	Standart sapma
Zemin batık birim hacim ağırlığı	Lognormal	9,99 kN/m ³	2,50
Zemin içsel sürtünme açısı	Normal	34,25°	6,85
Zemin yatak katsayısı modülü	Lognormal	4848 kN/m ³	1212
Çeliğin elastisite modülü	Lognormal	210 GPa	42
Çeliğin yoğunluğu	Lognormal	8500 kg/m ³	850

Çizelge 5.17'deki verilerle MCS analizinden elde edilen deformasyon ve dönme için kümülatif olasılık dağılımı grafikleri sırasıyla Şekil 5.46 ve Şekil 5.47'te verilmiştir.

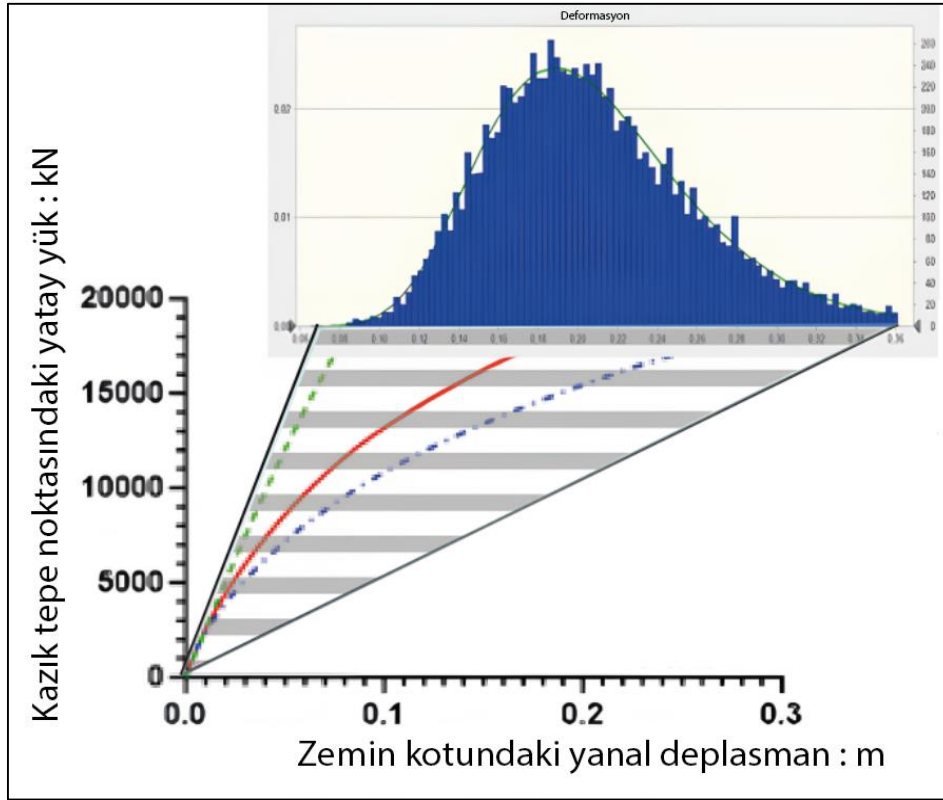


Şekil 5.46. Deformasyon değerlerinin olasılık yoğunluk fonksiyonu



Şekil 5.47. Dönme değerlerinin olasılık yoğunluk fonksiyonu

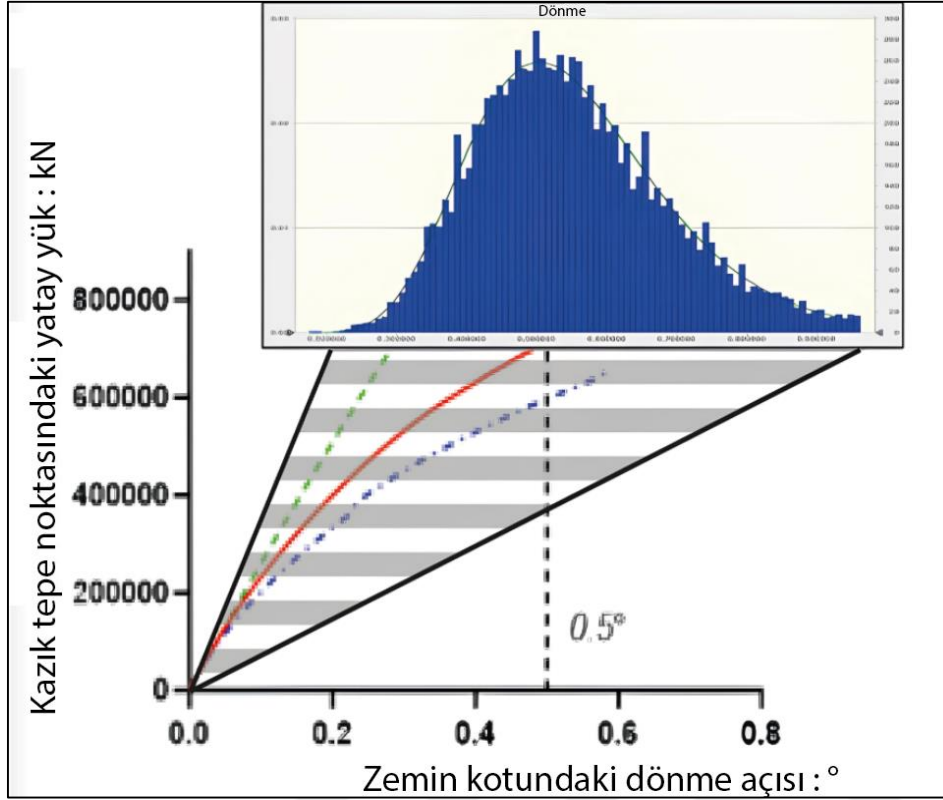
Şekil 5.46 ve Şekil 5.47'ten görüldüğü üzere hem deformasyonlar hem de dönmeler belirli bir ölçüde ortalama değerlerin etrafında rastgele dağılmıştır. Deformasyon değerleri 0,06 m ile 0,36 m arasında değişkenlik göstermektedir. Bu değerleri Şekil 5.48'daki gibi deformasyon eğrilerine yerleştirildiğinde görsel anlamda daha anlamlı sonuçlar elde edilebilmektedir.



Şekil 5.48. Farklı analizlerden elde edilen sonuçlar ve basitleştirilmiş üçlü yay yöntemine MCS uygulanmasıyla elde edilen zarf eğrisinin birlikte gösterilmesi

Şekil 5.48’da gölgeli alan, MCS analizinden elde edilen sonuçların aralığını temsil eder ve bu aralık üç çözüm sistemini de kapsamaktadır. Dolayısıyla, bu çalışmada Arany ve diğerleri (2017) tarafından önerilen basitleştirilmiş üçlü yay analizinde MCS uygulanması, zemin seviyesindeki deformasyonları tahmin etmede oldukça faydalı ve doğru bir yaklaşım sunmaktadır.

Benzer şekilde, dönme için de bir grafik çizilebilir. Şekil 5.49, Şekil 5.48 ile benzer özellikler taşımaktadır. MCS analizleri çalışma boyunca tartışılan üç yöntemi de kapsamaktadır (Şekil 5.49).

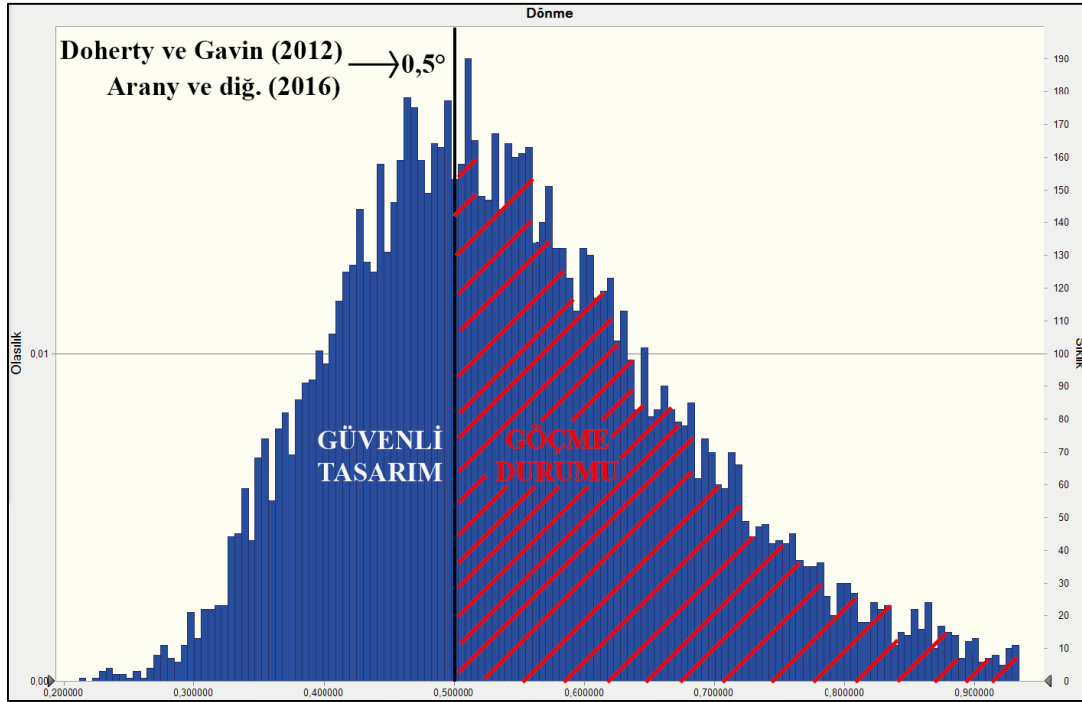


Şekil 5.49. Farklı analizlerden elde edilen sonuçlar ve basitleştirilmiş üçlü yay yöntemine MCS uygulanmasıyla elde edilen zarf eğrisinin birlikte gösterilmesi

Göçme durumu için daha önce de belirtildiği üzere literatürde zemin kotundaki dönme açısı olarak $0,5^\circ$ verilmiştir (Doherty ve Gavin, 2012; Arany ve diğ., 2016). Dolayısıyla $0,5^\circ$ 'nin yukarısı göçme durumu olarak değerlendirilmektedir. Göçme olasılığı ise göçme durumunu aşan dönmelerin tüm simülasyondan elde edilen sonuçlara oranıyla bulunur. Bir başka deyişle Şekil 5.50'de kırmızı çizgiyle taralı alanın tüm alana oranı göçme olasılığı (probability of failure) değerini verir (Eş. 5.78).

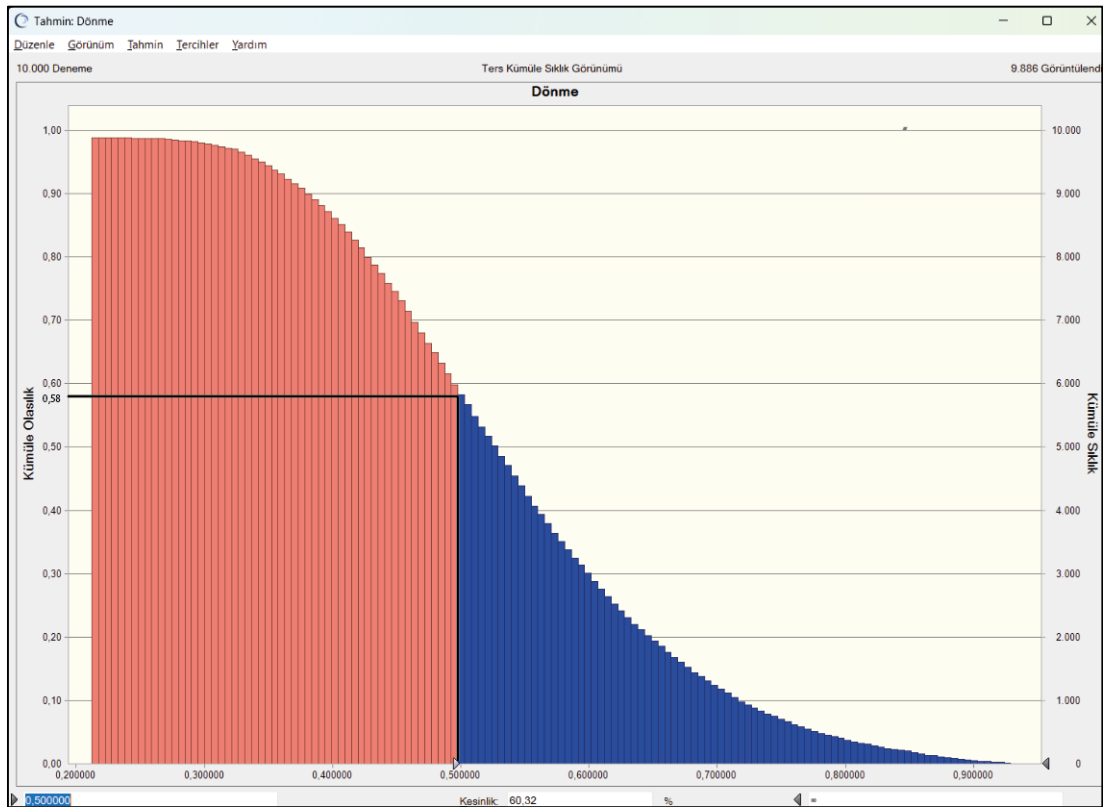
$$\text{Göçme olasılığı} = \frac{\text{Simülasyondan elde edilen göçme durumu sayısı}}{\text{Simülasyondan elde edilen sonuç sayısı}} \quad (5.78)$$

$$\text{Göçme olasılığı} = \frac{\text{Göçme durumu alanı}}{\text{Tüm alan}}$$



Şekil 5.50. Göçme durumunun MCS simülasyon sonucunda gösterimi

Şekil 5.50'in ters kümülatif sıklığından bu alan değeri bulunabilir (Şekil 5.51).



Şekil 5.51. MCS simülasyonundan elde edilen sonucun ters kümüle sıklığı

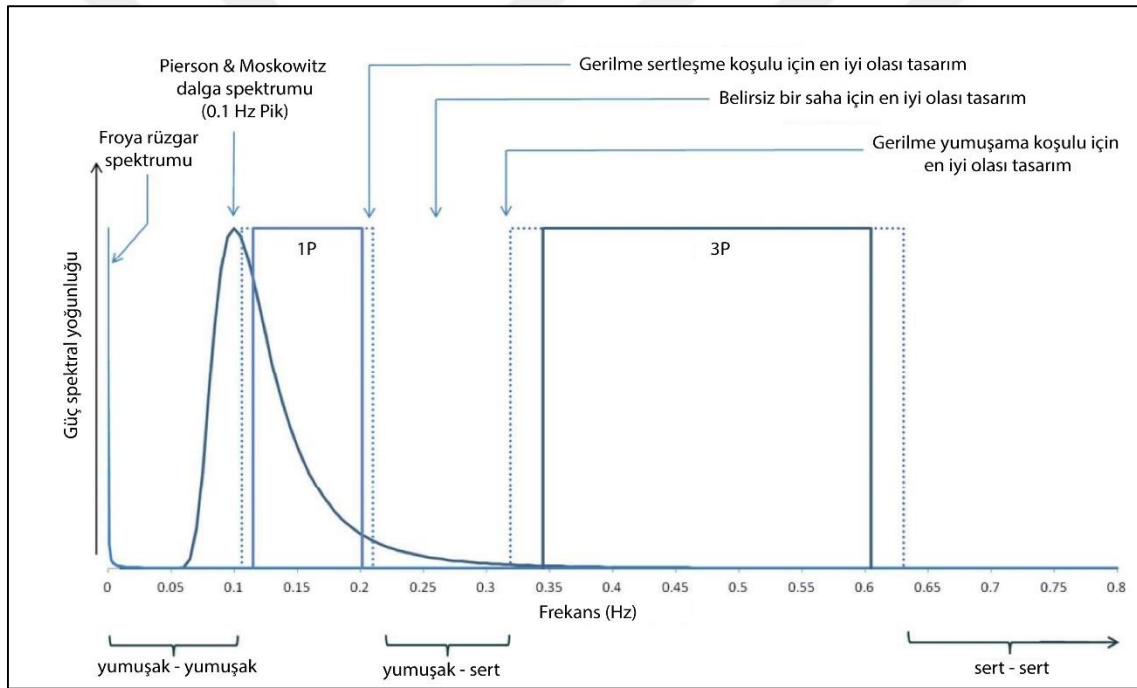
Dolayısıyla göçme olasılığı (probability of failure) ön tasarım için %58 olarak elde edilir. Kombine hibrit sistemin nihai tasarımında MCS analizi uygulanarak göçme ihtimali (probability of failure) yeniden değerlendirilerek tasarım seviyesine düşürülecektir.



6. KOMBİNE ADRES TASARIMI : DOĞAL FREKANS ANALİZİ

Deniz üzeri rüzgâr türbinlerinde yapının doğal frekans analizi önem taşımaktadır. Açık deniz rüzgâr enerji santralleri ekonomik ömürleri boyunca dalga, rüzgâr ve akıntı yükleri gibi birçok tekrarlayan yüke maruz kalmaktadırlar. Tekrarlayan bu yükler esnasında yapının doğal frekansıyla, gelen bu yüklerin frekanslarının aynı olması durumunda rezonans oluşur ve bu da yapıya ağır hasarlar vererek yıkıma sebebiyet verebilir.

Rüzgâr, dalga ve rüzgâr türbini rotorlarının alt ve üst çalışma frekansları genel olarak Bhattacharya (2014) tarafından Şekil 6.1'deki gibi verilmiştir.



Şekil 6.1. Dinamik yüklerin frekans spektrumu tasarımının seçimi (Bhattacharya, 2014)

Şekil 6.1'de üç bölge gözükmemektedir. Bu bölgeler şöyle tanımlanmıştır;

- Sert – sert (stiff – stiff) tasarım bölgesi; Sert – sert tasarımda, yapının doğal frekansı, hem rüzgârın (genellikle 1P; rotor frekansı ve 3P; kanat gölgeleme frekansı) hem de dalganın frekanslarından daha fazla olacak şekilde tasarım yapılır. Bu tasarım hem rüzgâr hem de dalga frekansları ile yapının doğal frekansının rezonans oluşturmamasını amaçlar. Yapı çok rijit hale gelir, bu da maruz kaldığı yükler altında yapıdaki deformasyonların minimum düzeyde olmasını sağlar. Rezonans riski minimum düzeye iner, yapısal

dayanıklılık artar. Sert – sert tasarım bölgesi içinde yapılan tasarımlar, genellikle, daha ağır ve daha maliyetli yapıların inşa edilmesine sebebiyet verir.

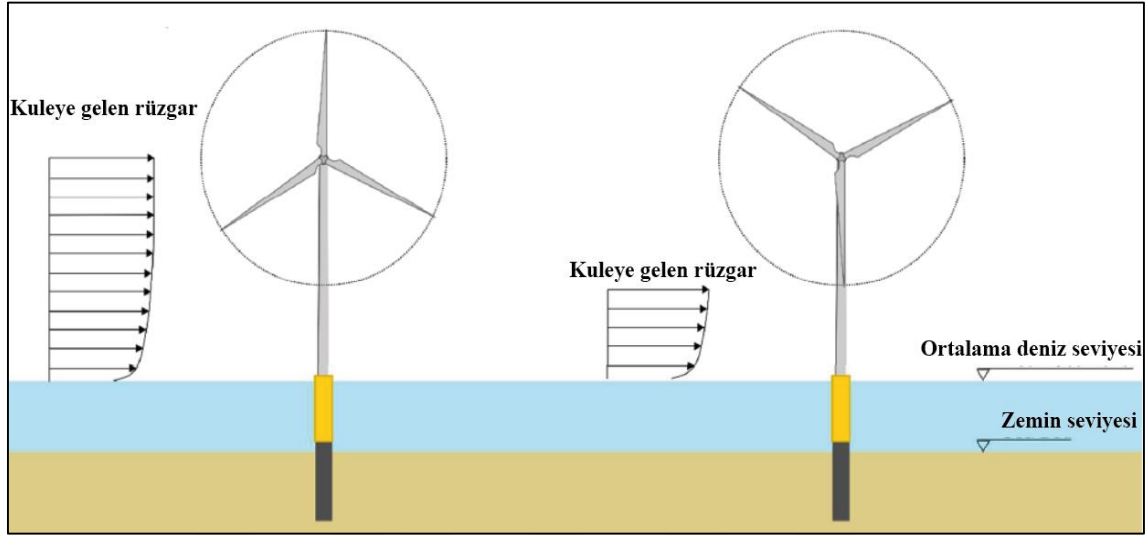
- Yumuşak – sert (soft – stiff) tasarım; Yumuşak – sert tasarımda, yapının doğal frekansı rüzgâr frekanslarından daha fazla ancak dalga frekanslarından daha az olacak şekilde tasarım yapılır. Söz konusu bu tasarım, rüzgâr frekansları ile yapının doğal frekansının rezonans oluşturma olasılığını azaltırken, yapı dalga frekanslarına karşı daha hassas hale gelebilir. Yapı ne çok rijit ne de esnektir. Sert – sert tasarıma göre daha fazla deformasyonlar gözlemlenir fakat daha hafif ve maliyeti daha az yapıların inşa edilmesini mümkün kılar. En iyi olası tasarımın gerçekleşeceği bölge bu bölgedir.
- Yumuşak – yumuşak (soft – soft) tasarım; Yumuşak – yumuşak tasarımda, yapının doğal frekansı hem rüzgâr hem de dalga frekanslarından daha az olacak şekilde tasarım yapılır. Bu tasarım, yapının doğal frekansını hem rüzgâr hem de dalga frekanslarıyla eşitleyip rezonans durumuna yol açabilir. Rezonans durumunda ise yapıya gelen dinamik yükler artar ve bu da yapıda büyük deformasyonlara sebebiyet verebilir. Rezonans riskinin en yüksek olduğu tasarım bölgesi bu bölgedir. Bu bölgede yapılan tasarımlar, genellikle, diğer tasarım yöntemlerine göre daha hafif ve daha esnek yapılar inşa edilmesine neden olur.

İnşa edilecek olan deniz üzeri rüzgâr türbininin doğal frekansının yumuşak – sert bölgede olmasının, olası en iyi tasarımı garanti ettiği ve tasarımın söz konusu bu bölgede kalması gerektiği söylenebilir.

Rüzgâr türbininin 1P ve 3P frekansları, yapının zemininde farklı yüklemelere sebep olmaktadır. Bu yüklemeler Bhattacharya (2014) tarafından aşağıdaki gibi tarif edilmiştir;

- 1P yükleme, rotorun kütle ve aerodinamik dengesizliklerinden dolayı göbek seviyesindeki titreşimlerden kaynaklı oluşan yüklemedir. Bu yük, rotorun dönme frekansına eşit bir frekansa sahiptir. Çoğu endüstriyel rüzgâr türbinleri, değişken hızlı makineler olduklarından, sadece 1P frekansta değil en düşük ve en yüksek devir/dakika ile ilişkili frekanslar arasında bir bantta çalışır.
- 3P yükleme, kanatların birbirlerini gölgeleme etkilerinden kaynaklanan titreşimler nedeniyle kule üzerinde oluşan yüklemedir. Rüzgâr türbinlerinin kanatlarının sırasıyla kule önünden geçmesi bir gölgeleme etkisine neden olur ve kule üzerinde rüzgâr yükünde

bir kayba yol açar. Söz konusu bu durumun görselleştirilmesi Bhattacharya (2014) tarafından Şekil 6.2’de verilmiştir.

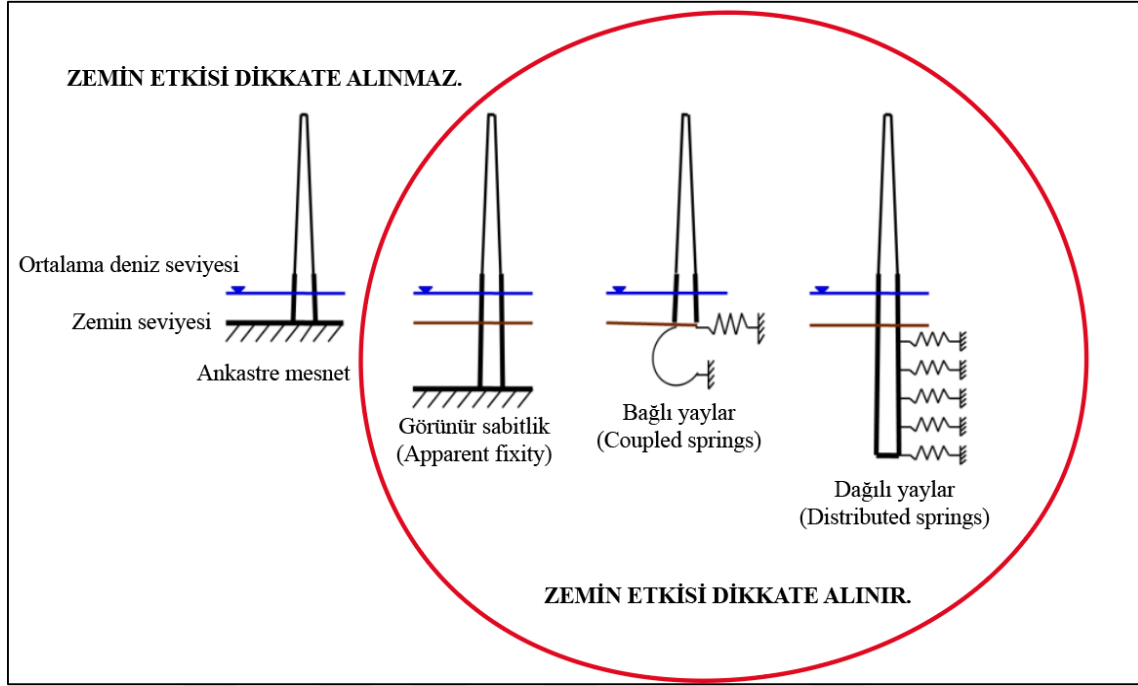


Şekil 6.2. Kule üzerindeki kanat gölgeleme yükünden oluşan yükleme (3P). Sol taraftaki şekil kanatların kuleyi gölgelemediği durumdaki kule üzerindeki yükü göstermektedir (Bhattacharya, 2014)

Gölgeleme etkisi, üç kanatlı rüzgâr türbinleri için, türbinin dönme frekansının üç katı (3P) ve iki kanatlı rüzgâr türbinleri için türbinin dönme frekansının iki katı (2P) olan bir frekansa sahip dinamik bir yüklemeye sebebiyet verir. 2P/3P yüklemesi de 1P gibi bir frekans bandıdır. 1P bandının sınırlarının türbin kanatlarının sayısı ile çarpılmasıyla bu bandın sınırları elde edilir.

6.1. Deniz Üzeri Rüzgâr Türbininin Doğal Frekans Analizi

Deniz üzeri rüzgâr türbinlerinin doğal frekans analizi için literatürde daha önce belirtildiği üzere birçok çalışma mevcuttur. Bu çalışmalar genel olarak, zemin etkisini dikkate alan yöntemler ve zemin etkisini dikkate almayan yöntemler olarak iki kısımda (Bush ve Manuel, 2009) incelenebilir (Şekil 6.3).



Şekil 6.3. Doğal frekans analizinin yöntemleri (Bush ve Manuel, 2009)

Bu çalışmada ilk olarak zemin etkisinin gözetenmediği ankastre mesnet yöntemi ele alınmıştır. Bu yöntem kullanılırken ise Arany ve diğ. (2016) ve Jiang ve diğ. (2023) tarafından önerilen iki farklı sistematik yaklaşım değerlendirilmiştir. Her iki çalışmada da literatürle uyumlu sonuçlar elde edilmiştir. Söz konusu bu çözümler doğaları gereği analitik çözüm olarak adlandırılmıştır.

Zemin etkisini dikkate alan yöntem olarak ise, Şekil 6.3'te verilen basitleştirilmiş yöntemler kullanılmıştır. Ayrıca zemin etkisini dikkate alan analitik yöntem olarak Jiang ve diğ. (2023) yapmış oldukları çalışma temel alınmıştır. Yapılan bu çalışmada zemin, bağlı yaylar olarak modellenip, deniz üzeri rüzgâr türbini için elde edilen fiziksel ve geometrik bağıntılara dayanılarak yapının doğal frekans değeri zemin etkisini de içine alacak şekilde elde edilmiştir. Söz konusu bu çözüm de yine doğası gereği analitik çözüm olarak adlandırılmıştır. Arany ve diğ. (2016) tarafından önerilen yöntemin bu aşamada kullanılmamasının sebebi getirdiği kısıtlamalardır. Rijit kazıklar için bu yaklaşım söz konusu kısıtlamalar sebebiyle kullanılamamaktadır (Eş. 6.1 – Eş. 6.2).

$$\eta_R > 1,2\eta_{LR}^2/\eta_L \quad (6.1)$$

$$\eta_L > 1,2\eta_{LR}^2/\eta_R \quad (6.2)$$

Burada, η_L ; boyutsuz yatay rijitlik parametresi, η_R ; boyutsuz dönme rijitlik parametresi ve η_{LR} ; boyutsuz çapraz rijitlik parametresidir. Bu değerler Eş. 6.3, Eş. 6.4, Eş. 6.5 ile verilmiştir.

$$\eta_L = \frac{K_L L_T^3}{EI_\eta} \quad (6.3)$$

$$\eta_R = \frac{K_R L_T}{EI_\eta} \quad (6.4)$$

$$\eta_{LR} = \frac{K_{LR} L_T^2}{EI_\eta} \quad (6.5)$$

Burada, EI_η ; kulenin eşdeğer eğilme rijitliğidir (Eş. 6.6).

$$EI_\eta = EI_t f(q) \quad (6.6)$$

$$f(q) = \frac{1}{3}x \frac{2q^2(q-1)^3}{2q^2 \ln q - 3q^2 + 4q - 1} \quad q = \frac{D_b}{D_t} \quad (6.7)$$

Burada, EI_t ; kulenin tepe noktasının eğilme rijitliği değeri ve $f(q)$; kule tepe noktasındaki kule çapı ile kule taban noktasındaki kule çapının oranına bağlı bir fonksiyon, D_b ; kulenin taban noktasındaki çapı ve D_t ; kulenin tepe noktasındaki çapıdır.

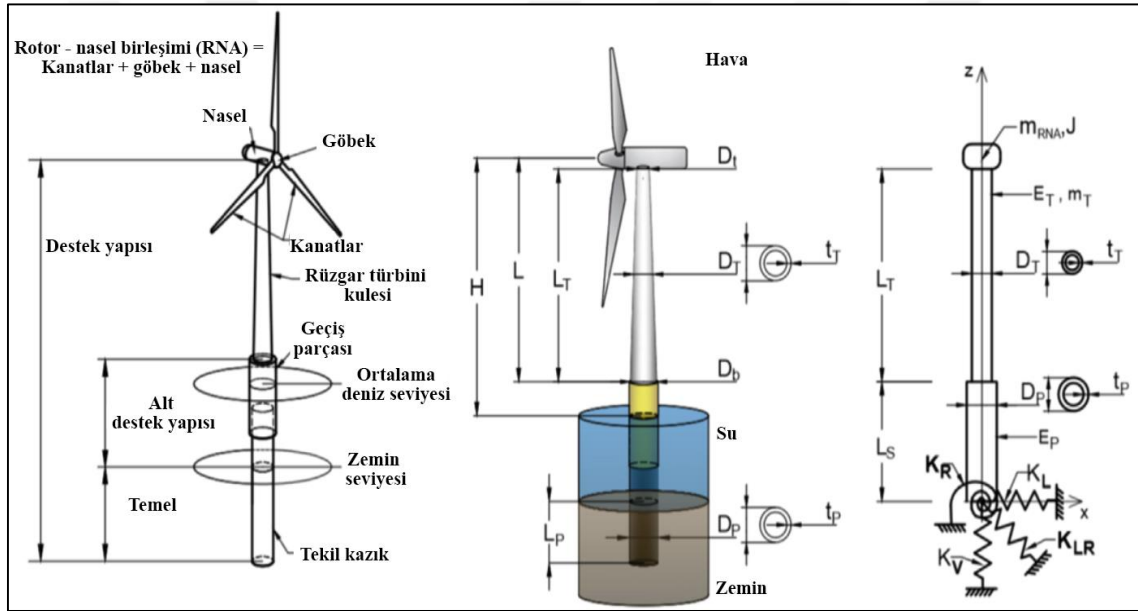
Yukarıda bahsedilen yöntemlerin doğrulanması için ise Simis şirketi tarafından geliştirilen Ashes 3.20.1 yazılımı kullanılmıştır. Simis Ashes, rüzgâr türbini tasarım ve analiz yazılımıdır. Hem kara hem de deniz üstü rüzgâr türbinlerinin simülasyonlarını gerçekleştirebilen bu yazılım, optimize bir simülasyon sunar. Ashes, kullanıcı dostu arayüzü ile bulut bilişim teknolojilerini kullanarak, simülasyon süreçlerini hızlandırarak ve maliyetleri düşürerek rüzgâr türbini tasarımında verimliliği artırır (URL – 23).

Bu işlem basamakları bittikten sonra ise hem rüzgâr türbini hem de akıntı türbini olması durumu için gerekli eşitlikler ve bağıntılar elde edilip, kombine açık deniz rüzgâr üzeri santralleri için farklı senaryolar halinde bulunan doğal frekans değerleri karşılaştırılmıştır.

6.1.1. Zemin etkisinin dikkate alınmadığı durum için doğal frekans hesaplamaları

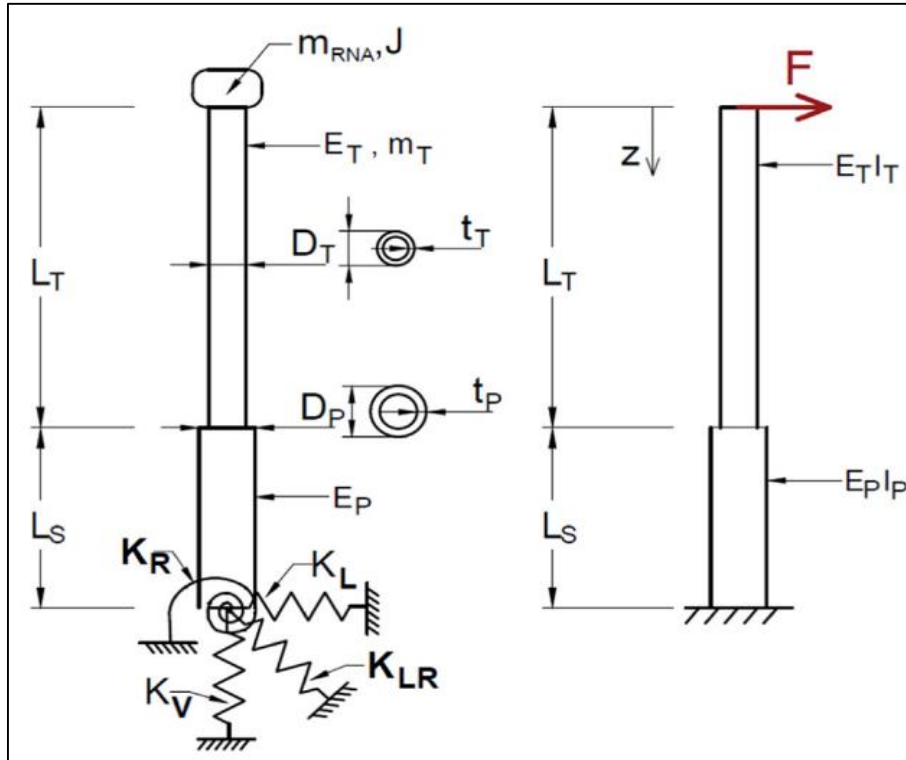
Arany ve diğ. (2016) tarafından geliştirilen yöntem

Arany ve diğ. (2016) tarafından yapılan çalışmada deniz üzeri rüzgâr türbini sistemi Şekil 6.4'te olduğu gibi basitleştirilmiştir.



Şekil 6.4. Deniz üzeri rüzgâr türbininin basitleştirilmesi (Arany ve diğ., 2016)

Zemin etkisinin dikkate alınmadığı durum için ise Şekil 6.5'teki gibi değişken kesite sahip mesnetli kiriş sistemi ele alınır (Arany ve diğ., 2016).



Şekil 6.5. Değişken kesitli ankastre mesnetli kiriş (Arany ve diğ., 2016)

Burada, F ; rotor kısmına gelen yatay kuvvet, z ; kuvvetin uygulandığı noktadan başlayarak aşağı yönlü düşey mesafe, m_{RNA} ; rotor – nasel (gövde) birleşiminin ağırlığı, J ; rotor – nasel birleşiminin atalet momenti, E_T ; rüzgâr türbini kulesinin elastisite modülü, I_T ; rüzgâr türbin kulesinin ortalama atalet momenti, m_T ; rüzgâr türbini kulesinin ağırlığı, t_T ; rüzgâr türbini kulesinin ortalama duvar kalınlığı, L_T ; rüzgâr türbini kulesinin uzunluğu, D_T ; rüzgâr türbini kulesinin ortalama çapı, D_P ; tekil kazığın çapı, t_P ; tekil kazığın duvar kalınlığı, E_P ; tekil kazığın elastisite modülü, L_S ; tekil kazığın zemin üstünde kalan yüksekliği, K_R ; döner yayın rijitlik katsayısı, K_L ; yanal yayın rijitlik katsayısı, K_{LR} ; çapraz yayın rijitlik katsayısı ve K_V ; dikey yayın rijitlik katsayısıdır. K_V değeri sistem dikey açıdan yeterince rijit olduğundan dikkate alınmamaktadır.

Türbin sistemi tek dereceli serbestliğe sahip bir kütle – yay sistemi olarak düşünülmüştür. Buna göre kuvvetin bulunduğu noktada kütle olarak rotor – nasel birleşiminin ağırlığı ve yatay olarak gelen kuvvet bulunmaktadır. Serbest titreşim durumunda sönümsüz bir sistemin genel denklemi Eş. 6.8’deki gibi yazılabilir. Eş. 6.8’in sönümsüz olarak yazılmasının sebebi, sistem için ele alınabilecek tüm sönümlerlerin (yapısal sönümleme, hidrodynamic

sönümleme ve aerodinamik sönümleme) dikkate alınması durumunda bile frekans değeri üzerinde % 1 ila % 8 arasında bir değişim meydana getirmesidir (Arany ve diğ., 2016).

$$m\ddot{x}(t) + kx(t) = 0 \quad (6.8)$$

Burada m; kütle, x(t); hareket fonksiyonu ve k ise yay sabitidir. Hareketin harmonik olduğu kabul edilirse Eş. 6.9 aşağıdaki hale gelir.

$$-m\omega^2 + k = 0 \quad (6.9)$$

$$k = \frac{3EI}{L_T^3} \quad (6.10)$$

$$m = m_{RNA} + \frac{33}{140} m'_{kule} \quad (5.11)$$

Burada, ω ; dairesel frekans değeri, EI; rüzgâr türbini kulesinin eğilme rijitliği, m'_{kule} ; idealize edilmiş rüzgâr türbini kulesinin ağırlığı olup Eş. 6.12'deki gibi ifade edilmektedir.

$$m'_{kule} = \rho_T D_T \pi t_T L_T \quad (6.12)$$

$$D_T = \frac{D_b + D_t}{2} \quad (6.13)$$

$$t_T = \frac{m_{kule}}{\rho_T D_T \pi L_T} \quad (6.14)$$

Burada, D_T ; ortalama rüzgâr türbini kulesi çapı, D_b ; rüzgâr türbini kulesinin taban çapı, D_t ; rüzgâr türbini kulesinin tepe noktasındaki çapı, m_{kule} ; rüzgâr türbini kulesinin ağırlığı, ρ_T ; rüzgâr türbini kulesinin yoğunluğu ve t_T ; rüzgâr türbini kulesinin ortalama et kalınlığıdır. İdealize edilmiş rüzgâr türbini kulesinin ağırlığının bir katsayısıyla çarpıldığı Eş. 6.11'de görülmektedir. Bu değer Timoshenko (1937) tarafından bir ucu serbest diğer ucu ise ankastre mesnet olan sistemler için analitik olarak elde edilmiştir.

Dolayısıyla ω ; dairesel frekans değeri Eş. 6.15'teki gibi olur.

$$\omega = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad \rightarrow \quad f_1 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (6.15)$$

Rüzgâr türbini kulesinin idealize edilmesinin sebebi Eş. 6.10'dan anlaşılabilir. Bu eşitlikten görüleceği üzere frekans değerinin elde edilebilmesi için tek bir yay sabiti değeri gerekir ki bu da ancak sistemin idealize edilip tek bir ortalama çap, tek bir ortalama eğilme rijitliği ve tek bir ortalama uzunluk değerine sahip olmasıyla mümkün olabilir (Eş. 6.10). Fakat Şekil 6.12'den görüleceği üzere sistemde iki farklı eğilme momenti ile iki farklı uzunluğa sahip bileşenler bulunmaktadır. Dolayısıyla bir sonraki aşamada yapılacak işlem, bu sistemi eşdeğer bir sisteme dönüştürmek olacaktır.

Castigliano'nun ikinci teoremi, birinci dereceden serbestliğe sahip lineer elastik yapı için Eş. 6.16'daki gibidir.

$$q = \frac{\partial U}{\partial Q} \quad (6.16)$$

Burada, q; genelleştirilmiş deformasyon, U; deformasyon enerjisi ve Q; genelleştirilmiş kuvvettir. Rüzgâr türbini kulesinin tepe noktasından etkiyen yatay F kuvvetinin meydana getirdiği deformasyon Eş. 6.17'deki gibi yazılabilir (Arany ve diğ., 2016).

$$w(0) = \frac{\partial U}{\partial F} = \int_0^{L_T+L_S} \frac{[M(z)]^2}{2EI(z)} dz \quad (6.17)$$

$$w(0) = \frac{\partial}{\partial F} \int_0^{L_T} \frac{F^2 z^2}{2E_T I_T} dz + \frac{\partial}{\partial F} \int_{L_T}^{L_T+L_S} \frac{F^2 z^2}{2E_P I_P} dz \quad (6.18)$$

$$w(0) = \left[\frac{F z^3}{3E_T I_T} \right]_0^{L_T} + \left[\frac{F z^3}{3E_P I_P} \right]_{L_T}^{L_T+L_S} \quad (6.19)$$

$$w(0) = \frac{FL_T^3}{3E_T I_T} + \frac{F(L_T + L_S)^3}{3E_P I_P} - \frac{FL_T^3}{3E_P I_P} \quad (6.20)$$

Burada, $w(0)$; rüzgâr türbini kulesinin tepe noktasındaki deformasyon değeridir. I_T ve I_P değeri Eş. 6.21 ve Eş. 6.22'teki gibi bulunur.

$$I_T = 0,0625t_T\pi(D_b^3 + D_t^3) \quad (6.21)$$

$$I_P = \frac{1}{8}(D_P - t_P)^3 t_P \pi = \frac{1}{8}\left(D_P - 6.35 - \frac{D_P}{100}\right)^3 \left(6.35 + \frac{D_P}{100}\right) \pi \quad (6.22)$$

Yapı boyunca kuvvetten kaynaklı moment dağılımı Eş. 6.23'teki gibidir.

$$M(z) = Fz \quad (6.23)$$

Tek dereceli serbestliğe sahip sistem için yay rijitliği Eş. 6.24'teki gibi ifade edilebilir.

$$k = \frac{F}{w(0)} = \frac{1}{\frac{L_T^3}{3E_T I_T} + \frac{(L_T + L_S)^3}{3E_P I_P} - \frac{L_T^3}{3E_P I_P}} \quad (6.24)$$

İfadeyi basitleştirmek için iki parametre tanımlanmıştır. Bunlar, Eş. 6.25'te χ ; eğilme rijitliği oranı ve Eş. 6.26'da ψ ; alt destek yapısı uzunluğunun rüzgâr türbini kulesi uzunluğuna oranıdır.

$$\chi = \frac{E_T I_T}{E_P I_P} \quad (6.25)$$

$$\psi = \frac{L_S}{L_T} \quad (6.26)$$

Dolayısıyla, ankastre mesnet durumunda doğal frekans değeri Eş. 6.27'den elde edilir.

$$f_{AM} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (6.27)$$

$$k = \frac{1}{1 + (1 + \psi)^3 \chi - \chi} k_T \quad (6.28)$$

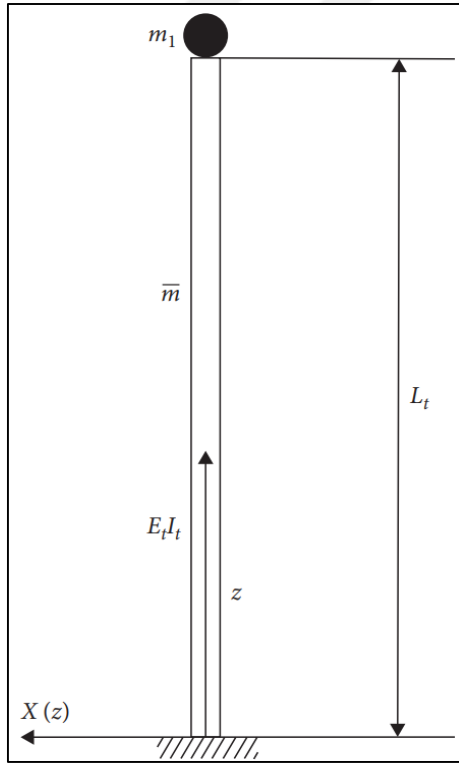
Burada, f_{AM} ; ankastre mesnetli kiriş sisteminin frekans değeri, k_T ; yapının tek parça halinde olması, yani, alt destek yapısı gibi bir yapı bulunmaması halindeki yay sabitidir. Dolayısıyla zemin etkisi dikkate alınmaksızın ankastre mesnetli değişken kesite sahip kiriş için doğal frekans değeri Eş. 6.29 ile elde edilir.

$$f_{AM} = \sqrt{\frac{1}{1 + (1 + \psi)^3 \chi - \chi}} f_{AM,T} \quad (6.29)$$

Burada, $f_{AM,T}$; yapının tek parça halinde olması, yani, alt destek yapısı gibi bir yapı bulunmaması halinde sistemin doğal frekans değeridir.

Jiang ve diğ. (2023) tarafından geliştirilen yöntem

Jiang ve diğ. (2023) yapmış oldukları çalışmalarında öncelikle zemin etkisini dikkate almadan sistemi Şekil 6.6'daki gibi idealize etmişlerdir.



Şekil 6.6. Deniz üzeri rüzgâr türbininin dinamik modeli (Jiang ve diğ, 2023)

Burada, m_1 ; rotor – nasele (gövde) birleşiminin ağırlığı, $\bar{m}$; yapının birim uzunluk başına ağırlığı, E_t ; yapının elastisite modülü, I_t ; yapının atalet momenti, t ; zaman ve z ; konum koordinatıdır.

Birinci derece serbestliğe sahip sönümlenmenin dikkate alınmadığı Euler kiriş sistemi için hareket denklemi Eş. 6.30'daki gibi verilmiştir.

$$\bar{m} \frac{\partial^2 v(z, t)}{\partial t^2} + E_t I_t \frac{\partial^4 v(z, t)}{\partial z^4} = 0 \quad (6.30)$$

Eş. 6.30'un çözümü ise Eş. 6.31 formunda ifade edilmiştir.

$$v(z, t) = X(z) Y(t) \quad (6.31)$$

Eş. 6.31, Eş. 6.30'da yerine konulursa Eş. 6.32 elde edilir.

$$\frac{\bar{m}}{E_t I_t} X(z) Y''(t) + X^{(4)}(z) Y(t) = 0 \quad (6.32)$$

Eş. 6.32, $X(z) Y(t)$ ile bölünür ve Eş. 6.33 haline gelir.

$$\frac{\bar{m}}{E_t I_t} \frac{Y''(t)}{Y(t)} + \frac{X^{(4)}(z)}{X(z)} = 0 \quad (6.33)$$

Eş. 6.33'ün geçerli olması için Eş. 6.34'ün sağlanması gerekmektedir.

$$-\frac{\bar{m}}{E_t I_t} \frac{Y''(t)}{Y(t)} = \frac{X^{(4)}(z)}{X(z)} = a^4 \quad (6.34)$$

Yukarıdaki eşitlikler kullanılarak iki adi diferansiyel denklem ve dairesel frekans ifadesi Eş. 6.37'deki gibi elde edilir.

$$Y''(t) + \omega^2 Y(t) = 0 \quad (6.35)$$

$$X^{(4)}(z) - a^4 X(z) = 0 \quad (6.36)$$

$$\omega^2 = \frac{a^4 E_t I_t}{\bar{m}} \quad (6.37)$$

Eş. 6.37'den dairesel frekansı elde edebilmek için Eş. 6.36 çözülmelidir. Eş. 6.36'nın çözümü ise Eş. 6.38 formunda önerilmiştir.

$$X(z) = A_1 \cos az + A_2 \sin az + A_3 \cosh az + A_4 \sinh az \quad (6.38)$$

Şekil 6.5'teki yer değiştirme, kesme kuvveti, eğilme momenti ve deformasyon açısı için sınır koşullarına göre, Eş. 6.39 türetilmiştir.

$$\begin{aligned} &\cos^2(aL_t) + \cosh^2(aL_t) + \sin^2(aL_t) - \sinh^2(aL_t) + 2 \cos(aL_t) \cosh(aL_t) \\ &+ 2a \frac{m_1}{\bar{m}} \cos(aL_t) \sinh(aL_t) - 2a \frac{m_1}{\bar{m}} \cosh(aL_t) \sin(aL_t) = 0 \end{aligned} \quad (6.39)$$

İfadeyi daha sade bir hale getirmek için Eş. 6.40 ve Eş. 6.41'de tanımlanan iki parametre, μ ; rotor – nasel birleşiminin ağırlığının zemin kotu üzerindeki tüm yapıların ağırlığına oranı ve J ; zemin üzerindeki yapı uzunluğunun fonksiyonu, Eş. 6.39'da yerine konulursa Eş. 6.42 elde edilir.

$$\mu = \frac{m_1}{mL_t} \quad (6.40)$$

$$J = aL_t \quad (6.41)$$

$$\begin{aligned} &\cos^2(J) + \cosh^2(J) + \sin^2(J) - \sinh^2(J) + 2 \cos(J) \cosh(J) \\ &+ 2J\mu \frac{m_1}{\bar{m}} \cos(J) \sinh(J) - 2J\mu \cosh(J) \sin(J) = 0 \end{aligned} \quad (6.42)$$

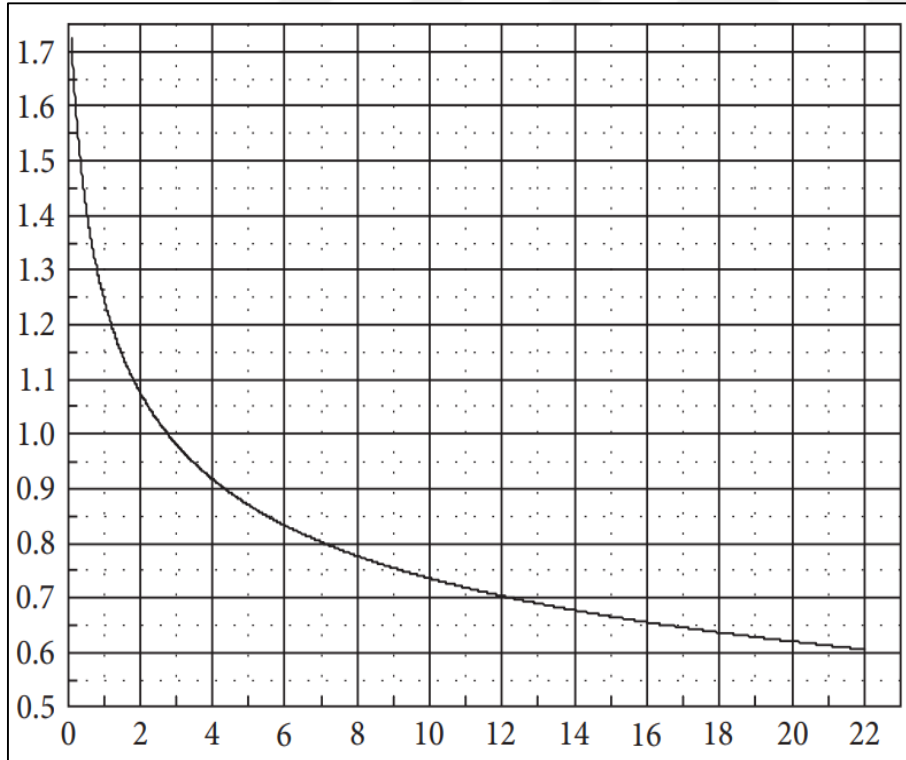
Eş. 6.41'i Eş. 6.37'de yerine konulursa dairesel frekans değeri elde edilir (Eş. 6.43).

$$\omega = J^2 \sqrt{\frac{E_t I_t}{\bar{m} L_t^4}} \quad (6.43)$$

Dolayısıyla doğal frekans Eş. 6.44'teki şekilde olur.

$$f = \frac{\omega}{2\pi} = \frac{J^2}{2\pi} \sqrt{\frac{E_t I_t}{\bar{m} L_t^4}} \quad (6.44)$$

Deniz üstü rüzgâr türbini yapıları için μ katsayısına karşılık gelen J değeri, Eş. 6.42 kullanılarak çözülebilir. Doğal frekansın elde edilebilmesi için, J değerinin Eş. 6.42'deki transandantal denklemin ilk çözümü olması gerekmektedir. J değeri Eş. 6.44'e yerleştirildiğinde, zemin – yapı etkileşimi dikkate alınmadan yapının doğal frekans elde edilebilir. μ 'ya karşılık gelen J değerleri Şekil 6.7'de gösterilmiştir.

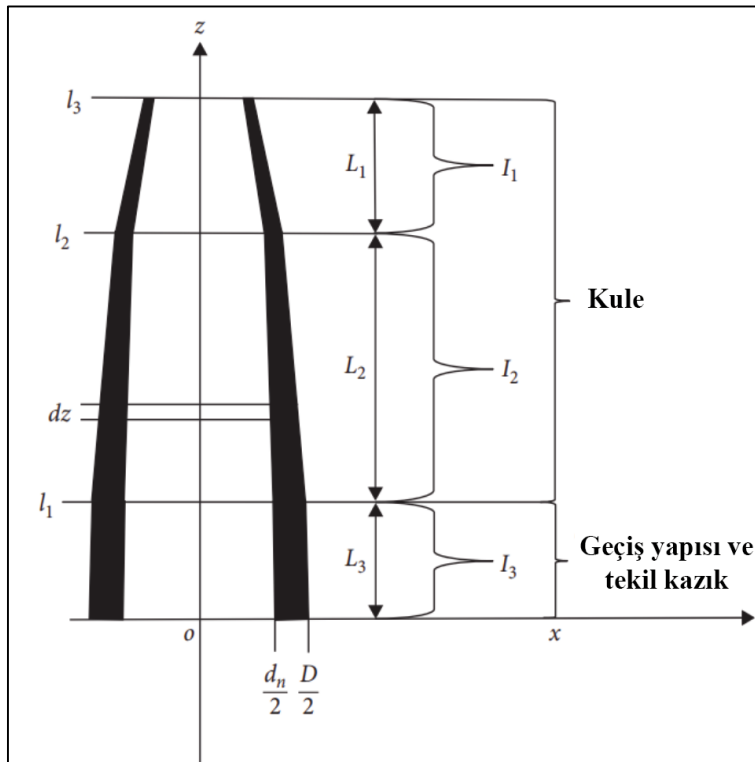


Şekil 6.7. μ 'ya karşılık gelen J değerleri (Jiang ve diğ., 2023)

Tekil kazıklı bir deniz üzeri rüzgâr türbini yapısı için kule çapı, kule duvar kalınlığındaki değişimler, geçiş yapısının varlığı ve tekil kazığın duvar kalınlığının türbin kulesinin

kalınlığından daha fazla olması nedeniyle üniform olmayan bir atalet momentine sahiptir. Eş. 6.44'ten görüleceği üzere yapının doğal frekans değerinin bulunması için geçerli sadece bir atalet momenti değeri olmalıdır. Dolayısıyla Jiang ve diğ. (2023) genelleştirilmiş bir atalet momenti değeri için aşağıdaki basamakları önermişlerdir.

Jiang ve diğ. (2023) sistemi Şekil 6.8'deki gibi üç parçaya ayırmışlardır.



Şekil 6.8. Üç kısma ayrılan yapı profili (Jiang ve diğ., 2023)

Burada, L_1 ve L_2 ; kule uzunluğu, $l_1 - l_2$ ve $l_2 - l_3$; kulenin kısımları, I_1 ve I_2 bu kısımlara denk gelen atalet momentleri, L_3 ; geçiş yapısı ve tekil kazık kısmının uzunluğu, I_3 bu kısma denk gelen atalet momenti, d_n ; iç çap, D ; dış çap ve dz ; diferansiyel parçanın uzunluğudur.

$l_1 - l_2$ kısmında kule çapı ve duvar kalınlığında fazla bir değişim gözlemlenmezken, $l_2 - l_3$ kısmında kule çapı ve duvar kalınlığında, genellikle, büyük değişimler görülmektedir. Dolayısıyla, atalet momenti değerini hesaplamak için kule çapı ve duvar kalınlığındaki değişim sadece iki kısım için göz önüne alınmıştır.

Şekil 6.8'den, yapının dış çapı, konumun fonksiyonu olarak Eş. 6.45'teki gibi ele alınabilir.

$$D = F_1(z) \quad (6.45)$$

Yapının iç çapı ise Eş. 6.46'daki gibi yazılabilir.

$$d_n = F_2(z) \quad (6.46)$$

İç ve dış çaplar konumun fonksiyonu olduğundan, atalet momenti de konumun bir fonksiyonu olmalıdır (Eş. 6.47).

$$I_t = f(z) \quad (6.47)$$

$l_1 - l_2$ arasındaki her bir diferansiyel parçanın ağırlığı Eş. 6.48'deki gibi tanımlanabilir.

$$\frac{dz}{\int_{l_1}^{l_2} dz} \quad (6.48)$$

Dolayısıyla, her bir diferansiyel parçanın genel atalet momenti üzerindeki oranı Eş. 6.49'daki gibidir.

$$\frac{I_t dz}{\int_{l_1}^{l_2} dz} \quad (6.49)$$

Tüm bunlar ışığında, $l_1 - l_2$ arasına denk gelen atalet momenti, I_2 , Eş. 6.50'deki integral ile ifade edilebilir.

$$I_2 = \frac{\int_{l_1}^{l_2} I_t dz}{\int_{l_1}^{l_2} dz} = \frac{\int_{l_1}^{l_2} f(z) dz}{\int_{l_1}^{l_2} dz} \quad (6.50)$$

$l_1 - l_2$ arasının her biri, dz diferansiyel uzunluğundaki q kadar küçük kısma ayrıldığı düşünülürse, atalet momenti Eş. 6.51 ile bulunur.

$$I_2 = \frac{\sum_{i=1}^q \left(\int_{l_{i-1}}^{l_i} f_i(z) dz \right)}{l_2 - l_1} = \frac{\sum_{i=1}^q \left(\int_{l_{i-1}}^{l_i} f_i(z) dz \right)}{L_2} \quad (6.51)$$

Burada, $f_i(z)$; diferansiyel uzunluğa denk gelen atalet momenti, i ; koordinat sistemi, l_{i-1} diferansiyel uzunluğun alt kısmına denk gelen yükseklik, l_i ; diferansiyel uzunluğun üst kısmına denk gelen yükseklik ve L_2 ise $l_1 - l_2$ arasına denk gelen kulenin uzunluğudur.

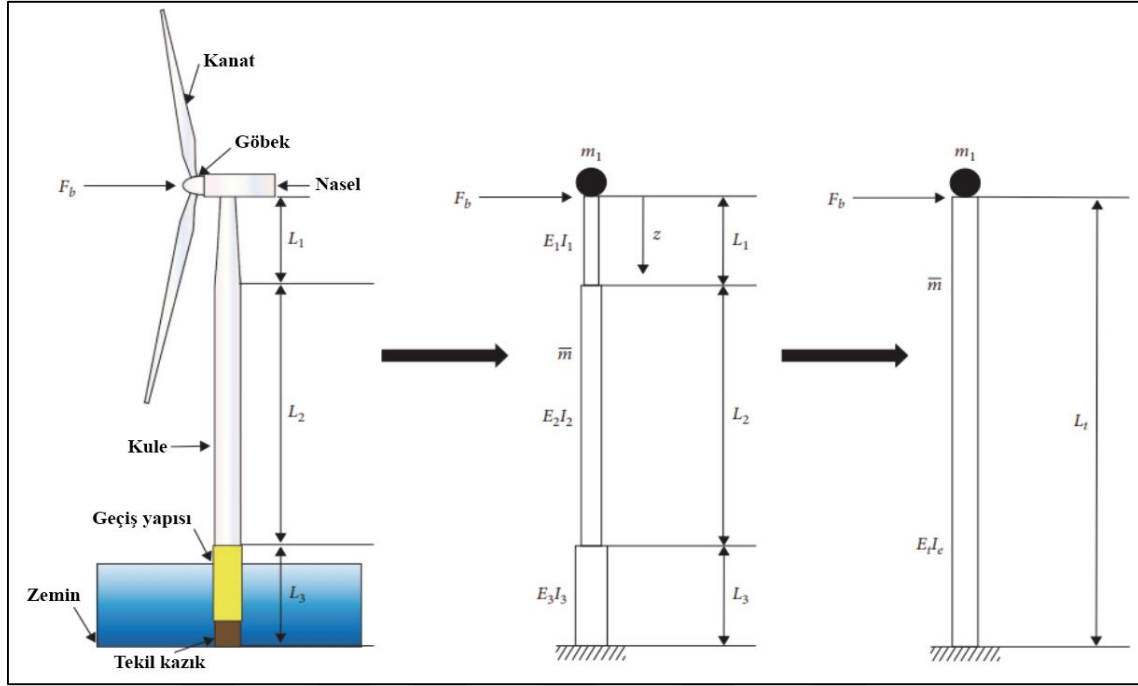
Eş. 6.51’de bulunan integral ifadeleri bu eşitliğin uygulanmasını zorlaştırmaktadır. Bu yüzden Eş. 6.51, Eş. 6.52 halinde yazılarak basitleştirilebilir.

$$I_2 = \frac{\sum_{i=1}^q z_i I_i}{\sum_{i=1}^q z_i} \quad (6.52)$$

Burada, q ; sistemin ayrıldığı diferansiyel parça sayısı, I_i ; her parçaya denk gelen atalet momenti ve z_i ; her bir parçanın uzunluğudur.

I_1 ve I_3 değerleri de Eş. 6.52 ile aynı forma sahiptir. Aslında pratik olarak kule çapı ve duvar kalınlığı değerleri sistemin en alt noktasından en tepe noktasına gittikçe değişim göstermektedir. Bu değerler en alt noktada maksimum değere sahipken en üst noktada minimum değerde olmaktadır. Jiang ve diğ. (2023) bu değişimi göz önüne almak için aşağıdaki adımları izlemişlerdir.

Eş. 5.44’ten de görüleceği üzere tek bir atalet momenti değeri olması gerekliliğinden bahsedilmişti. Jiang ve diğ. (2023) karmaşık bu sistemi Şekil 6.9’daki gibi tek bir basit sisteme indirgemişlerdir.



Şekil 6.9. Yapının doğal frekansının hesaplanmasında kullanılan zemin etkisini dikkate almıyan model (Jiang ve diğ., 2023)

Burada, F_b ; rüzgâr türbininin göbek kısmına gelen kuvvet ve I_e ; sistemin eşdeğer atalet momenti değeridir.

Jiang ve diğ. (2023), Crotti – Engesser teoremine göre, elastik deplasmanı Eş. 6.53'teki gibi tanımlamışlardır.

$$D_F = \frac{\partial V_C}{\partial F} \quad (6.53)$$

Burada, V_C ; toplam deformasyon enerjisi ve F ; kuvvettir.

Rüzgâr türbininin göbeğine gelen kuvvetin F_b olduğu düşünülürse rüzgâr türbininin tepe noktasının deplasmanı Eş. 6.54 ile hesaplanır.

$$D_F = \frac{\partial}{\partial F} \int_0^{L_1+L_2+L_3} \frac{[M(z)]^2}{2EI(z)} dz = \frac{\partial}{\partial F} \int_0^{L_1} \frac{(F_b z)^2}{2E_1 I_1} dz + \frac{\partial}{\partial F} \int_{L_1}^{L_1+L_2} \frac{(F_b z)^2}{2E_2 I_2} dz \quad (6.54)$$

$$+ \frac{\partial}{\partial F} \int_{L_1+L_2}^{L_1+L_2+L_3} \frac{(F_b z)^2}{2E_3 I_3} dz = \frac{F_b L_1^3}{3E_1 I_1} + \frac{F_b (L_1 + L_2)^3 - F_b L_1^3}{3E_2 I_2} +$$

$$\frac{F_b (L_1 + L_2 + L_3)^3 - F_b (L_1 + L_2)^3}{3E_3 I_3}$$

Gerekli sadeleştirmeler için Eş. 6.55, Eş. 6.56 ve Eş. 6.57 kullanılırsa yukarıdaki eşitlik Eş. 6.58'e dönüşür.

$$\beta_1 = \frac{L_1}{L_t} \quad (6.55)$$

$$\beta_2 = \frac{L_2}{L_t} \quad (6.56)$$

$$\beta_3 = \frac{L_3}{L_t} \quad (6.57)$$

$$D_F = \frac{F_b \beta_1^3 L_t^3}{3E_1 I_1} + \frac{F_b [(\beta_1 + \beta_2)^3 - \beta_1^3] L_t^3}{3E_2 I_2} + \frac{F_b [1 - (\beta_1 + \beta_2)^3] L_t^3}{3E_3 I_3} \quad (6.58)$$

Birim yük altında deplasmanı elde etmek için Eş. 6.58'de $F_b = 1$ yazılır (Eş. 6.59).

$$D_F = \frac{\beta_1^3 L_t^3}{3E_1 I_1} + \frac{[(\beta_1 + \beta_2)^3 - \beta_1^3] L_t^3}{3E_2 I_2} + \frac{[1 - (\beta_1 + \beta_2)^3] L_t^3}{3E_3 I_3} \quad (6.59)$$

Yay sabitinin tanımı dikkate alındığında, yapısal sabitlik değeri Eş. 6.52'den aşağıdaki formda elde edilir (Eş. 6.60).

$$k = \frac{1}{D_1} \quad (6.60)$$

Yine daha önceden yapı dinamiğinden hatırlanacağı üzere tek dereceli serbestliğe sahip yay – kütle sistemi için yay sabiti Eş. 6.61'de verilmiştir.

$$k_e = \frac{3E_t I_e}{L_t^3} \quad (6.61)$$

Burada, k_e ; eşdeğer sistemin yay sabitidir. Çelikten imal edilmiş tekil kazık temelli bir deniz üzeri rüzgâr türbini için Eş. 6.60 ve Eş. 6.61 birbirine eşitlenirse, her iki tarafta da elastik modüller birbirini götürerek Eş. 6.62'deki gibi basitleştirilmiş bir form elde edilir. Elastik modülünün ($E_1 = E_2 = E_3 = E_t$) her yerde aynı olduğu varsayılmıştır.

$$I_e = \frac{I_1 I_2 I_3}{\beta_1^3 I_2 I_3 + [(\beta_1 + \beta_2)^3 - \beta_1^3] I_1 I_3 + [1 - (\beta_1 + \beta_2)^3] I_1 I_2} \quad (6.62)$$

Eğer zemin kotu üzerindeki yapı doğrusal olarak daralan bir kule yapısı ise, I_e , Eş. 6.63'teki gibi olur.

$$I_e = I_1 \quad (6.63)$$

Sistemin eşdeğer atalet momenti yaklaşık olarak eşdeğer rijitlik değeriyle tanımlanır. Sistemin eşdeğer kütlesi de Arany ve diğ. (2016) tarafından geliştirilen yöntemle benzer olarak belli bir katsayıyla çarpılarak ifade edilmiştir. Bir ucu ankastre mesnetli diğer ucu ise serbest olan bir yapı için düzeltilmiş kütle ifadesi, Clough ve Penzien (2006) tarafından Eş. 6.64'teki gibi ifade edilmiştir.

$$m^* = 0.228 \bar{m} L_t \quad (5.64)$$

Burada, m^* ; genelleştirilmiş kütle ifadesidir. Genelleştirilmiş kütle ifadesi ile, Eş. 6.40'taki μ katsayısı aşağıdaki biçimde düzeltilebilir (Eş. 6.65).

$$\mu = \frac{m_1}{0.228 \bar{m} L_t} \quad (6.65)$$

Doğal frekansı veren Eş. 6.44 ise Eş. 6.66 şeklinde düzeltilerek yapının doğal frekansı elde edilir.

$$f_t = \frac{J^2}{2\pi} \sqrt{\frac{E_t I_e}{0.228 \bar{m} L_t^4}} \quad (6.66)$$

Burada, f_t ; düzeltilmiş doğal frekans değeridir.

Simis Ashes 3.20.1

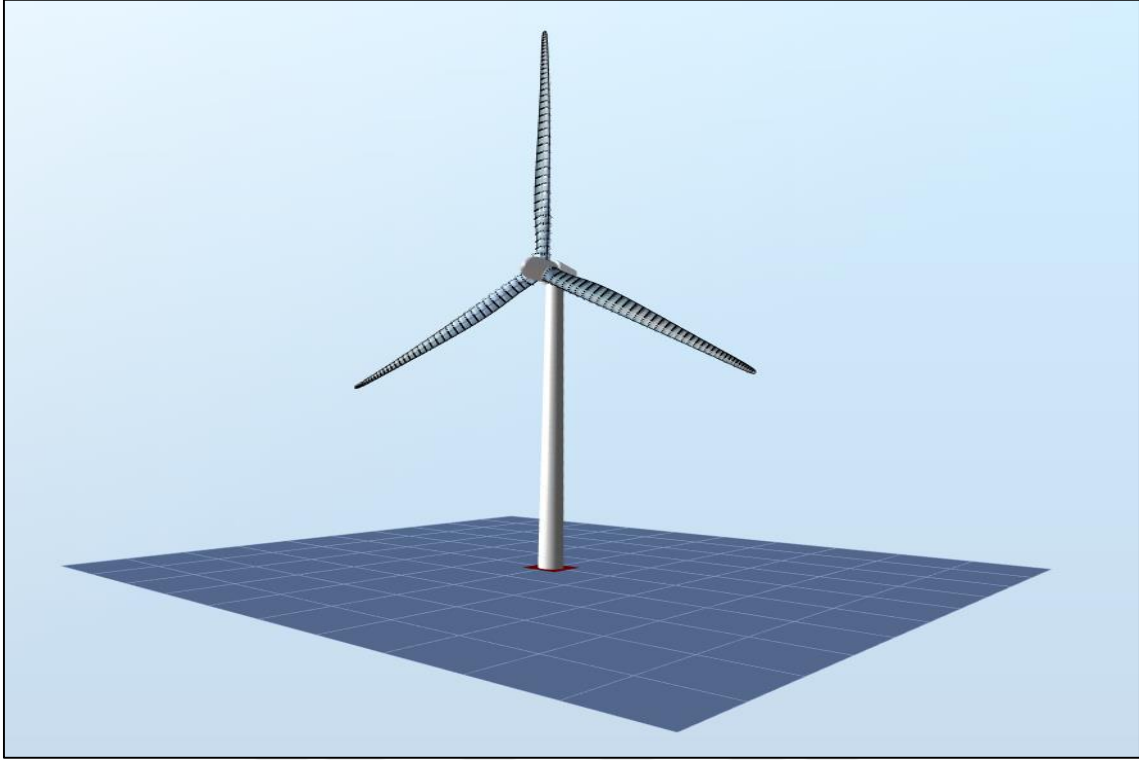
Simis Ashes 3.20.1 rüzgâr türbini modellemesinde kullanılan bir yazılımdır. Kullanıcı arayüzünün basit olması ve literatürdeki verilerle doğrulanmasından dolayı bu yazılım seçilmiştir. Bu kısımda öncelikle Ashes yazılımının literatür verileriyle doğrulanması yapılacaktır. Daha sonra ise yazılım kullanılarak önceki bölümlerde tasarımı belirlenen bu çalışmaya özel sistem analiz edilecektir.

Simis Ashes 3.20.1 yazılımının doğrulanması

Tekil kazık olmaksızın zemin etkisinin dikkate alınmadığı durum için doğal frekans analizi

Ashes ortamında doğrulanmanın yapılabilmesi için literatürde daha önce yapılmış DTU 10 MW rüzgâr türbini ile ilgili çalışmalar incelenmiştir. Bak ve diğ. (2013) yapmış oldukları çalışmalarında HAWC2 (Horizontal Axis Wind turbine simulation Code 2nd generation – İkinci nesil yatay eksenli rüzgâr türbini simülasyon kodu) ile, tekil kazık olmaksızın, DTU 10 MW rüzgâr türbininin doğal frekansını hesaplamışlardır. Alkhoury ve diğ. (2020) ise yapmış oldukları çalışmalarında 3 boyutlu sonlu elemanlar programı olan Abaqus/Standard ortamında hem tekil kazık olması hem de tekil kazık olmaması durumunda DTU 10 MW rüzgâr türbinini modellemiş ve doğal frekans değerini elde etmişlerdir. Bu çalışmada ise Ashes yazılımının doğrulanması için DTU 10 MW rüzgâr türbini modellenip elde edilen sonuçlar literatürdeki değerlerle kıyaslanmıştır.

Tekil kazık olmaksızın DTU 10 MW rüzgâr türbini Ashes ortamında Şekil 6.10'daki gibi modellenmiştir.



Şekil 6.10. DTU 10 MW rüzgâr türbininin hem tekil kazık olmaması hem de zemin etkisinin dikkate alınmadığı durum için Ashes ortamında modellenmesi

Tekil kazığın olmaması ve zemin etkisinin dikkate alınmadığı durum için literatürdeki sonuçlar Çizelge 6.1’de verilmiştir.

Çizelge 6.1. DTU 10 MW rüzgâr türbininin literatürdeki doğal frekans değerleri

Literatürdeki çalışma	Tekil kazık olmaması ve zemin etkisinin dikkate alınmaması durumunda DTU 10 MW rüzgâr türbininin doğal frekans değeri
Bak ve diğ. (2013)	0,249 Hz
Alkhoury ve diğ. (2020)	0,250 Hz

Bölümün başından itibaren bahsedilen yöntemlere göre elde edilen sonuçlar ve Ashes ortamında elde edilen sonuçlar ise Çizelge 6.2’de verilmiştir.

Çizelge 6.2. DTU 10 MW rüzgâr türbininin bahsedilen yöntemlerle hesaplanan doğal frekans değerleri

Yöntem	Tekil kazık olmaması ve zemin etkisinin dikkate alınmaması durumunda DTU 10 MW rüzgâr türbininin doğal frekans değeri	Mutlak yüzde bağıl fark (%)
Arany ve diğ. (2016)	0,252 Hz	1,19
Jiang ve diğ. (2023)	0,261 Hz	4,60
Simis Ashes 3.20.1	0,249 Hz	-

Çizelge 6.1 ve Çizelge 6.2’den de görüleceği üzere Ashes programıyla yapılan analizlerden elde edilen sonuçlarla literatürden elde edilen verilerle uyumludur. Ayrıca, yukarda bahsi geçen yöntemlerden Arany ve diğ. (2016) tarafından önerilen yöntemle elde edilen sonuç genel olarak diğer verilerle uyum gösterirken, Jiang ve diğ. (2023) tarafından önerilen yöntemle elde edilen sonuç diğer sonuçlara nazaran farklılık göstermektedir.

Tekil kazıklı halde zemin etkisinin dikkate alınmadığı durum için doğal frekans analizi

Bu bölümde, tekil kazığın bulunduğu durumda daha önceki bölümlerde tanıtılan sistemin doğal frekans analizi yapılacaktır. Söz konusu bu analiz yapılırken yine bir önceki bölümdeki adımlar takip edilecektir. Bu çalışmada bahsi geçen sistem ile Şekil 6.11’de verilen Alkhoury ve diğ. (2020) tarafından analiz edilen sistem birbirine benzerlik göstermektedir. Alkhoury ve diğ. (2020) tarafından rüzgâr türbini özellikleri ve kütleleri Çizelge 6.3’te verilmiştir.

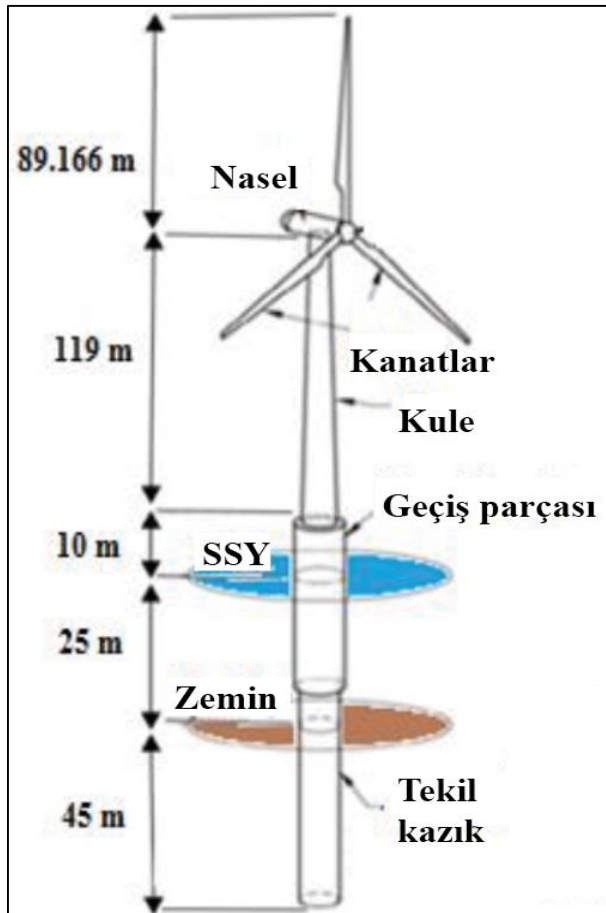
Çizelge 6.3. DTU 10 MW rüzgâr türbininin özellikleri (Alkhoury ve diğ., 2020)

Temel tanım	Maksimum nominal güç	10 MW
Kanatlar	Rotor yönü, konfigürasyonu	Rüzgâr yönlü, 3 kanat
	Rotor çapı	178,332 m
	Göbek yüksekliği	119 m
	Devreye girme; nominal ve devreden çıkma rüzgâr hızı	4; 11,4; 25,0 m/s
	Devreye girme; nominal rotor hızı	6; 9,6 devir/dakika
	Kanat uzunluğu	86,366 m
	Kanat uzunluğu boyunca bulunan profil sayısı	5

	Toplam kütle	41 716 kg
--	--------------	-----------

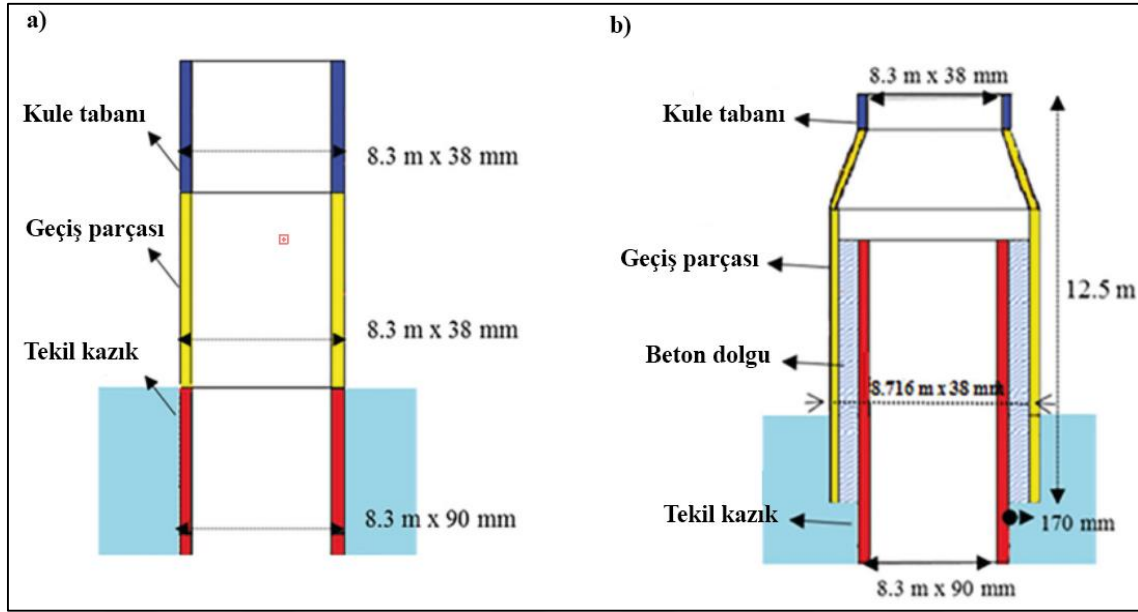
Çizelge 6.3. (devam) DTU 10 MW rüzgâr türbininin özellikleri (Alkhoury ve diğ., 2020)

Göbek ve nasel	Göbek çapı	5,6 m
	Göbek kütlesi	105 520 kg
	Nasel kütlesi	446 036 kg
Kule	Yükseklik	115,63 m
	Kütle	682 442 kg



Şekil 6.11. DTU 10 MW rüzgâr türbininin önden görünüşü (Alkhoury ve diğ., 2020)

Şekil 6.12’de ise geçiş parçasının birleşme detayı verilmiştir.



Şekil 6.12. Kule tabanı, geçiş parçası ve tekil kazık arasındaki bağlantının temsili, (a) Sürekli bağlantı, (b) Beton dolgulu bağlantı (Alkhoury ve diğ., 2020)

Alkhoury ve diğ. (2020) çalışmalarında, beton dolgulu bağlantı olması durumunda birinci doğal frekans değerini, zemin etkisinin dikkate alınmasıyla beraber, 0,200 Hz; sürekli bağlantı olması durumunda ise 0,201 Hz olarak hesaplamışlardır (%0,3'lük bir fark). Dolayısıyla, doğal frekans değerinin bağlantının şeklinden bağımsız olduğunu belirtmişlerdir. Bu çalışmada bağlantı, daha önce deformasyon hesaplanırken de dikkate alındığı için, beton dolgulu bağlantı olarak modellenmiştir.

Alkhoury ve diğ. (2020) tekil kazığın olması durumunda kendi sistemleri için yapmış oldukları analizde sistemin doğal frekans değerini 0,226 Hz olarak bulmuşlardır.

Şekil 6.13'te tekil kazık bulunması fakat zemin etkisinin dikkate alınmadığı durumda Ashes ortamında modellenen sistem verilmiştir.



Şekil 6.13. DTU 10 MW rüzgâr türbininin tekil kazık olması fakat zemin etkisinin dikkate alınmadığı durum için Ashes ortamında modellenmesi

Tekil kazığının bulunması durumunda çalışma içinde bahsi geçen yöntemlere göre elde edilen sonuçlar ve Ashes ortamında elde edilen sonuç Çizelge 6.4'te verilmiştir.

Çizelge 6.4. Tekil kazıklı DTU 10 MW rüzgâr türbininin bahsedilen yöntemlerle hesaplanan doğal frekans değerleri

Yöntem	Tekil kazık olması ve zemin etkisinin dikkate alınmaması durumunda DTU 10 MW rüzgâr türbininin doğal frekans değeri	Mutlak yüzde bağıl fark (%)
Arany ve diğ. (2016)	0,208 Hz	7,21
Jiang ve diğ. (2023)	0,220 Hz	1,36
Simis Ashes 3.20.1	0,223 Hz	-

Jiang ve diğ. (2023) yapmış oldukları çalışmalarında, Alkhoury ve diğ. (2020) tarafından yapılan çalışmayı da ele almışlar ve zemin etkisi dikkate alınmaksızın rüzgâr türbininin doğal frekansını 0,221 Hz bulmuşlardır.

Alkhoury ve diğ. (2020)'nin yaptığı çalışmadaki sistemle söz konusu bu çalışmada ele alınan sistem benzer olduğu için bu sonucun uyumlu ve tutarlı olduğu görülmüştür. Yine Çizelge 6.4'ten görüleceği üzere Jiang ve diğ. (2023) tarafından önerilen yöntemle yapılan hesaplamalarda sistemin doğal frekansı ile Alkhoury ve diğ. (2020) tarafından elde edilen sonuç uyumludur. Ashes ile bulunan sonuç da her iki sonuçla uyumluluk gösterirken Arany ve diğ. (2016) tarafından önerilen yöntemle yapılan hesaplama ise diğer sonuçlar ile uyumsuzluk içerisinde. Jiang ve diğ. (2023) ile Ashes ortamından elde edilen sonuçların tekil kazık bulunması durumunda, zemin etkisinin dikkate alınmadığında dahi iyi sonuçlar verdiği söylenebilir.

Ashes ortamında hesaplama yapılırken hem rüzgâr hem dalga hem de akıntı modellemesi yapılmıştır.

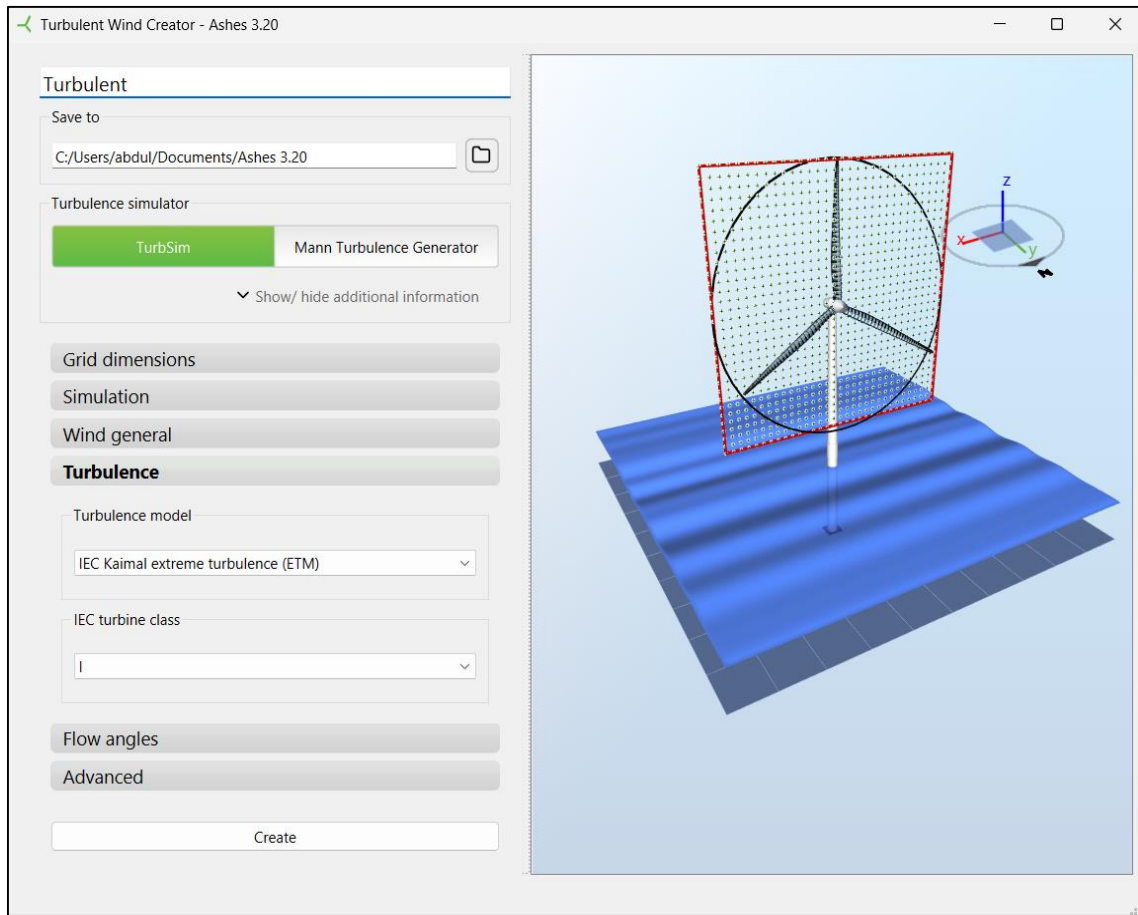
Ashes ortamında rüzgâr modellemesi yapılırken rüzgâr modeli olarak türbülans modeli seçilmiştir. Daha önce deformasyon analizi de yapılırken söz konusu bu model seçilmiş ve buna bağlı parametreler kullanılmıştır. Türbülanslı rüzgâr üretimi için iki farklı simülasyon bulunmaktadır. Bunlar sırasıyla TurbSim (Türbülans Simülasyonu – Turbulence Simulation) ve Mann Turbulence Generator (Mann Türbülans Üretici) modelleridir. Bu modeller rüzgâr enerjisi araştırmaları için kullanılan iki farklı türbülans modelleme aracıdır. Her ikisi de türbülanslı rüzgâr alanlarını modellemek amacıyla tasarlanmış olup, farklı yöntemler ve prensipler kullanır.

TurbSim, rüzgâr türbülansını simüle etmek için geliştirilmiş bir yazılımdır. Bu yazılım, rüzgâr türbinlerinin simülasyonları için uygundur. TurbSim, genellikle Kaimal spektrumu olarak bilinen bir spektral yoğunluk fonksiyonuna dayanarak rüzgâr hızlarını bilgisayar simülasyonları ile üretir. Bu simülasyonlar zamansal ve alansal korelasyonlara, türbülans yoğunluklarına ve boyutlarına göre belirlenir. TurbSim, rüzgâr türbini tasarımında yaygın olarak kullanılır ve türbinlere etki eden türbülans kaynaklı yükleri değerlendirmek için ideal bir araçtır.

Mann Turbulence Generator, rüzgârın mikro ölçekli türbülans yapısını modellemek için Karsten Mann tarafından geliştirilmiş bir modeldir (Mann, 1994). Bu model, rüzgâr alanlarını oluştururken bir alansal filtrasyon yöntemini kullanır. Mann modeli, izotropik türbülans varsayımına dayanarak rüzgâr türbülansını üç boyutlu olarak simüle eder. Bu

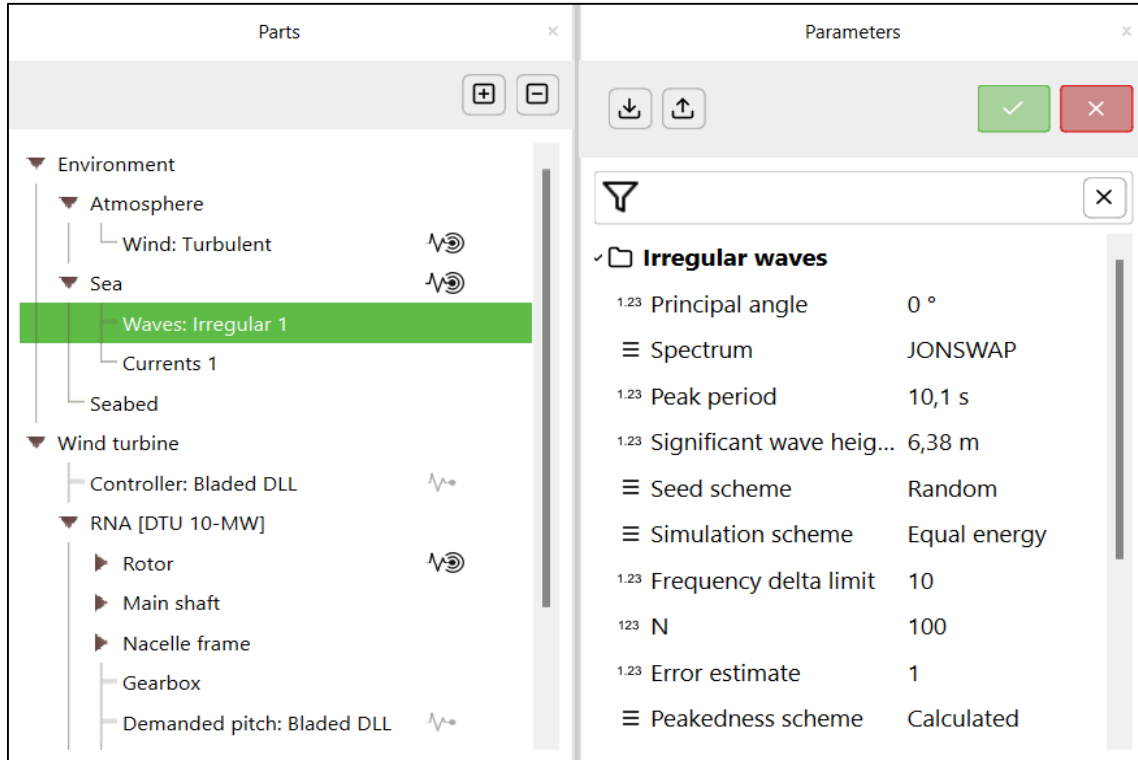
model, türbülans enerjisini bir enerji spektrumu formatında tanımlar ve rüzgârdaki türbülans enerjisini uzaysal olarak dağıtır. Mann Turbulence Generator, rüzgâr türbinlerinin küçük ölçekli türbülans etkilerini incelemek için kullanılır.

IEC– 61400 – 1 (2019)’a göre rüzgâr türbülans modeli seçimi yapılabildiğinden, Kaimal spektrumu kullandığından ve türbülans yoğunluk kategorisinin seçimi yapılabildiğinden bu çalışmada TurbSim simülasyonu kullanılmıştır ve Ashes ortamındaki arayüzü Şekil 6.14’te verilmiştir.



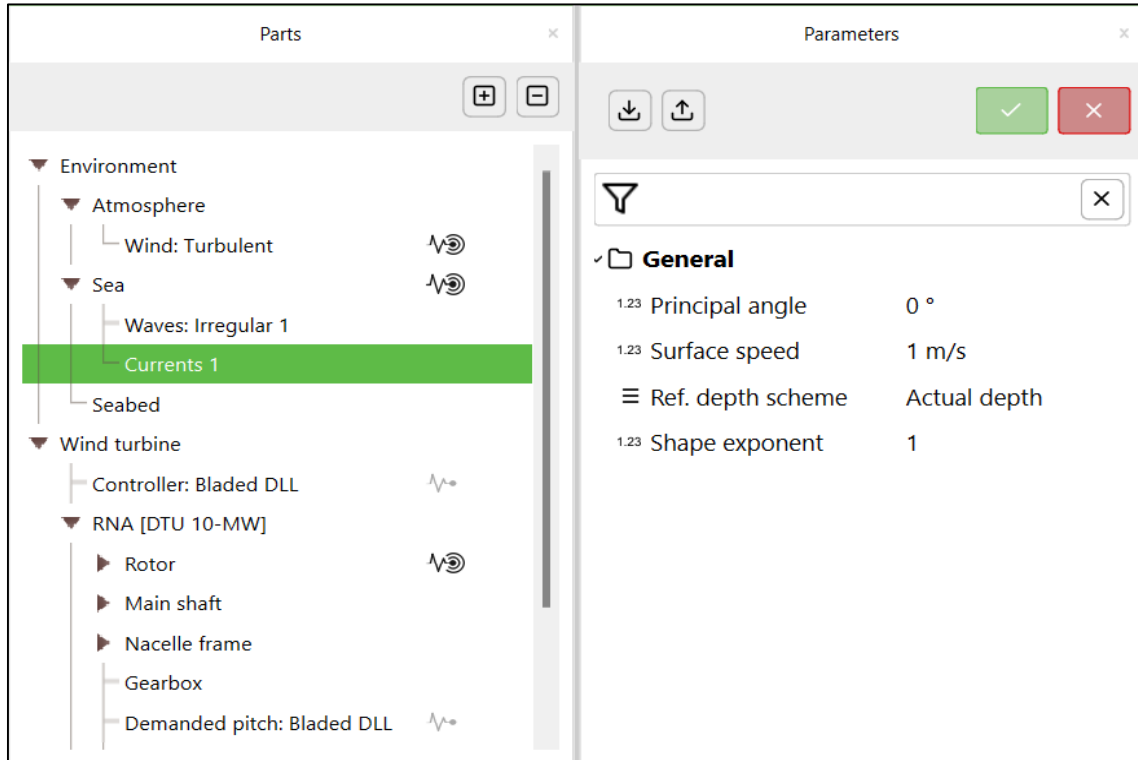
Şekil 6.14. Ashes ortamında rüzgârın modellenmesi

Yine Ashes ortamında dalga modellenirken JONSWAP (Joint North Sea Wave Project – Kuzey Denizi Ortak Dalga Projesi) spektrumu kullanılmıştır. Daha önceki bölümlerde elde edilen dalga verileri Ashes ortamına girilerek dalganın da modellenmesi Şekil 6.15’te verilmiştir.



Şekil 6.15. Ashes ortamında dalganın modellenmesi

Benzer biçimde akıntının Ashes ortamında modellenmesi de Şekil 6.16’da gösterilmiştir.



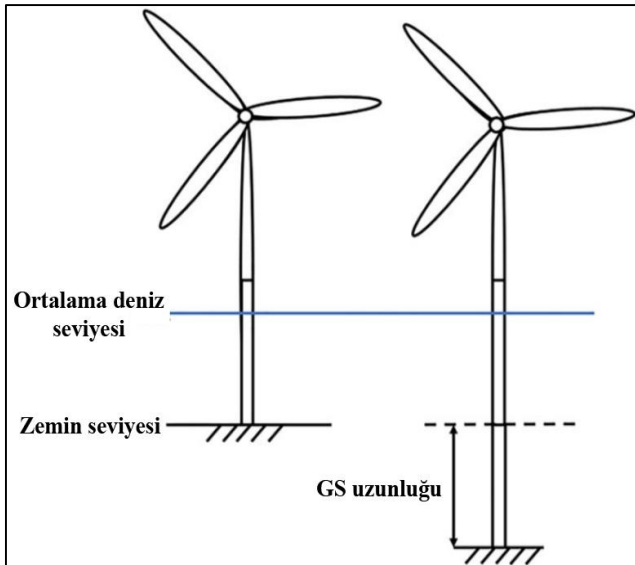
Şekil 6.16. Ashes ortamında akıntının modellenmesi

6.1.2. Zemin etkisinin dikkate alındığı durum için doğal frekans hesaplamaları

Bir önceki bölümde, zemin etkisinin dikkate alınmadığı durumda, zemin tamamen rijit bir ortam olarak göz önüne alınarak hesaplamalar yapılmış ve doğal frekans değerleri elde edilmiştir. Fakat zemine gömülü kazık bulunması durumunda bu kabul doğru olmamaktadır. Çünkü zemin elastik bir ortamdır ve kazık bu ortam içerisinde deforme olmaktadır. Dolayısıyla zemin etkisinin dikkate alındığı durum ile zemin etkisinin dikkate alınmadığı durum arasında, doğal frekans değerleri açısından farklılıklar bulunması öngörülebilir. Şekil 6.3'ten de görüleceği üzere zemin etkisinin dikkate alındığı durum için üç farklı yöntem literatürde mevcuttur. Bu bölümde sırasıyla bunlar tek tek açıklanarak bahsi geçen sistem için doğal frekans hesaplamaları söz konusu yöntemlerle yapılacaktır.

Görünür sabitlik (Apparent fixity) yöntemi

Görünür sabitlik (GS) yöntemi, yapının deniz tabanındaki gerçek zemine gömülü kazıkla aynı yanal yer değiştirme ve dönmeyi gerçekleştirecek bir derinlikte ankastre olduğu varsayımını kabul eder (Bergua ve diğ., 2021). Dolayısıyla bu yöntemde zemin etkisi tekil kazık yapısı uzatılarak dikkate alınır. Yöntemin görsel ifadesi Şekil 6.17'deki gibidir (Løken ve Kaynia, 2019).



Şekil 6.17. Ankastre mesnet yönteminde kullanılan model (solda) ve zeminin elastisitesinin görünür sabitlik (GS) metodu ile dikkate alındığı model (sağda) (Løken ve Kaynia, 2019)

Zemin esnek bir yapı olduğundan daha önce de belirtildiği üzere bağlı yaylarla modellenir. Bu çalışmada zemin yanal deformasyon rijitlik katsayısı, dönme rijitlik katsayısı ve çapraz rijitlik katsayısı Poulos ve Davis (1980) tarafından verilen yöntemle hesaplanmıştır. Poulos ve Davis (1980)'e göre lineer homojen olmayan zeminde, rijit kazıklar için bu değerler Eş. 6.67 ile Eş. 6.69 arasında verilmiştir.

$$K_L = \frac{1}{2} L_p^2 n_h \quad (6.67)$$

$$K_{LR} = -\frac{1}{3} L_p^3 n_h \quad (6.68)$$

$$K_R = \frac{1}{4} L_p^4 n_h \quad (6.69)$$

Deformasyonların elde edilmesi için daha önce elde edilen matris dolayısıyla Eş. 6.70'teki gibi yazılabilir.

$$K = \begin{bmatrix} K_L & K_{LR} \\ K_{LR} & K_R \end{bmatrix} \quad (6.70)$$

Aynı matris uzatılan sistem için Euler kirişi kabulü yapılarak Eş. 6.71'teki gibi yazılır.

$$K = \begin{bmatrix} \frac{12(EI)_{GS}}{L_{GS}^3} & -\frac{6(EI)_{GS}}{L_{GS}^2} \\ -\frac{6(EI)_{GS}}{L_{GS}^2} & \frac{4(EI)_{GS}}{L_{GS}} \end{bmatrix} \quad (6.71)$$

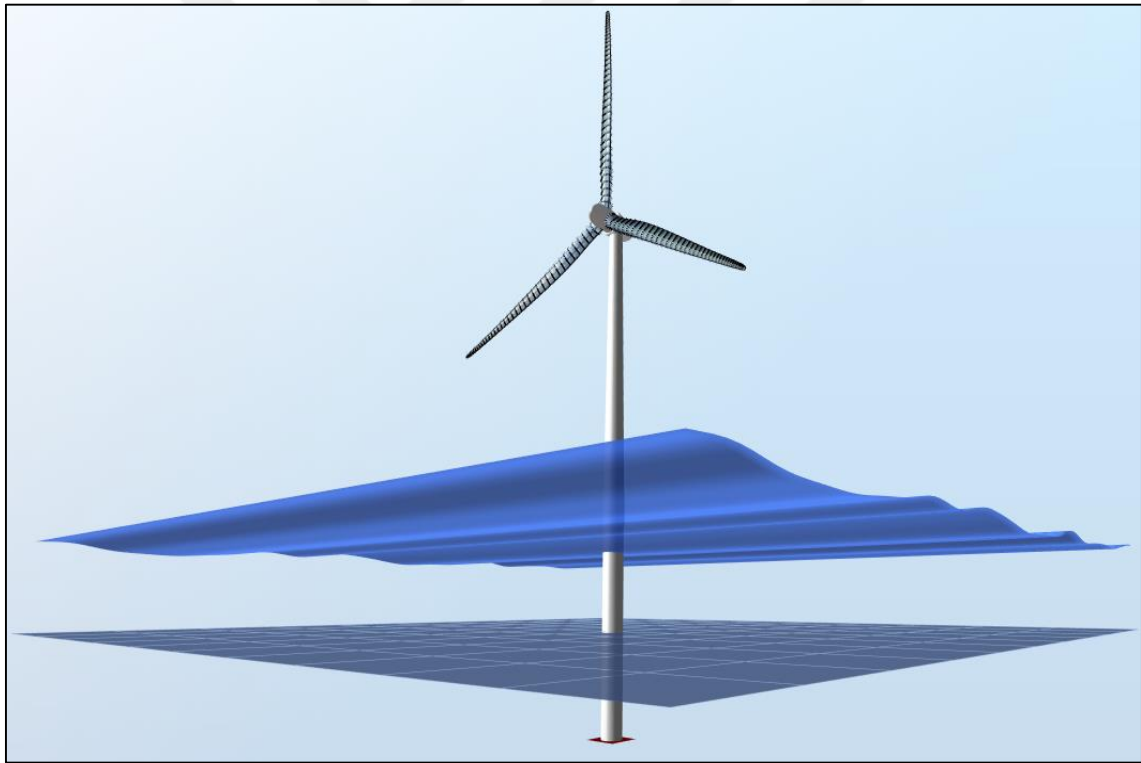
Burada, $(EI)_{GS}$; uzatılan kısmın eğilme rijitliği, L_{GS} ; ise uzatılma miktarıdır. Eğer bu iki matris birbirine eşit olursa söz konusu uzatma ile zeminin etkisi eşit biçimde göz önüne alınmış olur. Yöntemin bu kısmında her bir terimin birebir aynı olması şartı aranmamakla beraber sadece asal köşegenlerdeki elemanların birbirine eşit olması yeterlidir (Alkhoury ve diğ., 2020).

Bu çalışmada bahsedilen sistem için uzatılan kısmın atalet momentinin, I_{GS} , tekil kazığın atalet momenti ile, I_P , eşit olduğu kabul yapılarak uzatılacak kısmın elastisite modülü Eş. 6.72 ve Eş. 6.73 ile bulunur.

$$K = \begin{bmatrix} 2,33E + 09 & -4,81E + 10 \\ -4,81E + 10 & 1,12E + 12 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{12(EI)_{GS}}{L_{GS}^3} & -\frac{6(EI)_{GS}}{L_{GS}^2} \\ -\frac{6(EI)_{GS}}{L_{GS}^2} & \frac{4(EI)_{GS}}{L_{GS}} \end{bmatrix} \quad (6.72)$$

$$I_P = I_{GS} = 19,56 \text{ m}^4 ; L_{GS} = 37,97 \text{ m} ; E_{GS} = 5,43E + 11 \quad (6.73)$$

Söz konusu bu değerlerle Ashes ortamında yapılan model Şekil 6.18’te verilmiştir.



Şekil 6.18. Görünür sabitlik yöntemiyle sistemin Ashes ortamında modellenmesi

Görünür sabitlik yöntemiyle uzatılmış tekil kazığın Ashes ortamındaki kodu EK – 1’de verilmiştir. Söz konusu bu yöntemle Ashes ortamında sistemin doğal frekansı 0,204 Hz olarak elde edilmiştir.

Alkhoury ve diğ. (2020) çalışmalarında rijitlik matrisi, K , değerlerini gevşek kum için, kendi sınır şartlarına bağlı olarak LPILE ortamından Eş. 6.74'teki gibi elde etmişlerdir.

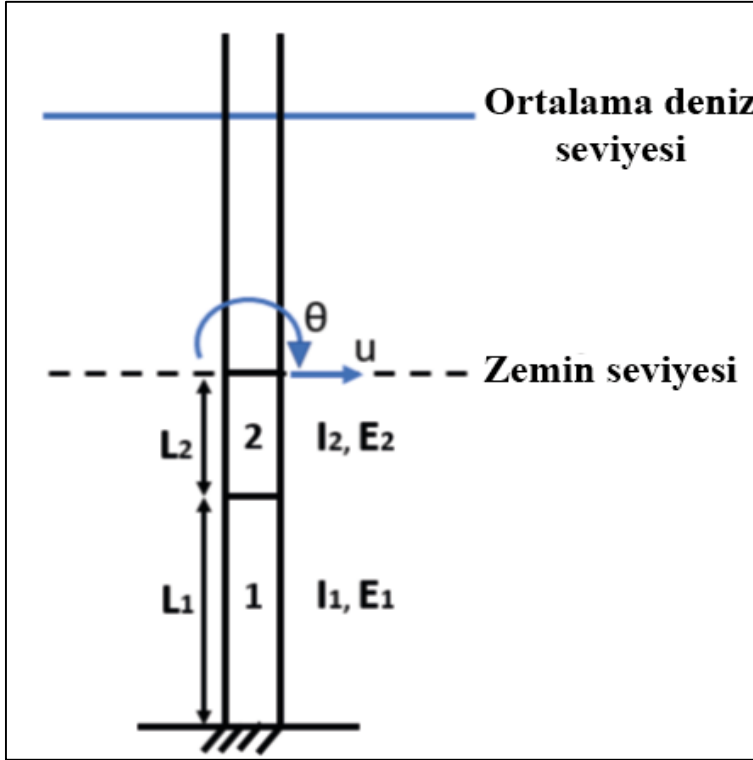
$$K = \begin{bmatrix} 2,48E + 09 & 2,07E + 10 \\ 2,07E + 10 & 4,12E + 11 \end{bmatrix} \quad (6.74)$$

Buna bağlı olarak uzatılmış kazık boyu ve eğilme rijitliği değerlerini ise Eş. 6.75'teki gibi hesaplamışlardır.

$$L_{GS} = 22,34 \text{ m} ; EI_{GS} = 2,3E + 12 \quad (6.75)$$

Bu değerler Ashes ortamında yerine konulursa 0,182 Hz değeri bulunur ki Alkhoury ve diğ. (2020) bu değeri 0,179 Hz olarak bulmuşlardır (%1,67). Yine bu sonuçla Ashes yazılımından doğru sonuçlar elde edildiği görülebilir.

Løken (2017) görünür sabitlik yöntemini bir adım öteye taşımış ve geliştirilmiş görünür sabitlik yöntemini önermiştir. Bu yöntemin önerilmesinin sebebi sadece asal köşegendeki elemanların değil aynı zamanda yedek köşegendeki elemanların da eşitlenmesidir. Böylece daha doğru sonuç elde edilmesi amaçlanmıştır. Yöntemin geliştirilmesi için Şekil 6.19 göz önüne alınarak eşitlikler türetilmiştir.



Şekil 6.19. Geliştirilmiş görünür sabitlik yöntemi (Løken (2017))

Løken (2017) zemin seviyesini temsil eden elastisite matrisi aracılığıyla tek bir kiriş yapısı değil ikili kirişin özelliklerinin ayrı ayrı belirlenmesini önermiştir. Esneklik matrisi, rijitlik matrisinin tam tersidir ve uygulanan birim kuvvet veya moment için meydana gelen yer değiştirme veya dönmeyi gösterir (Bergua ve diğ., 2021). İki boyutlu bir sistem için zemin seviyesini temsil eden elastisite matrisi Eş. 6.76'daki gibi verilir.

$$[K_{zemin}]^{-1} = \begin{bmatrix} \delta_{uu} & \delta_{u\theta} \\ \delta_{\theta u} & \delta_{\theta\theta} \end{bmatrix} \quad (6.76)$$

Burada, δ_{uu} ; birim yatay kuvvet kaynaklı yatay yer değiştirme, $\delta_{u\theta}$; birim yatay kuvvet kaynaklı dönme, $\delta_{\theta u}$; birim moment tarafından oluşturulan dönme ve $\delta_{\theta\theta}$; birim moment tarafından oluşturulan dönmedir.

Løken (2017) çalışmasından yola çıkarak Eş. 6.77, Eş. 6.78 ve Eş. 6.79'i önermiştir.

$$\delta_{uu} = \frac{1}{E_1 I_1} \left(\frac{L_1^3}{3} + L_1^2 L_2 + L_2^2 L_1 \right) + \frac{L_2^3}{3 E_2 I_2} \quad (6.77)$$

$$\delta_{u\theta} = \delta_{\theta u} = \frac{1}{E_1 I_1} \left(\frac{L_1^2}{2} + L_1 L_2 \right) + \frac{L_2^2}{2 E_2 I_2} \quad (6.78)$$

$$\delta_{\theta\theta} = \frac{L_1}{E_1 I_1} + \frac{L_2}{E_2 I_2} \quad (6.79)$$

Bu eşitlikler çözülürken yine atalet momentinin tekil kazıkla aynı olduğu kabulü yapılır. Geriye dört bilinmeyen ve üç denklem kalır ki bu da L_2 değerinin kabulüyle üç denklem üç bilinmeyene düşürülür. Sistem için bu çözüm yapılacak olursa öncelikle Eş. 6.80 ve Eş. 6.81 ile elastisite matrisi elde edilir.

$$K = \begin{bmatrix} 2,33E + 09 & -4,81E + 10 \\ -4,81E + 10 & 1,12E + 12 \end{bmatrix} \quad (6.80)$$

$$K^{-1} = \begin{bmatrix} 3,86E - 09 & 1,66E - 10 \\ 1,66E - 10 & 8,04E - 12 \end{bmatrix} \quad (6.81)$$

Tekil kazığın atalet momenti ile uzatılan kirişlerin atalet momentleri eşit kabulü yapılır ve L_2 değeri, gömülü kazık derinliğinden daha az bir uzunluk, 10 metre olarak kabul edilirse E_1 ve E_2 değerleri sırasıyla Eş. 6.82'deki gibi elde edilir.

$$I_p = I_1 = I_2 = 19,56 \text{ m}^4; L_2 = 10 \text{ m}; L_1 = 22,83 \text{ m}; E_1 = 1,52E11; E_2 = 1,36E12 \quad (6.82)$$

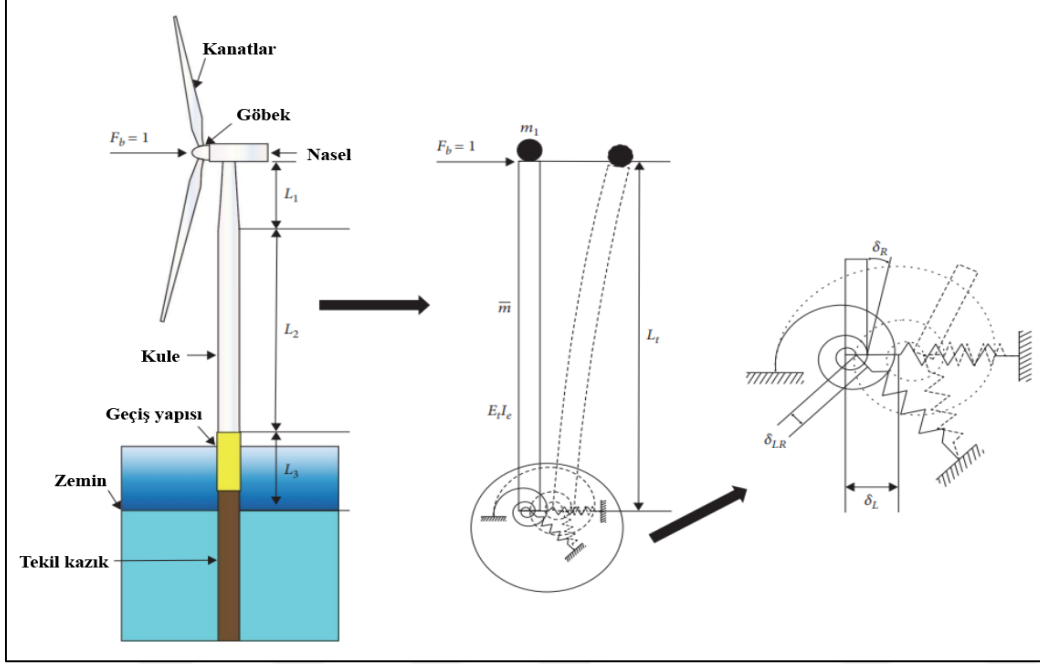
Eş. 6.82'deki değerleri yerine konulursa rijitlik matrisi elde edilir ki, artık yedek köşegen değerleri de eşitlenmiş olur.

Söz konusu bu değerlerle Ashes ortamında benzeşimler yapılırken sistemin doğal frekans değeri 0,184 Hz olarak elde edilmektedir. Ashes ortamında yazılan söz konusu bu kod EK – 2'de verilmiştir.

Bağlı yaylar (Coupled springs) yöntemi

Bağlı yaylar yöntemi daha önce deformasyonlar hesaplanırken kullanılan yöntemin birebir aynısıdır. Zemin birbirinden bağımsız fakat zemin özelliklerine bağlı olarak yaylarla temsil edilir. Arany ve diğ. (2016) ve Jiang ve diğ. (2023) zemin etkisini dikkate alırken söz konusu

bu yöntemi kullanmışlardır. Fakat Arany ve diğ. (2016) çalışmalarında belli bir aralıktaki L/D oranlarına sahip tekil kazıklı yapıları incelediklerinden, geniş çaplı kazıklarda bu yöntemin kullanılması mümkün değildir. Jiang ve diğ. (2023) ise söz konusu bu yöntemi Şekil 6.20'deki gibi görselleştirmişlerdir.



Şekil 6.20. Tekil kazıklı deniz üzeri rüzgâr türbini modeli (Jiang ve diğ., 2023)

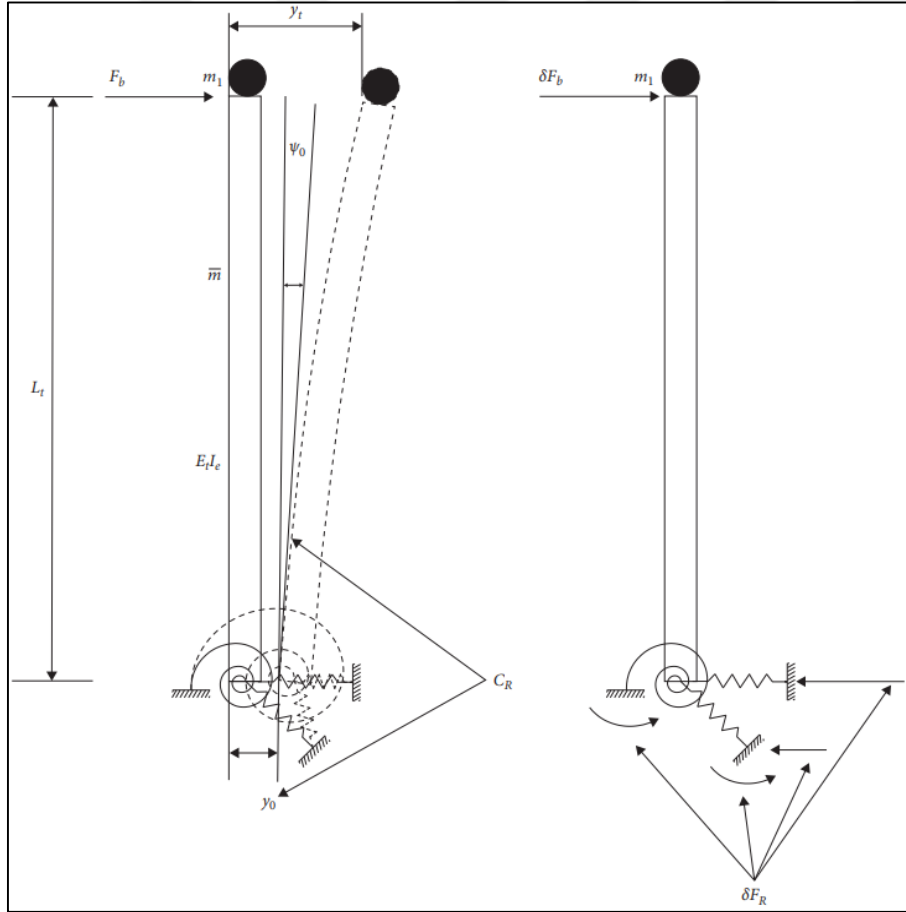
Burada, δ_L ; yatay yöndeki elastisite, δ_R ; dönme elastisitesi, δ_{LR} ; çapraz yöndeki elastisite değeridir. Jiang ve diğ. (2023) yapmış oldukları analizde doğrusal sistem çözümü üzerinde durmuşlardır. Dolayısıyla bu yöntemde doğrusal olmayan zemin davranışı modellenmemiştir. Tekil kazıklı sistemlerde zemin genellikle, gömülü kazık boyu kısa olduğundan, doğrusal olmayan bir rejim bölgesinde bulunmaz ve bu nedenle doğrusal bir yaklaşımın kabul edilmesi çözümde bir hataya yol açmaz (Arany ve diğ., 2016). Zeminin altındaki tekil kazık ve zemin arasındaki etkileşim yaylarla temsil edilir. Genellikle tekil kazık temelinde oturma dikkate alınmaz ve dolayısıyla düşey ekseninde herhangi bir yay çözümde kullanılmaz.

Zemin seviyesindeki yatay kuvvet, moment, deplasman ve dönme arasındaki bağıntı Eş. 6.83 ile verilmiştir.

$$\begin{Bmatrix} y_0 \\ \Psi_0 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \delta_L & \delta_{LR} \\ \delta_{LR} & \delta_R \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} F_0 \\ M_0 \end{Bmatrix} \quad (6.83)$$

Burada, F_0 ; zemin seviyesindeki yatay kuvvet, M_0 ; zemin seviyesindeki moment, y_0 ; zemin seviyesindeki yanal deplasman ve Ψ_0 ; zemin seviyesindeki dönme değeridir.

Jiang ve diğ. (2023), kulenin göbek kısmına F_b yükü uygulandığında zemindeki deplasman değerlerinin C_R olduğu kabulünü yapmışlardır. Kulenin tepesindeki yer değiştirme değerini, y_t , hesaplamak için ise sanal iş prensibine dayalı olarak, sanal bir kuvvet oluşturmuşlardır. Kulenin göbek noktasında sıfırdan farklı bir δF_b kuvvet artışı uygulandığında zemindeki reaksiyon kuvvet artışını δF_R olarak Şekil 6.21'deki gibi göstermişlerdir.



Şekil 6.21. Sanal iş (Jiang ve diğ., 2023)

Momentteki artış, δM ve zemin noktasındaki reaksiyon kuvvet artışı, δF_R , Eş. 6.84 ve Eş. 6.85'te verilmiştir.

$$\delta M = \frac{\partial M}{\partial F_b} \delta F_b \quad (6.84)$$

$$\delta F_R = \frac{\partial F_R}{\partial F_b} \delta F_b \quad (6.85)$$

Sanal kuvvet, sistemde deformasyon olması durumunda sanal iş yapmış olur ve bu kuvvetin denklemi Eş. 6.86'daki gibi yazılabilir.

$$y_t \delta F_b + C_R \delta F_R = \int_0^{L_t} \frac{M}{E_t I_e} \delta M dz \quad (6.86)$$

Eş. 6.84 ve Eş. 6.85'yi Eş. 6.86'da yerine koyularak Eş. 6.87 elde edilir.

$$y_t = \int_0^{L_t} \frac{M}{E_t I_e} \frac{\partial M}{\partial F_b} dz - C_R \frac{\partial F_R}{\partial F_b} \quad (6.87)$$

Zemin deplasman değerleri, C_R ve zemin reaksiyon değerleri, F_R , göbek noktasındaki kuvvetin, F_b , fonksiyonu olduğundan Eş. 6.88 yazılabilir.

$$\frac{\partial (C_R F_R)}{\partial F_b} = C_R \frac{\partial F_R}{\partial F_b} + F_R \frac{\partial C_R}{\partial F_b} \quad (6.88)$$

Eş. 6.88, Eş. 6.87'de yerine konulur ve gerekli sadeleştirmeler yapılırsa Eş. 6.89 elde edilir.

$$y_t = \frac{\partial}{\partial F_b} \int_0^{L_t} \frac{M^2}{2E_t I_e} dz - \frac{\partial (C_R F_R)}{\partial F_b} + F_R \frac{\partial C_R}{\partial F_b} \quad (6.89)$$

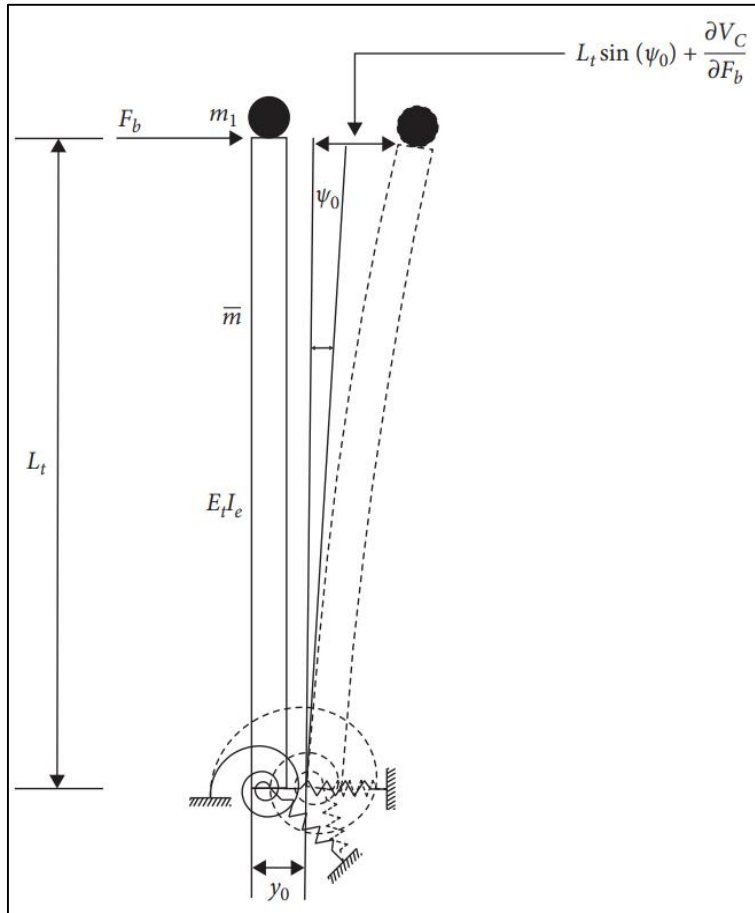
Eş. 6.89'daki integral ifadesi, daha önce de elde edildiği gibi, deformasyon enerjisidir. Dolayısıyla, Eş. 6.89 aşağıdaki hali alır (Eş. 6.90).

$$y_t = \frac{\partial V_c}{\partial F_b} - \frac{\partial (C_R F_R)}{\partial F_b} + F_R \frac{\partial C_R}{\partial F_b} \quad (6.90)$$

Zemin destek yer değiştirmesi, C_R , zemindeki deformasyon y_0 ve zemindeki dönme ψ_0 ile verilmiştir. Zemindeki reaksiyon ise, F_R , $-F_b$ ve oluşturduğu moment $-F_b L_t$ ile tanımlanmıştır. Dolayısıyla, $F_b = F_0$ ve $M_0 = F_b L_t$ kullanılarak, zemindeki tepkiler $-F_0$ ve $-M_0$ olarak ifade edilebilir. Eş. 6.83, Eş. 6.90'da yerine konursa Eş. 6.91 elde edilir.

$$y_t = \frac{\partial V_c}{\partial F_b} + y_0 + \Psi_0 L_t \quad (6.91)$$

Jiang ve diğ. (2023) şekil 6.22'de rüzgar türbininin şekil değiştirmesini vermişlerdir.



şekil 6.22. Tepeden yüklü yapının deformasyonu (Jiang ve diğ., 2023)

şekil 6.22'den de görüleceği üzere, geometriden, tepe noktasının deformasyonu Eş. 6.92'de verilmiştir.

$$y_t = y_0 + L_t \sin(\Psi_0) + \frac{\partial V_c}{\partial F_b} \quad (6.92)$$

Eş. 6.91 ve Eş. 6.92 sırasıyla sanal iş ve geometrik deformasyon şartlarından elde edilmiştir. Zemin seviyesindeki dönme, Ψ_0 , çok küçük değerler aldığıında Eş. 6.93 geçerli olur.

$$\sin(\Psi_0) = \Psi_0 ; \Psi_0 < 0,1 \text{ rad} \quad (6.93)$$

Dolayısıyla, Eş. 6.93'üm geçerli olduğu durumlarda, yani göreceli olarak küçük açılarda Eş. 6.91 ve Eş. 6.92 eşit olur. Jiang ve diğ. (2023) kulenin tepe noktasındaki deformasyon için Eş. 6.92'i kullanmışlardır. Daha sonra ise Eş. 6.83'ü Eş. 6.92'te yerine koyarak Eş. 6.94'ü elde etmişlerdir.

$$y_t = \delta_L F_0 + \delta_{LR} M_0 + L_t \sin(\delta_{LR} F_0 + \delta_R M_0) + \frac{\partial}{\partial F_0} \int_0^{L_t} \frac{(F_b z)^2}{2E_t I_e} dz \quad (6.94)$$

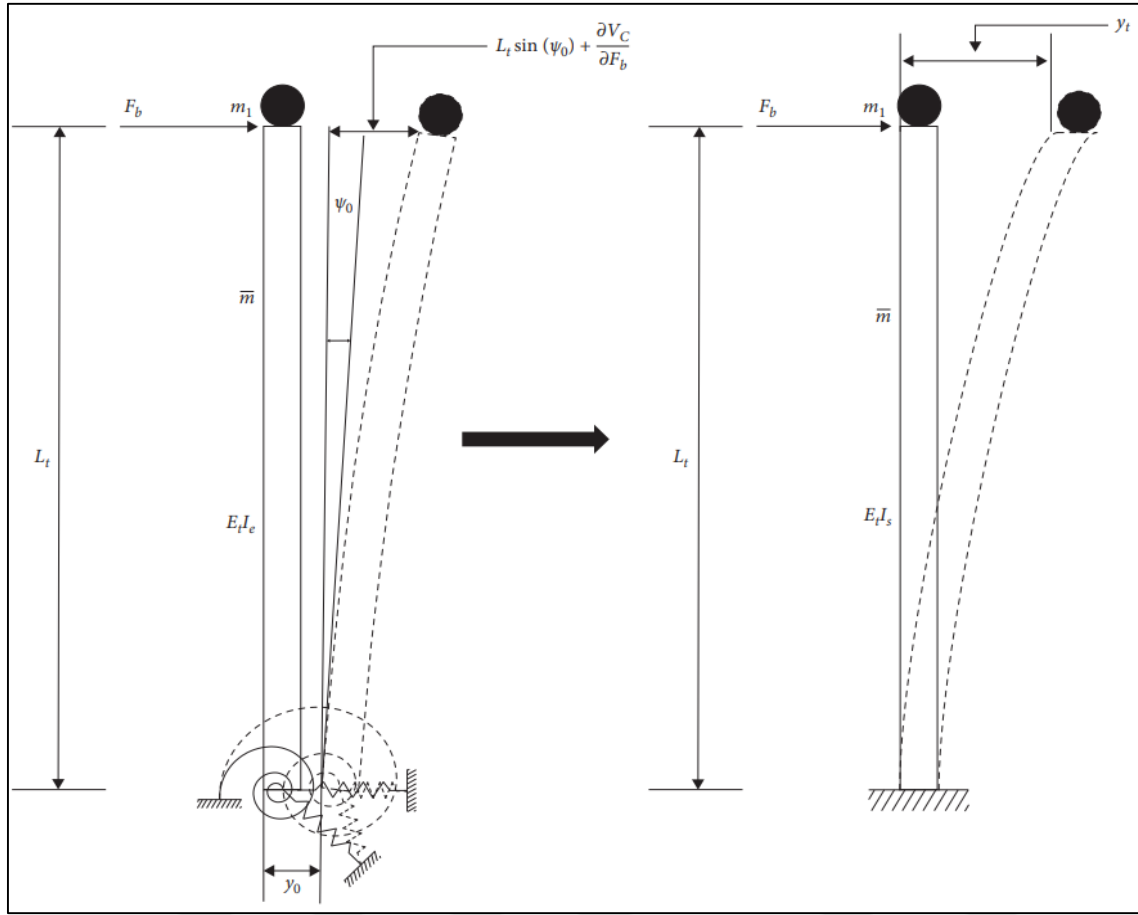
M_0 ve F_0 değerleri daha önce belirtildiği gibi Eş. 6.95'teki gibi tanımlanabilir.

$$M_0 = F_b L_t ; F_0 = F_b \quad (6.95)$$

Eş. 6.95, Eş. 6.94'te yerine konulur ve gerekli sadeleştirmeler yapılırsa Eş. 6.96 elde edilir.

$$y_t = \delta_L F_0 + \delta_{LR} F_0 L_t + L_t \sin(\delta_{LR} F_0 + \delta_R F_0 L_t) + \frac{F_0 L_t^3}{3E_t I_e} \quad (6.96)$$

Jiang ve diğ. (2023), yapının doğal frekansı üzerindeki zemin etkisini göz önünde bulundurarak, aynı yüke maruz kaldığında iki yapının tepesindeki yer değiştirmeleri eşit olacak şekilde eşdeğer bir yapı tanımlamışlardır (Şekil 6.23).



Şekil 6.23. Eşdeğer sistem (Jiang ve diğ., 2023)

Buna göre, aynı kuvvet altında tepe noktasındaki deplasman Eş. 6.97'deki gibi elde edilir.

$$y_t = \frac{\partial V_c}{\partial F_b} = \frac{\partial}{\partial F_b} \int_0^{L_t} \frac{(F_b z)^2}{2E_t I_s} dz = \frac{F_b L_t^3}{3E_t I_s} \quad (6.97)$$

Aynı yük altında deformasyonların eşit olması gerekliliğinden Eş. 6.98 elde edilir.

$$\frac{F_b L_t^3}{3E_t I_s} = \delta_L F_0 + \delta_{LR} F_0 L_t + L_t \sin(\delta_{LR} F_0 + \delta_R F_0 L_t) + \frac{F_0 L_t^3}{3E_t I_e} \quad (6.98)$$

Birim yük altında iki yapıdaki deformasyon da aynı olur ve Eş. 6.98, Eş. 6.99'ye dönüşür.

$$\frac{L_t^3}{3E_t I_s} = \delta_L + \delta_{LR} L_t + L_t \sin(\delta_{LR} + \delta_R L_t) + \frac{L_t^3}{3E_t I_e} \quad (6.99)$$

Eş. 6.99’da gerekli düzeltmeler yapılarak eşdeğer sistemin eğilme rijitliği, $E_t I_s$, Eş. 6.100’deki gibi elde edilir.

$$E_t I_s = \frac{L_t^3}{3 \left[\delta_L + \delta_{LR} L_t + L_t \sin(\delta_{LR} + \delta_R L_t) + \frac{L_t^3}{3 E_t I_e} \right]} \quad (6.100)$$

Dolayısıyla zemin etkisi dikkate alındığı durumda yapının doğal frekansı, f_z , Eş. 6.101’den bulunabilir.

$$f_z = \frac{J^2}{2\pi} \sqrt{\frac{E_t I_s}{0,228 \bar{m} L_t^4}} \quad (6.101)$$

Jiang ve diğ. (2023) bu hesaplamalar için aşağıdaki prosedürü önermişlerdir:

- Yapının zemin üzerindeki atalet momenti, I_e , hesaplanır.
- Tekil kazığın rijit mi yoksa esnek mi olduğunu zemin özelliklerine göre, Poulos ve Davis (1980) tarafından verilen eşitlikler ile, (Eş. 6.102 – Eş. 6.105) arasındaki denklemlerle belirlenir. Çok katmanlı zeminler için ise tekil kazığın gömülü uzunluğundaki kohezif ve kohezif olmayan zemin oranına bağlı olarak hesaplama yapılır.

$$L_P > 2,5 \left(\frac{4E_P I_P}{k_h D_P} \right)^{1/4} \quad \text{Esnek kazık, kohezif zeminler} \quad (6.102)$$

$$L_P < 1,5 \left(\frac{4E_P I_P}{k_h D_P} \right)^{1/4} \quad \text{Rijit kazık, kohezif zeminler} \quad (6.103)$$

$$L_P > 4,0 \left(\frac{E_P I_P}{n_h} \right)^{1/5} \quad \text{Esnek kazık, kohezif olmayan zeminler} \quad (6.104)$$

$$L_P < 2,0 \left(\frac{E_P I_P}{n_h} \right)^{1/5} \quad \text{Rijit kazık, kohezif olmayan zeminler} \quad (6.105)$$

- Zemin elastisite matrisi bulunur. Zemin özelliklerine ve kazığın rijit olup olmadığına bağlı olarak matrisin elemanları yine Poulos ve Davis (1980) tarafından verilen eşitlikler (Eş. 6.106 – Eş. 6.109) ile hesaplanır.

$$\begin{Bmatrix} y_0 \\ \Psi_0 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{2\beta}{k_h D_P} & \frac{2\beta^2}{k_h D_P} \\ \frac{2\beta^2}{k_h D_P} & \frac{4\beta^3}{k_h D_P} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} F_0 \\ M_0 \end{Bmatrix} \quad \text{Esnek kazık, kohezif zeminler (6.106)}$$

$$\begin{Bmatrix} y_0 \\ \Psi_0 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{4}{k_h D_P L_P} & \frac{6}{k_h D_P L_P^2} \\ \frac{6}{k_h D_P L_P^2} & \frac{12}{k_h D_P L_P^3} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} F_0 \\ M_0 \end{Bmatrix} \quad \text{Rijit kazık, kohezif zeminler (6.107)}$$

$$\begin{Bmatrix} y_0 \\ \Psi_0 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{2,40}{n_h^{3/5} (E_P I_P)^{2/5}} & \frac{1,60}{n_h^{2/5} (E_P I_P)^{3/5}} \\ \frac{1,60}{n_h^{2/5} (E_P I_P)^{3/5}} & \frac{1,74}{n_h^{1/5} (E_P I_P)^{4/5}} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} F_0 \\ M_0 \end{Bmatrix} \quad \begin{array}{l} \text{Esnek kazık} \\ \text{Kohezif olmayan zeminler} \end{array} \quad (6.108)$$

$$\begin{Bmatrix} y_0 \\ \Psi_0 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{18}{L_P^2 n_h} & \frac{24}{L_P^3 n_h} \\ \frac{24}{L_P^3 n_h} & \frac{36}{L_P^4 n_h} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} F_0 \\ M_0 \end{Bmatrix} \quad \begin{array}{l} \text{Rijit kazık} \\ \text{Kohezif olmayan zeminler} \end{array} \quad (6.109)$$

Burada, β ; esneklik katsayısıdır ve Eş. 6.110 ile verilir.

$$\beta = \sqrt[4]{\frac{k_h D_P}{4 E_P I_P}} \quad (6.110)$$

Burada, k_h ; kohezif zeminler için zemin yatak katsayısı modülüdür ve Eş. 6.111 ile belirlenir.

$$k_h = \frac{0,65}{D_P} \sqrt[12]{\frac{E_z D_P^4}{E_P I_P}} \left(\frac{E_z}{1 - v_s^2} \right) \quad (6.111)$$

Burada, E_z ; zeminin elastisite modülü ve v_s ; zeminin Poisson oranıdır.

- Yapının doğal frekansı hesaplanır. Önce, Eş. 6.93 ile eşdeğer sistemin atalet momenti hesaplanır. Daha sonra ise Eş. 6.94 ile zemin etkisinin dikkate alındığı sistemin doğal frekans değeri bulunur.

Jiang ve diğ. (2023) tarafından verilen bu basamaklar izlenerek söz konusu bu çalışmadaki sistem için doğal frekans değeri 0,190 Hz olarak bulunmuştur.

Yine bu çalışmada Arany ve diğ. (2016) tarafından yapılan çalışmayla ilk basamak, yani, sistemin zemin üzerindeki doğal frekans değeri hesaplanarak diğer adımlar izlenmiş ve bu değer 0,179 Hz olarak bulunmuştur. Yani burada izlenilen yöntemde, sistemin zemin etkisi dikkate alınmaksızın doğal frekans değeri Arany ve diğ. (2016) tarafından verilen yöntemle, devamında ise zemin etkisinin dikkate alınması Jiang ve diğ. (2023) tarafından verilen yöntemle hesaplanmıştır. Söz konusu bu kombine yöntem bundan sonra karma yöntem olarak adlandırılacaktır. Bu çalışmanın Excel ortamındaki kodu EK – 3’te verilmiştir.

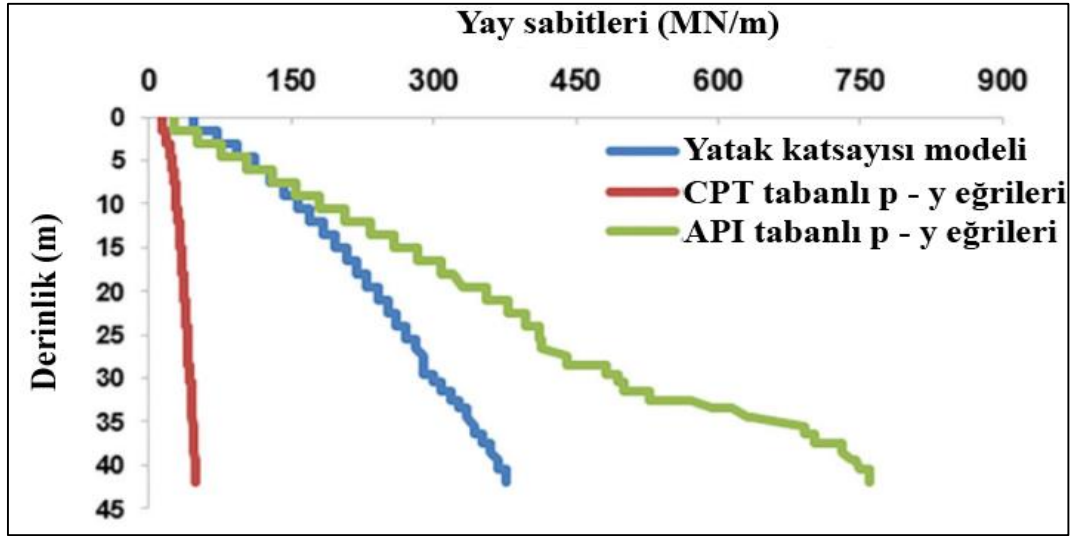
Simis ile bağlı yaylar yöntemiyle modellenen sistemin doğal frekans değeri ise 0,183 Hz olarak bulunmuştur. Bu yöntemle oluşturulan tekil kazığın Ashes ortamındaki kodu EK – 4’te verilmiştir.

Alkhoury ve diğ. (2020) çalışmalarında kullandıkları rijitlik matrisi, Eş. 6.74, Ashes ortamında bağlı yaylar yönteminde değer olarak girilirse doğal frekans değeri 0,201 Hz elde edilir.

Bu değer Alkhoury ve diğ. (2020) tarafından elde edilen değer ile birebir aynıdır. Bu sonuçla Ashes yazılımında, bağlı yaylar ile doğal frekans hesaplaması doğrulanmıştır.

Dağılı yaylar (Distributed springs) yöntemi

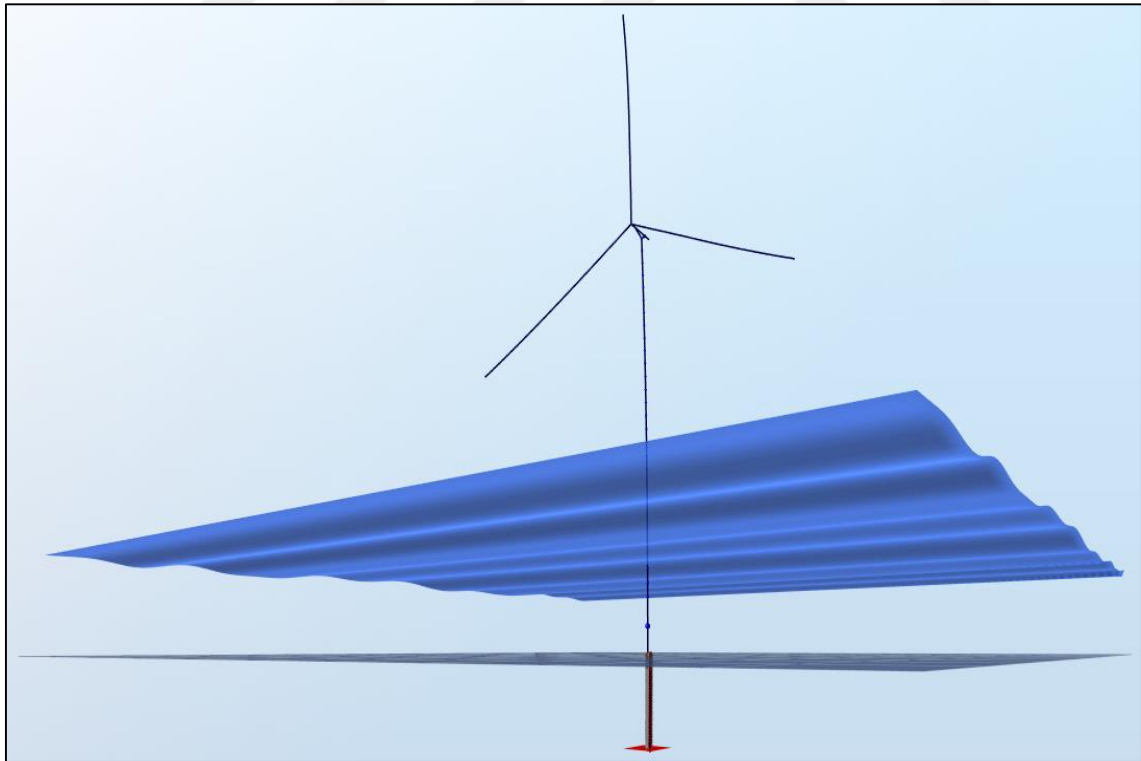
Dağılı yaylar yöntemi, $p - y$ eğrileri mantığının geçerli olduğu yöntemdir. Bu yöntemde zeminin elastik ortamı yaylarla modellenmiştir. Deformasyon hesaplarında $p - y$ eğrileri yönteminin doğru sonuç vermediği göz önüne alındığından, buradaki hesaplama $p - y$ eğrileriyle yapılmayacaktır. Alkhoury ve diğ. (2020) yapmış oldukları çalışmalarında söz konusu bu yaylar için üç farklı yöntem kullanmışlardır (Şekil 6.24).



Şekil 6.24. Yay sabitlerinin yöntemlere bağlı olarak derinlikle değişimi (Alkhoury ve diğ., 2020)

Bu çalışmada ara model olarak yatak katsayısı modeli kullanılmıştır.

Ashes ortamında yatak katsayısı yöntemi ile yapılan modelleme Şekil 6.25'te verilmiştir.



Şekil 6.25. Ashes ortamında yatak katsayısı yöntemi ile yapılan modelleme

Ashes ortamında dağılı yaylar yöntemiyle yapılan hesaplamalar sonucu sistemin doğal frekans değeri 0,191 Hz olarak bulunmuştur.

Bu bölümde bu kısma kadar elde edilen sonuçlar özet olarak Çizelge 6.5'te verilmiştir.

Çizelge 6.5. Farklı yöntemlerle zemin etkisi dikkate alınarak hesaplanan doğal frekans değerleri

Yöntem	Araştırmacı	Zemin etkisi dikkate alınarak hesaplanan doğal frekans değeri		Mutlak yüzde bağıl fark (%)
Görünür sabitlik		Analitik	Ashes	
	Görünür sabitlik	-	0,204 Hz	-
	Løken (2017)	-	0,184 Hz	-
Bağlı yaylar		Analitik	Ashes	
	Jiang ve diğ., (2023)	0,190 Hz	0,183 Hz	3,69
	Karma yöntem	0,179 Hz	0,183 Hz	2,23
Dağılı yaylar		Analitik	Ashes	
	Yatak katsayısı modeli	-	0,191 Hz	

Çizelge 6.5'ten görüleceği üzere görünür sabitlik ve yatak katsayısı modeli yöntemi dışında, diğer yöntemlerden elde edilen sonuçlar birbirleriyle benzerlik göstermektedir. Analitik yöntem olarak ise, karma yöntem söz konusu bu değerlerle önerilen yapı (kombine hibrit sistem – KHS) için, üçlü kombine deniz üzeri uyum içerisindedir. Alkhoury ve diğ., (2020)'nin çalışmalarıyla, Ashes ortamındaki çözümlerin uyumlu sonuçlar verdiği görülmüştür. Özellikle zemin etkisinin dikkate alındığı bağlı yaylar yönteminde, bu çalışmayla birebir aynı değerler elde edilmiştir. Dolayısıyla bağlı yaylar yönteminin, Ashes ortamında modellenmesinin iyi sonuçlar verdiği söylenebilir. Ashes benzeşiminde, bağlı yaylar yönteminde doğal frekans değeri 0,183 Hz elde edilirken, karma yöntemde ise bu değer 0,179 Hz bulunmuştur ki aradaki bağıl fark % 2.23'tür. Bu sonuç da karma yöntemin bu tezde kullanılabileceğini göstermektedir. Benzer şekilde, Jiang ve diğ. (2023), Alkhoury ve diğ. (2020) tarafından yapılan çalışmadaki sistemi analiz etmişlerdir. Arany ve diğ., (2016) tarafından önerilen yöntemin tekil kazıklar içeren ve kesiti değişken kuleye sahip rüzgâr türbinleri için daha doğru sonuçlar vereceğini belirtmişlerdir. Çünkü Jiang ve diğ.

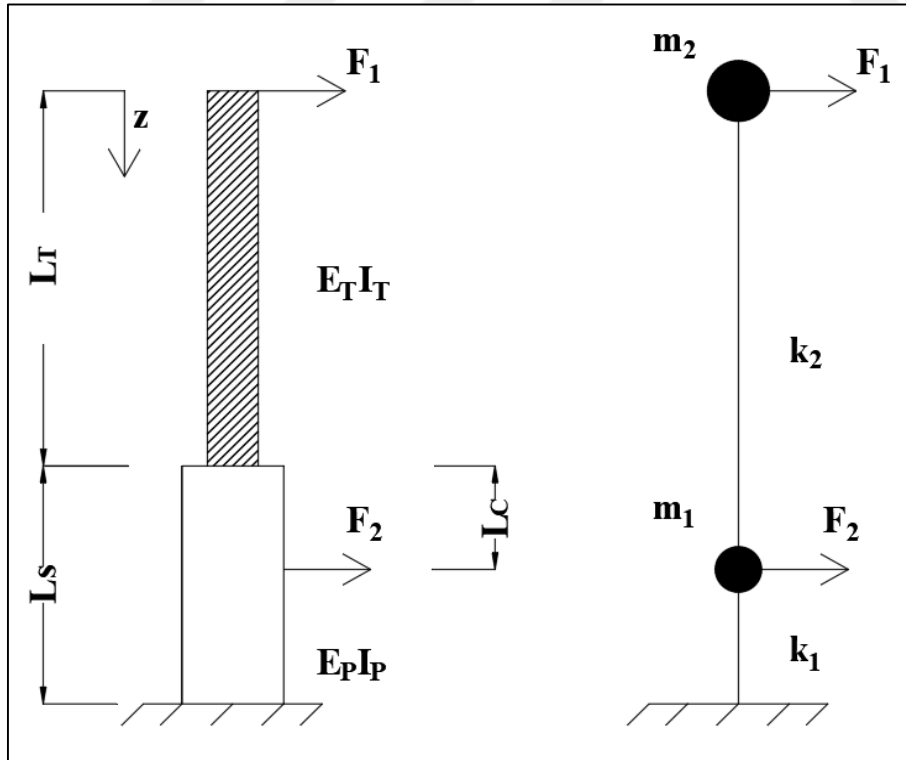
(2023) yapıyı üç farklı kısımda incelerken, her bir kısmın kesitinin sabit olduğunu varsaymakta, Arany ve diğ. (2016) yapıyı değişken kesitli olarak modellemektedir.

6.2. Kombine ADRES doğal frekans analizi

Daha önceki bölümlerde sadece rüzgâr türbininin doğal frekans analizi gerçekleştirilmiş ve çözümde tek derece serbestliğe sahip olarak ele alınmıştır. Kombine ADRES durumunda sistem ikinci dereceden serbestliğe sahip bir sistem olarak ele alınmıştır.

6.2.1. Zemin etkisinin dikkate alınmadığı durumda ADRES için doğal frekans hesaplaması

Bu kısımda daha önceki bölümde olduğu gibi yine karma yöntem kullanılacak ve sistemin ilk önce zemin etkisinin dikkate alınmadığı durum için doğal frekans analizi yapılacaktır. Bölüm boyunca türetilen tüm eşitlikler çalışma kapsamında türetilmiştir. Söz konusu yaklaşımla kullanılacak ikinci dereceden serbestliğe sahip sistem Şekil 6.26'da gösterilmiştir.



Şekil 6.26. İkinci dereceden serbestliğe sahip kombine ADRES ve serbest cisim diyagramı

Burada, F_1 ; rüzgâr türbini göbeğine gelen kuvvet, F_2 ; hidrokinetik türbinine gelen kuvvet, L_T ; rüzgâr türbini kulesinin uzunluğu, L_S ; tekil kazığın uzunluğu, L_C ; rüzgâr türbini kulesinin tabanı ile hidrokinetik türbinin göbeği arasındaki mesafe, E_{TI} ; rüzgâr türbini kulesinin eğilme rijitliği, E_{PI} ; tekil kazığın eğilme rijitliği, m_2 ; rüzgâr türbininin kütlesi, m_1 ; hidrokinetik türbininin kütlesi, k_1 ; serbest cisim diyagramında birinci bölümün rijitlik sabiti ve k_2 ; serbest cisim diyagramında ikinci bölümün rijitlik sabitidir.

Sistemin serbest harmonik hareket yapacağı göz önüne alınarak Eş. 6.112 ile Eş. 6.115 arasındaki eşitlikler yazılabilir.

$$m_1 \ddot{x}_1 = -k_1 x_1 - k_2 (x_1 - x_2) \quad (6.112)$$

$$m_1 \ddot{x}_1 + (k_1 + k_2)x_1 - k_2 x_2 = 0 \quad (6.113)$$

$$m_2 \ddot{x}_2 = k_2 (x_1 - x_2) \quad (6.114)$$

$$m_2 \ddot{x}_2 + k_2 x_2 - k_2 x_1 = 0 \quad (6.115)$$

Serbest titreşim hareketi için çözüm Eş. 6.116'daki gibi olur.

$$[M]\{\ddot{x}\} + [k]\{x\} = 0 \quad (6.116)$$

Harmonik hareket altında yer değiştirme Eş. 6.117'deki gibi yazılır.

$$\{x\} = \{X\}e^{i\omega t} \quad (6.117)$$

Eş. 6.117'e göre hız ve ivme, sırasıyla, Eş. 6.118 ve Eş. 6.119'daki gibi ifade edilir.

$$\{\dot{x}\} = i\omega\{X\}e^{i\omega t} \quad (6.118)$$

$$\{\ddot{x}\} = -\omega^2\{X\}e^{i\omega t} \quad (6.119)$$

Eş. 6.119'u genel hareket denkleminde yerine yazarsak Eş. 6.120 ve Eş. 6.121 elde edilir.

$$[M](-w^2\{X\}e^{iwt}) + [K]\{X\}e^{iwt} = 0 \quad (6.120)$$

$$([K] - w^2[M])\{X\} = 0 \quad (6.121)$$

Bu, bir özdeğer problemini ortaya çıkarır ve çözümünden doğal frekanslar elde edilir. Eş. 6.121'in determinantı alınır ve gerekli işlemler yapılırsa yapının doğal frekansı Eş. 6.129'daki gibi bulunur.

$$\det([K] - w^2[M]) = 0 \quad (6.122)$$

$$[K] = \begin{bmatrix} k_1 + k_2 & -k_2 \\ -k_2 & k_2 \end{bmatrix} \quad (6.123)$$

$$[M] = \begin{bmatrix} m_1 & 0 \\ 0 & m_2 \end{bmatrix} \quad (6.124)$$

$$[K] - w^2[M] = \begin{bmatrix} k_1 + k_2 - w^2m_1 & -k_2 \\ -k_2 & k_2 - w^2m_2 \end{bmatrix} \quad (6.125)$$

$$\det \begin{bmatrix} k_1 + k_2 - w^2m_1 & -k_2 \\ -k_2 & k_2 - w^2m_2 \end{bmatrix} = 0 \quad (6.126)$$

$$w^4m_1m_2 - w^2(k_1m_2 + k_2m_2 + k_2m_1) + k_1k_2 = 0 \quad (6.127)$$

$$w_{1,2}^2 = \frac{k_1m_2 + k_2m_2 + k_2m_1 \pm \sqrt{(k_1m_2 + k_2m_2 + k_2m_1)^2 - 4m_1m_2k_1k_2}}{2m_1m_2} \quad (6.128)$$

$$f_1 = \frac{w_1}{2\pi} \quad (6.129)$$

İkinci dereceden serbestliğe sahip yapı için Castigliano'nun ikinci teoremi Eş. 6.130 ve Eş. 6.131'deki gibi yazılabilir.

$$q_1 = \frac{\partial U}{\partial F_1} = w(0) \quad (6.130)$$

$$q_2 = \frac{\partial U}{\partial F_2} = w(L_T + L_C) \quad (6.131)$$

Burada, q ; yerel deformasyon ve U ; yer değıştirme enerjisidir. Söz konusu bu enerji Eş. 6.132 ile ifade edilir.

$$U = \int_0^{L_T+L_S} \frac{[M(z)]^2}{2EI(z)} dz \quad (6.132)$$

Şekil 6.26'daki moment dağılımı üç kısımda incelenebilir (Eş. 6.133 – Eş. 6.135).

$$M(z) = F_1 z \quad (0 \leq z \leq L_T) \quad \text{1. kısım} \quad (6.133)$$

$$M(z) = F_1 z \quad (L_T \leq z \leq L_T + L_C) \quad \text{2. kısım} \quad (6.134)$$

$$M(z) = F_1 z + F_2 [z - (L_T + L_C)] \quad (L_T + L_C \leq z \leq L_T + L_S) \quad \text{3. kısım} \quad (6.135)$$

Her bir bölüm için enerji tek tek yazılabilir (Eş. 6.136 – Eş. 6.139).

$$U_1 = \int_0^{L_T} \frac{(F_1 z)^2}{2E_T I_T} dz = \frac{F_1^2}{2E_T I_T} \left[\frac{z^3}{3} \right]_0^{L_T} = \frac{F_1^2 L_T^3}{6E_T I_T} \quad (6.136)$$

$$U_2 = \int_{L_T}^{L_T+L_C} \frac{(F_1 z)^2}{2E_P I_P} dz = \frac{F_1^2}{2E_P I_P} \left[\frac{z^3}{3} \right]_{L_T}^{L_T+L_C} = \frac{F_1^2}{2E_P I_P} \left[\frac{(L_T + L_C)^3}{3} - \frac{L_T^3}{3} \right] \quad (6.137)$$

$$U_3 = \int_{L_T+L_C}^{L_T+L_S} \frac{(F_1 z + F_2 [z - (L_T + L_C)])^2}{2E_P I_P} dz \quad (6.138)$$

$$U_3 = \frac{1}{2E_P I_P} \left\{ (F_1 + F_2)^2 \left[\frac{(L_T + L_S)^3}{3} - \frac{(L_T + L_C)^3}{3} \right] - 2(F_1 + F_2)F_2(L_T + L_C) \left[\frac{(L_T + L_S)^2}{2} - \frac{(L_T + L_C)^2}{2} \right] + F_2^2(L_T + L_C)^2[(L_T + L_S) - (L_T + L_C)] \right\} \quad (6.139)$$

Toplam enerji, Eş. 6.136, Eş. 6.138 ve Eş. 6.139'un toplanmasıyla elde edilir.

Tepe noktasındaki deplasmanı elde etmek için Eş. 6.140 kullanılır.

$$q_1 = w(0) = \frac{\partial U}{\partial F_1} = \frac{F_1 L_T^3}{3E_T I_T} + \frac{F_1}{E_P I_P} \left[\frac{(L_T + L_C)^3}{3} - \frac{L_T^3}{3} \right] +$$

$$\frac{1}{2E_P I_P} \left\{ 2(F_1 + F_2) \left[\frac{(L_T + L_S)^3}{3} - \frac{(L_T + L_C)^3}{3} \right] - \right.$$

$$\left. 2F_2(L_T + L_C) \left[\frac{(L_T + L_S)^2}{2} - \frac{(L_T + L_C)^2}{2} \right] \right\} \quad (6.140)$$

Hidrokinetik türbinin göbeğindeki deplasman değerini elde etmek için Eş. 6.141 yazılabilir.

$$q_1 = w(L_T + L_C) = \frac{\partial U}{\partial F_2} = \frac{1}{2E_P I_P} \left\{ 2(F_1 + F_2) \left[\frac{(L_T + L_S)^3}{3} - \frac{(L_T + L_C)^3}{3} \right] - \right.$$

$$2(F_1 + 2F_2)(L_T + L_C) \left[\frac{(L_T + L_S)^2}{2} - \frac{(L_T + L_C)^2}{2} \right] +$$

$$\left. 2F_2(L_T + L_C)^2 [(L_T + L_S) - (L_T + L_C)] \right\} \quad (6.141)$$

Daha önce elde edilen hareket denklemlerinden, sistemin denge durumunda olduğunu kabul edilip yay sabitleri çekilerek Eş. 6. 142 ile Eş. 6.143 elde edilir.

$$k_2 = \frac{F_2}{x_2 - x_1} \quad (6.142)$$

$$k_1 = \frac{F_1 + F_2}{x_1} \quad (6.143)$$

Castigliano'nun ikinci teoreminden elde edilen eşitlikler deplasman değerleri olarak Eş. 6.142 ve Eş. 6.143'te yerine yazılarak Eş. 6.144 ve Eş. 6.145 bulunur.

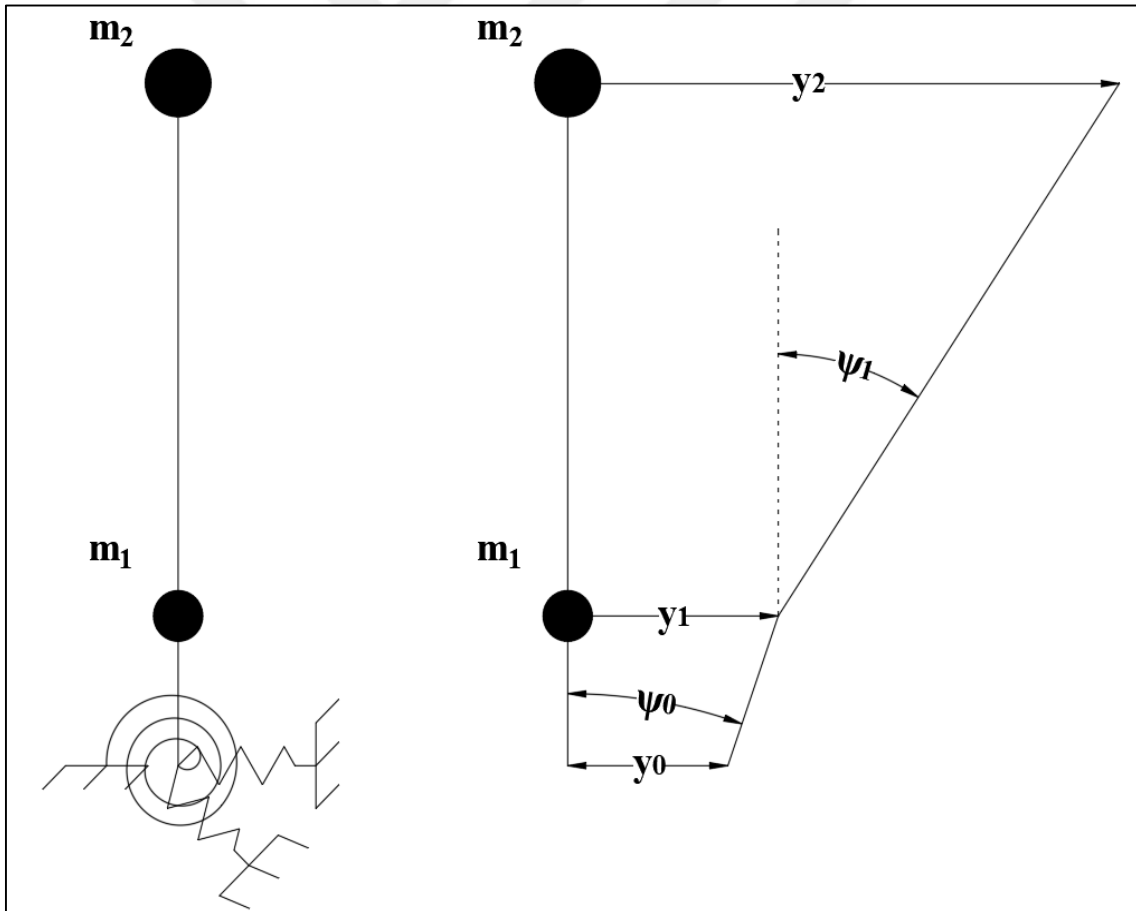
$$k_1 = \frac{F_1 + F_2}{\frac{\partial U}{\partial F_2}} \quad (6.144)$$

$$k_2 = \frac{F_2}{\frac{\partial U}{\partial F_1} - \frac{\partial U}{\partial F_2}} \quad (6.145)$$

Bu değerler kütle değerleri ile Eş. 6.129'da yerine konulursa kombine sistemin doğal frekansı elde edilmiş olur.

6.2.2. Zemin etkisinin dikkate alındığı durumda ADRES için doğal frekans hesaplaması

Zemin etkisinin dikkate alındığı durumda, daha önce karma yöntemde yapıldığı gibi Jiang ve diğ. (2023) tarafından önerilen geometrik şart dikkate alınarak hesaplamalar yapılacaktır. Kombine sistemin deformasyon biçimi Şekil 6.27'de verilmiştir.



Şekil 6.27. Kombine ADRES deformasyon biçimi

Burada, y_0 ; zemin kotundaki deplasman değeri, y_1 ; hidrokinetik türbin kotundaki deplasman değeri, y_2 , rüzgâr türbini göbek noktasındaki deplasman değeri, ψ_0 ; zemin kotundaki dönme ve ψ_1 ; hidrokinetik türbin noktasındaki dönme değeridir.

Geometrik şartlar göz önünde bulundurularak Eş. 6.146 ve Eş. 6.147 yazılabilir.

$$y_1 = y_0 + (L_S - L_C) \sin \psi_0 + \frac{\partial U}{\partial F_2} \quad (6.146)$$

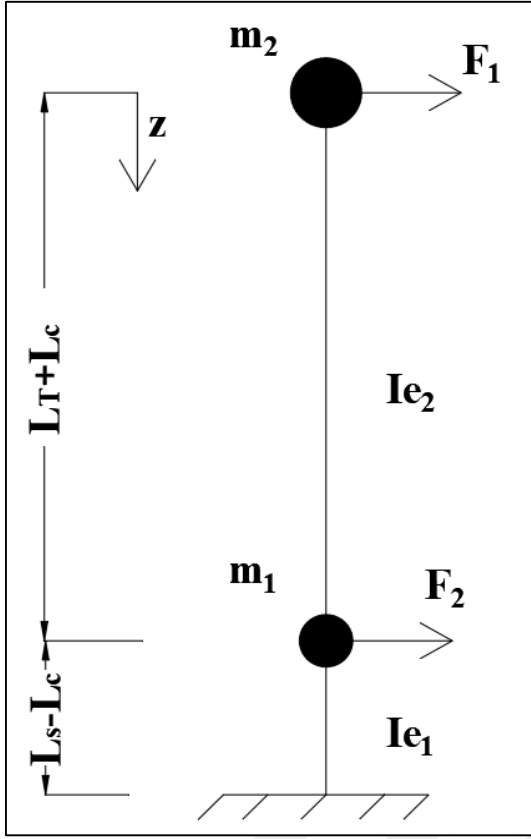
$$y_2 = y_1 + (L_T + L_C) \sin \psi_1 + \frac{\partial U}{\partial F_1} \quad (6.147)$$

Zemin kotundaki deplasmanlar daha önce belirtildiği gibi Eş. 6.148 ve Eş. 6.149'daki gibi ifade edilebilir.

$$y_0 = \delta_L F_0 + \delta_{LR} M_0 \quad (6.148)$$

$$\psi_0 = \delta_{LR} F_0 + \delta_R M_0 \quad (6.149)$$

Yukarıdaki eşitliklerde bilinmeyen sadece ψ_1 açısı bulunmaktadır. Bu açığı bulmak için sistem aynı deplasmanların elde edilebileceği eşdeğer bir sisteme dönüştürülmelidir. Bunun için k_1 yayını temsil eden kısmın atalet momenti değerine I_{e1} , k_2 yayını temsil eden kısmın atalet momenti değerine de I_{e2} diyebiliriz (Şekil 6.28).



Şekil 6.28. Eşdeğer kombine sistem

Aynı kuvvet altında eşdeğer kombine sistem ile normal kombine sistemin deformasyonları aynı olmalıdır. Bu işlemi yapmak için ilk başta eşdeğer sistemin genel deformasyonu hesaplanmalıdır. Sistem Eş. 6.150 ve Eş. 6.151'deki gibi iki kısımda incelenebilir.

$$M(z) = F_1 z \quad (0 \leq z \leq L_T) \quad \text{1. kısım} \quad (6.150)$$

$$M(z) = F_1 z + F_2 [z - (L_T + L_C)] \quad (L_T + L_C \leq z \leq L_T + L_S) \quad \text{2. kısım} \quad (6.151)$$

Her bir bölüm için genelleştirilmiş deformasyon enerjisi Eş. 6.152 ve Eş. 6.154'teki gibi yazılabilir.

$$V_1 = \int_0^{L_T+L_C} \frac{(F_1 z)^2}{2EI_{e2}} dz = \frac{F_1^2}{2EI_{e2}} \left[\frac{z^3}{3} \right]_0^{L_T+L_C} = \frac{F_1^2 (L_T + L_C)^3}{6EI_{e2}} \quad (6.152)$$

$$V_2 = \int_{L_T+L_C}^{L_T+L_S} \frac{(F_1 z + F_2 [z - (L_T + L_C)])^2}{2EI_{e1}} dz \quad (6.153)$$

$$V_2 = \frac{1}{2EI_{e1}} \left\{ (F_1 + F_2)^2 \left[\frac{(L_T + L_S)^3}{3} - \frac{(L_T + L_C)^3}{3} \right] - 2(F_1 + F_2)F_2(L_T + L_C) \right. \\ \left. \left[\frac{(L_T + L_S)^2}{2} - \frac{(L_T + L_C)^2}{2} \right] + F_2^2(L_T + L_C)^2[(L_T + L_S) - (L_T + L_C)] \right\} \quad (6.154)$$

Burada, V ; deformasyon enerjisidir. Toplam deformasyon enerjisi Eş. 6.152 ile Eş. 6.154'ün toplamından elde edilir.

Toplam deformasyon enerjisinin F_2 kuvvetine göre türevi alınırsa eşdeğer sistemin hidrokinetik türbin kısmındaki deformasyonu bulunur (Eş. 6.155).

$$q_1 = w(L_T + L_C) = \frac{\partial V}{\partial F_2} = \frac{1}{2EI_{e1}} \left\{ 2(F_1 + F_2) \left[\frac{(L_T + L_S)^3}{3} - \frac{(L_T + L_C)^3}{3} \right] - \right. \\ \left. 2(F_1 + 2F_2)(L_T + L_C) \left[\frac{(L_T + L_S)^2}{2} - \frac{(L_T + L_C)^2}{2} \right] + \right. \\ \left. 2F_2(L_T + L_C)^2[(L_T + L_S) - (L_T + L_C)] \right\} \quad (6.155)$$

Eş. 6.155, Eş. 6.145'e, y_1 , eşit olursa, eşdeğer kombine sistemin deplasman değeri ile normal kombine sistemin hidrokinetik türbin noktasındaki deplasman değeri eşit olur. Eş. 6.155 ve Eş. 6.146 eşitlenir ve gerekli sadeleştirmeler yapılırsa I_{e1} değeri Eş. 6.157'deki gibi elde edilir.

$$y_0 + (L_S - L_C) \sin \psi_0 + \frac{\partial U}{\partial F_2} = \frac{1}{2EI_{e1}} \left\{ 2(F_1 + F_2) \left[\frac{(L_T + L_S)^3}{3} - \frac{(L_T + L_C)^3}{3} \right] - \right. \\ \left. 2(F_1 + 2F_2)(L_T + L_C) \left[\frac{(L_T + L_S)^2}{2} - \frac{(L_T + L_C)^2}{2} \right] + \right. \\ \left. 2F_2(L_T + L_C)^2[(L_T + L_S) - (L_T + L_C)] \right\} \quad (6.156)$$

$$EI_{e1} = \frac{1}{2(y_0 + (L_S - L_C) \sin \psi_0 + \frac{\partial U}{\partial F_2})} \left\{ 2(F_1 + F_2) \left[\frac{(L_T + L_S)^3}{3} - \frac{(L_T + L_C)^3}{3} \right] \right. \\ \left. - 2(F_1 + 2F_2)(L_T + L_C) \left[\frac{(L_T + L_S)^2}{2} - \frac{(L_T + L_C)^2}{2} \right] + 2F_2(L_T + L_C)^2[(L_T + L_S) - (L_T + L_C)] \right\} \quad (6.157)$$

$$-2(F_1 + 2F_2)(L_T + L_C) \left[\frac{(L_T + L_S)^2}{2} - \frac{(L_T + L_C)^2}{2} \right] + \\ 2F_2(L_T + L_C)^2[(L_T + L_S) - (L_T + L_C)]\}$$

y_0 ve ψ_0 değerleri ise Eş. 6.158 ve Eş. 6.159'da olduğu şekilde yazılabilir.

$$y_0 = \delta_L(F_1 + F_2) + \delta_{LR}[F_1(L_T + L_S) + F_2(L_S - L_C)] \quad (6.158)$$

$$\psi_0 = \delta_{LR}(F_1 + F_2) + \delta_R[F_1(L_T + L_S) + F_2(L_S - L_C)] \quad (6.159)$$

Eş 6.157'den böylece birinci kısmın eğilme rijitliği elde edilebilir.

Eş. 6.147'deki ψ_1 değerini bulmak için birinci kısımdaki elastik deformasyon eğrisinin elde edilmesi gerekir. Moment – deplasman ilişkisi Eş. 6.160'taki gibi ifade edilir.

$$EI_{e1} \frac{d^2 w_1}{dz^2} = M \quad (6.160)$$

$$EI_{e1} \frac{d^2 w_1}{dz^2} = F_1 z + F_2 [z - (L_T + L_C)] \quad (6.161)$$

Burada, w_1 ; birinci bölgedeki deformasyon profilidir. Eş. 6.161'in integrali alınırsa dönme değeri Eş. 6.162'deki gibi bulunur.

$$\frac{dw_1}{dz} = \frac{1}{EI_{e1}} \left\{ F_1 \frac{z^2}{2} + F_2 \left[\frac{z^2}{2} - (L_T + L_C)z \right] \right\} + C_1 \quad (6.162)$$

Burada, C_1 ; integral sabitidir. Sınır şartı olarak zemin kotundaki deformasyon değeri bilindiğinden, ψ_0 , Eş. 6.159, Eş. 6.162'de yerine yazılırsa Eş. 6.165 elde edilir ve integral sabiti değeri elde edilir.

$$z = L_T + L_S ; \frac{dw_1}{dz} = -\psi_0 \quad (6.163)$$

$$-\psi_0 = \frac{1}{EI_{e1}} \left\{ F_1 \frac{(L_T + L_S)^2}{2} + F_2 \left[\frac{(L_T + L_S)^2}{2} - (L_T + L_C)(L_T + L_S) \right] \right\} + C_1 \quad (6.164)$$

$$C_1 = -\psi_0 - \frac{1}{EI_{e1}} \left\{ F_1 \frac{(L_T + L_S)^2}{2} + F_2 \left[\frac{(L_T + L_S)^2}{2} - (L_T + L_C)(L_T + L_S) \right] \right\} \quad (6.165)$$

Eş. 5.165, Eş. 5.162’de yerine yazılırsa genel dönme denklemi birinci bölge için Eş. 5.166’daki gibi ifade edilebilir.

$$\begin{aligned} \frac{dw_1}{dz} = \frac{1}{EI_{e1}} \left\{ F_1 \frac{z^2}{2} + F_2 \left[\frac{z^2}{2} - (L_T + L_C)z \right] \right\} - \psi_0 - \\ \frac{1}{EI_{e1}} \left\{ F_1 \frac{(L_T + L_S)^2}{2} + F_2 \left[\frac{(L_T + L_S)^2}{2} - (L_T + L_C)(L_T + L_S) \right] \right\} \end{aligned} \quad (6.166)$$

Hidrokinetik türbinin konumu, Eş. 5.166’da yerine yazılarak Eş. 5.167 elde edilir ki bu da hidrokinetik türbinin dönme, ψ_1 , değeridir.

$$\begin{aligned} \frac{dw_1}{dz} = \frac{1}{EI_{e1}} \left\{ F_1 \frac{(L_T + L_C)^2}{2} + F_2 \left[\frac{(L_T + L_C)^2}{2} - (L_T + L_C)(L_T + L_C) \right] \right\} - \psi_0 - \\ \frac{1}{EI_{e1}} \left\{ F_1 \frac{(L_T + L_S)^2}{2} + F_2 \left[\frac{(L_T + L_S)^2}{2} - (L_T + L_C)(L_T + L_S) \right] \right\} \end{aligned} \quad (6.167)$$

Eş. 6.167’nin geçerli olması fiziksel olarak, eşdeğer kombine sistem ile normal kombine sistemin deplasmanının eşit olması demektir. Dolayısıyla kombine sistemin doğal frekans değeri daha önce verildiği gibi Eş. 6.168 ve Eş. 6.169’daki gibi elde edilir.

$$w_{1,2}^2 = \frac{k_1 m_2 + k_2 m_2 + k_2 m_1 \pm \sqrt{(k_1 m_2 + k_2 m_2 + k_2 m_1)^2 - 4m_1 m_2 k_1 k_2}}{2m_1 m_2} \quad (6.168)$$

$$f_1 = \frac{w_1}{2\pi} \quad (6.169)$$

Eş. 6.168’teki k_1 ve k_2 değerleri Eş. 6.170 ve Eş. 6.171’de verilmiştir.

$$k_2 = \frac{F_2}{y_2 - y_1} \quad (6.170)$$

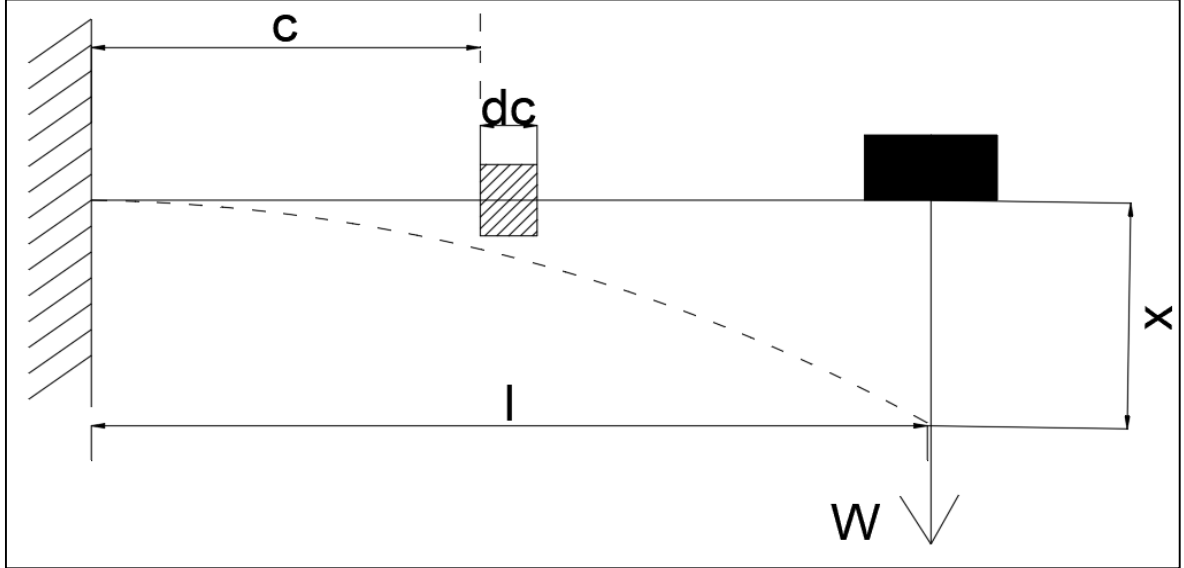
$$k_1 = \frac{F_1 + F_2}{y_1} \quad (6.171)$$

Buraya kadar yapılan işlemlerde bulunan birinci kısmın eğilme rijitliği, EI_{e1} , hem hidrokinetik türbin noktasındaki dönmeyi hem de deplasmanı garanti altına almaktadır.

Daha önce verilen çalışmalarda kütlenin hesaplamaya dahil edilmesine dair Eş. 6.172 verilmiştir.

$$m_2 = m_{RNA} + \frac{33}{140} m'_{kule} \quad (6.172)$$

Timoshenko (1937) uç noktasından bir kütle ile yüklü ankastre mesnetli kirişi Şekil 6.29'daki gibi görselleştirmiştir.



Şekil 6.29. Uç noktasında W kütlesine sahip ankastre mesnetli sistem (Timoshenko, 1937)

Burada, l ; kirişin uzunluğu, c ; diferansiyel elemanın ankastre mesnetten uzaklığı, dc ; diferansiyel elemanın uzunluğu, x ; düşey deplasman ve W ; kiriş serbest ucundaki ağırlıktır. Timoshenko (1937) ankastre mesnetten c kadar uzaklıkta diferansiyel dc uzunluğundan bir eleman ele almış ve deplasman değerini Eş. 6.173'teki gibi ifade etmiştir.

$$x(c) = \frac{1}{2l^3}(3lc^2 - c^3) \frac{Fl^3}{3EI} \quad (6.173)$$

Burada, $Fl^3/3EI$; kirişin serbest ucunun deplasman değeridir. Herhangi bir c noktasındaki diferansiyel uzunluğun hızı Eş. 6.174'teki gibidir.

$$v(c) = \frac{3lc^2 - c^3}{2l^3} v_{max} \quad (6.174)$$

Burada, v_{max} ; maksimum hızdır ve serbest uça gerçekleşmesinin beklenmesi doğaldır. Dolayısıyla diferansiyel elemanın kinetik enerjisi, dT , Eş. 6.175'teki gibi ifade edilebilir.

$$dT = \frac{1}{2} \rho A dc \left(\frac{3lc^2 - c^3}{2l^3} v_{max} \right)^2 dT \quad (6.175)$$

Burada, A ; kirişin kesit alanı ve ρ ; kiriş malzemesinin yoğunluğudur. Kirişin toplam kinetik enerjisi ise Eş. 6.176 ile elde edilir.

$$T = \frac{1}{2} \int_0^l \rho A \left(\frac{3lc^2 - c^3}{2l^3} v_{max} \right)^2 dc$$

$$\frac{\rho A v_{max}^2}{8l^6} \int_0^l (9l^2 c^4 - 6lc^5 + c^6) dc = \frac{\rho A v_{max}^2}{8l^6} \left[\frac{9l^2 c^5}{5} - \frac{6lc^6}{6} - \frac{c^7}{7} \right]_0^l \quad (6.176)$$

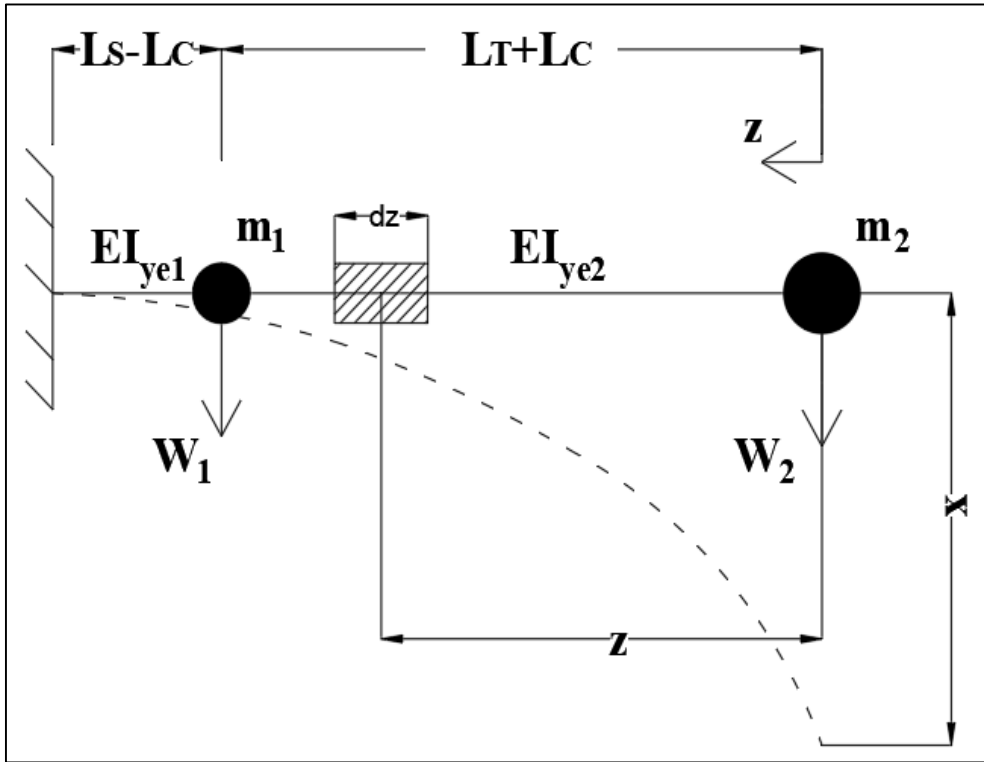
$$\frac{\rho A v_{max}^2}{8l^6} \left(\frac{33l^7}{35} \right) = \frac{1}{2} \left(\frac{33}{140} \rho A l \right) v_{max}^2$$

Eş. 6.169'da $\rho A l$; kirişin kütlesidir. Dolayısıyla toplam kinetik enerji Eş. 6.177'deki gibi yazılabilir.

$$T = \frac{1}{2} \left(\frac{33}{140} m_b \right) v_{max}^2 \quad (6.177)$$

Burada, m_b ; kirişin kütlesidir. Eş. 6.177'ye göre kirişin serbest ucuna kirişin kütlesinin $33/140$ 'ı eklenerek sistem birinci dereceden serbest hale gelir. Böylece m_2 için Eş. 6.172 ispatlanmış olur.

Benzer olarak kombine sistemde etkili kütleleri hesaplamak için, her iki bölgedeki deplasman eğrilerinin elde edilmesi gerekmektedir. Sistem Şekil 6.30'daki gibi modellenir.



Şekil 6.30. İkinci dereceden serbestliğe sahip ankastre mesnetli kombine sistem

Burada, EI_{ye1} ; birinci kısmın eğilme rijitliği, EI_{ye2} ikinci kısmın eğilme rijitliği, W_1 ; hidrokinetik türbinin ağırlığı ve W_2 ; rüzgâr türbininin ağırlığıdır. Şekil 6.30'da üç kısımdaki deplasmanlar bilinmektedir. Dolayısıyla I_{ye1} ve I_{ye2} eğer bilirse her iki bölgedeki elastik eğriler elde edilebilir. Moment ve dönme arasındaki ilişki birinci bölge için Eş. 6.178'deki gibi yazılabilir.

$$EI_{ye1} \frac{d^2 w_1}{dz^2} = M \quad (6.178)$$

$$EI_{ye1} \frac{d^2 w_1}{dz^2} = F_1 z + F_2 [z - (L_T + L_C)]$$

Burada, w_1 ; birinci bölgedeki deformasyon profilidir. Eş. 6.178'in integrali alınırsa dönme değeri Eş. 6.179'daki gibi bulunur.

$$\frac{dw_1}{dz} = \frac{1}{EI_{ye1}} \left\{ F_1 \frac{z^2}{2} + F_2 \left[\frac{z^2}{2} - (L_T + L_C)z \right] \right\} + C_2 \quad (6.179)$$

Burada, C_2 ; integral sabitidir. Sınır şartı olarak zemin kotundaki dönme değeri bilindiğinden Eş. 6.180, Eş. 6.179'da yerine yazılırsa Eş. 6.182 ve integral sabiti değeri elde edilir.

$$z = L_T + L_S; \frac{dw_1}{dz} = 0 \quad (6.180)$$

$$0 = \frac{1}{EI_{ye1}} \left\{ F_1 \frac{(L_T + L_S)^2}{2} + F_2 \left[\frac{(L_T + L_S)^2}{2} - (L_T + L_C)(L_T + L_S) \right] \right\} + C_2 \quad (6.181)$$

$$C_2 = -\frac{1}{EI_{ye1}} \left\{ F_1 \frac{(L_T + L_S)^2}{2} + F_2 \left[\frac{(L_T + L_S)^2}{2} - (L_T + L_C)(L_T + L_S) \right] \right\} \quad (6.182)$$

Eş. 6.182, Eş. 6.179'da yerine yazılırsa genel dönme denklemi birinci bölge için Eş. 6.183'teki gibi ifade edilebilir.

$$\begin{aligned} \frac{dw_1}{dz} = & \frac{1}{EI_{ye1}} \left\{ F_1 \frac{z^2}{2} + F_2 \left[\frac{z^2}{2} - (L_T + L_C)z \right] \right\} - \\ & \frac{1}{EI_{ye1}} \left\{ F_1 \frac{(L_T + L_S)^2}{2} + F_2 \left[\frac{(L_T + L_S)^2}{2} - (L_T + L_C)(L_T + L_S) \right] \right\} \end{aligned} \quad (6.183)$$

Eş. 6.183'ün bir mertebe daha integrali alınırsa deformasyon denklemi birinci bölge için Eş. 6.184'teki gibi ifade edilir.

$$w_1 = \frac{1}{EI_{ye1}} \left\{ F_1 \frac{z^3}{6} + F_2 \left[\frac{z^3}{6} - (L_T + L_C) \frac{z^2}{2} \right] \right\} -$$

$$\frac{1}{EI_{ye1}} \left\{ F_1 \frac{(L_T + L_S)^2}{2} + F_2 \left[\frac{(L_T + L_S)^2}{2} - (L_T + L_C)(L_T + L_S) \right] \right\} z + C_3 \quad (6.184)$$

Burada, C_3 ; integral sabitidir. Sınır şartı olarak zemin kotunun deplasmanı bilindiğinden sınır şartı olarak Eş. 6.185 yazılabilir.

$$z = L_T + L_S ; w_1 = 0$$

$$0 = \frac{1}{EI_{ye1}} \left\{ F_1 \frac{(L_T + L_S)^3}{6} + F_2 \left[\frac{(L_T + L_S)^3}{6} - (L_T + L_C) \frac{(L_T + L_S)^2}{2} \right] \right\} - \frac{1}{EI_{e1}} \left\{ F_1 \frac{(L_T + L_S)^2}{2} + F_2 \left[\frac{(L_T + L_S)^2}{2} - (L_T + L_C)(L_T + L_S) \right] \right\} (L_T + L_S) + C_3 \quad (6.185)$$

$$C_3 = -\frac{1}{EI_{ye1}} \left\{ F_1 \frac{(L_T + L_S)^3}{6} + F_2 \left[\frac{(L_T + L_S)^3}{6} - (L_T + L_C) \frac{(L_T + L_S)^2}{2} \right] \right\} + \frac{1}{EI_{ye1}} \left\{ F_1 \frac{(L_T + L_S)^2}{2} + F_2 \left[\frac{(L_T + L_S)^2}{2} - (L_T + L_C)(L_T + L_S) \right] \right\} (L_T + L_S)$$

Dolayısıyla birinci kısımdaki deformasyon Eş. 6.186'daki gibi olur.

$$w_1 = \frac{1}{EI_{ye1}} \left\{ F_1 \frac{z^3}{6} + F_2 \left[\frac{z^3}{6} - (L_T + L_C) \frac{z^2}{2} \right] \right\} - \frac{1}{EI_{ye1}} \left\{ F_1 \frac{(L_T + L_S)^2}{2} + F_2 \left[\frac{(L_T + L_S)^2}{2} - (L_T + L_C)(L_T + L_S) \right] \right\} z - \frac{1}{EI_{ye1}} \left\{ F_1 \frac{(L_T + L_S)^3}{6} + F_2 \left[\frac{(L_T + L_S)^3}{6} - (L_T + L_C) \frac{(L_T + L_S)^2}{2} \right] \right\} + \frac{1}{EI_{ye1}} \left\{ F_1 \frac{(L_T + L_S)^2}{2} + F_2 \left[\frac{(L_T + L_S)^2}{2} - (L_T + L_C)(L_T + L_S) \right] \right\} (L_T + L_S) \quad (6.186)$$

Birinci bölgedeki eğilme rijitliği, EI_{ye1} , değerini elde etmek için hidrokinetik türbin kısmındaki bilinen deplasman değeri kullanılır (Eş. 6.187).

$$z = L_T + L_C ; w_1 = y_1$$

$$\begin{aligned}
 y_1 = & \frac{1}{EI_{ye1}} \left\{ F_1 \frac{(L_T + L_C)^3}{6} + F_2 \left[\frac{(L_T + L_C)^3}{6} - (L_T + L_C) \frac{(L_T + L_C)^2}{2} \right] \right\} - \\
 & \frac{1}{EI_{ye1}} \left\{ F_1 \frac{(L_T + L_S)^2}{2} + F_2 \left[\frac{(L_T + L_S)^2}{2} - (L_T + L_C)(L_T + L_S) \right] \right\} (L_T + L_C) \quad (6.187) \\
 & - \frac{1}{EI_{ye1}} \left\{ F_1 \frac{(L_T + L_S)^3}{6} + F_2 \left[\frac{(L_T + L_S)^3}{6} - (L_T + L_C) \frac{(L_T + L_S)^2}{2} \right] \right\} + \\
 & \frac{1}{EI_{ye1}} \left\{ F_1 \frac{(L_T + L_S)^2}{2} + F_2 \left[\frac{(L_T + L_S)^2}{2} - (L_T + L_C)(L_T + L_S) \right] \right\} (L_T + L_S)
 \end{aligned}$$

Dolayısıyla y_1 değeri Eş. 6.188 ile elde edilir.

$$z = L_T + L_C ; w_1 = y_1$$

$$\begin{aligned}
 EI_{ye1} = & \frac{1}{y_1} \left\{ F_1 \frac{(L_T + L_C)^3}{6} + F_2 \left[\frac{(L_T + L_C)^3}{6} - (L_T + L_C) \frac{(L_T + L_C)^2}{2} \right] \right\} - \\
 & \frac{1}{y_1} \left\{ F_1 \frac{(L_T + L_S)^2}{2} + F_2 \left[\frac{(L_T + L_S)^2}{2} - (L_T + L_C)(L_T + L_S) \right] \right\} (L_T + L_C) \quad (6.188) \\
 & - \frac{1}{y_1} \left\{ F_1 \frac{(L_T + L_S)^3}{6} + F_2 \left[\frac{(L_T + L_S)^3}{6} - (L_T + L_C) \frac{(L_T + L_S)^2}{2} \right] \right\} + \\
 & \frac{1}{y_1} \left\{ F_1 \frac{(L_T + L_S)^2}{2} + F_2 \left[\frac{(L_T + L_S)^2}{2} - (L_T + L_C)(L_T + L_S) \right] \right\} (L_T + L_S)
 \end{aligned}$$

Birinci bölgede maksimum hız kuvvetin olduğu noktada oluşur. Kuvvetin olduğu noktadaki deplasman Eş. 6.189'daki gibi yazılabilir.

$$w_{1m} = y_1 \quad (6.189)$$

Dolayısıyla hız profili Eş. 6.190'daki gibi yazılabilir.

$$v = \frac{w_1}{w_{1m}} v_{max} \quad (6.190)$$

Buna paralel olarak diferansiyel elemanın kinetik enerjisi, dT , Eş. 6.191'deki gibi ifade edilebilir.

$$dT = \frac{1}{2} \rho A dz \left(\frac{w_1}{w_{1m}} v_{max} \right)^2 \quad (6.191)$$

Birinci kısmın toplam kinetik enerjisi ise Eş. 6.192 ile bulunur.

$$T_1 = \frac{1}{2} \int_{L_T+L_C}^{L_T+L_S} \rho A \left(\frac{w_1}{w_{1m}} v_{max} \right)^2 dz \quad (6.192)$$

Eş. 6.192'de kesit alanı, malzeme yoğunluğu, maksimum deformasyon ve maksimum hız sabittir. Dolayısıyla kinetik enerji eşitliği Eş. 6.193 gibi yazılabilir.

$$T_1 = \frac{1}{2} \rho A v_{max}^2 \frac{1}{w_{1m}^2} \int_{L_T+L_C}^{L_T+L_S} (w_1)^2 dz \quad (6.193)$$

Pay ve paydayı integral alt ve üst sınırı arasındaki farka bölersek Eş. 6.193, Eş. 6.194'e dönüşür.

$$T_1 = \frac{1}{2} \rho A [(L_T + L_S) - (L_T + L_C)] \frac{v_{max}^2}{[(L_T + L_S) - (L_T + L_C)]} \frac{1}{w_{1m}^2} \int_{L_T+L_C}^{L_T+L_S} (w_1)^2 dz \quad (6.194)$$

Burada; kirişin kütlesi Eş. 6.195'teki gibi verilebilir.

$$m_{k1} = \frac{1}{2} \rho A [(L_T + L_S) - (L_T + L_C)] \quad (6.195)$$

Burada, m_{k1} ; birinci kirişin kütlesidir. Dolayısıyla toplam kinetik enerji Eş. 6.196'daki gibi ifade edilebilir.

$$T_1 = \frac{1}{2} m_{k1} \frac{v_{max}^2}{[(L_T + L_S) - (L_T + L_C)]} \frac{1}{w_{1m}^2} \int_{L_T+L_C}^{L_T+L_S} (w_1)^2 dz \quad (6.196)$$

Dolayısıyla etkili kütle için katsayı Eş. 6.197'deki gibi olur.

$$T_1 = \frac{1}{2} m_{k1} v_{max}^2 \left[\frac{1}{[(L_T + L_S) - (L_T + L_C)]} \frac{1}{y_1} \int_{L_T+L_C}^{L_T+L_S} (w_1)^2 dz \right] \quad (6.197)$$

Benzer şekilde ikinci kısım için de aynı işlemler yapılarak EI_{ye2} değeri ve elastik eğri denklemi elde edilir. Moment ve dönme arasındaki ilişki ikinci bölge için Eş. 6.198'deki gibi yazılabilir.

$$EI_{ye2} \frac{d^2 w_2}{dz^2} = M \quad (6.198)$$

$$EI_{ye2} \frac{d^2 w_2}{dz^2} = F_1 z \quad (6.199)$$

Burada, w_2 ; ikinci bölgedeki deformasyon profilidir. Eş. 6.199'un integrali alınırsa dönme değeri Eş. 6.200'deki gibi bulunur.

$$\frac{dw_2}{dz} = \frac{1}{EI_{ye2}} \left\{ F_1 \frac{z^2}{2} \right\} + C_4 \quad (6.200)$$

Burada, C_4 ; integral sabitidir. Sınır şartı olarak hidrokinetik türbinin dönme değeri bilindiğinden Eş. 6.201, Eş. 6.202'de yerine yazılırsa Eş. 6.203 elde edilir.

$$z = L_T + L_C ; \frac{dw_2}{dz} = \psi_0 - \psi_1 \quad (6.201)$$

$$\psi_0 - \psi_1 = \frac{1}{EI_{ye2}} \left\{ F_1 \frac{(L_T + L_C)^2}{2} \right\} + C_4 \quad (6.202)$$

$$C_4 = \psi_0 - \psi_1 - \frac{1}{EI_{ye2}} \left\{ F_1 \frac{(L_T + L_C)^2}{2} \right\} \quad (6.203)$$

Eş. 6.203, Eş. 6.200'de yerine yazılırsa genel dönme denklemi ikinci bölge için Eş. 6.204'teki gibi ifade edilebilir.

$$\frac{dw_2}{dz} = \frac{1}{EI_{ye2}} \left\{ F_1 \frac{z^2}{2} \right\} + \psi_0 - \psi_1 - \frac{1}{EI_{ye2}} \left\{ F_1 \frac{(L_T + L_c)^2}{2} \right\} \quad (6.204)$$

Eş. 6.204'ün birمرتbe daha integrali alınır, deformasyon denklemi ikinci bölge için Eş. 6.205'teki gibi ifade edilir.

$$w_2 = \frac{1}{EI_{ye2}} \left\{ F_1 \frac{z^3}{6} \right\} + (\psi_0 - \psi_1)z - \frac{1}{EI_{ye2}} \left\{ F_1 \frac{(L_T + L_c)^2}{2} \right\} z + C_5 \quad (6.205)$$

Burada, C_5 ; integral sabitidir. Sınır şartı olarak hidrokinetik türbin kotundaki deplasman değeri bilindiğinden sınır şartı olarak Eş. 6. 206 yazılabilir.

$$z = L_T + L_c ; w_2 = y_1$$

$$y_1 = \frac{1}{EI_{ye2}} \left\{ F_1 \frac{(L_T + L_c)^3}{6} \right\} + (\psi_0 - \psi_1)(L_T + L_c) - \frac{1}{EI_{ye2}} \left\{ F_1 \frac{(L_T + L_c)^2}{2} \right\} (L_T + L_c) + C_5 \quad (6.206)$$

$$C_5 = y_1 - \frac{1}{EI_{ye2}} \left\{ F_1 \frac{(L_T + L_c)^3}{6} \right\} - (\psi_0 - \psi_1)(L_T + L_c) + \frac{1}{EI_{ye2}} \left\{ F_1 \frac{(L_T + L_c)^2}{2} \right\} (L_T + L_c)$$

Dolayısıyla ikinci kısımdaki deformasyon Eş. 6.207'deki gibi olur.

$$w_2 = \frac{1}{EI_{ye2}} \left\{ F_1 \frac{z^3}{6} \right\} + (\psi_0 - \psi_1)z - \frac{1}{EI_{ye2}} \left\{ F_1 \frac{(L_T + L_c)^2}{2} \right\} z + y_1 - \frac{1}{EI_{ye2}} \left\{ F_1 \frac{(L_T + L_c)^3}{6} \right\} - (\psi_0 - \psi_1)(L_T + L_c) + \frac{1}{EI_{ye2}} \left\{ F_1 \frac{(L_T + L_c)^2}{2} \right\} (L_T + L_c) \quad (6.207)$$

İkinci bölgedeki eğilme rijitliği, EI_{ye2} , değerini elde etmek için rüzgâr türbini kısmındaki bilinen deplasman değeri kullanılır (Eş. 6.208).

$$z = 0 ; w_2 = y_2$$

$$y_2 = y_1 - \frac{1}{EI_{ye2}} \left\{ F_1 \frac{(L_T + L_c)^3}{6} \right\} - (\psi_0 - \psi_1)(L_T + L_c) + \frac{1}{EI_{ye2}} \left\{ F_1 \frac{(L_T + L_c)^2}{2} \right\} (L_T + L_c) \quad (6.208)$$

Dolayısıyla EI_{ye1} değeri Eş. 6.209 ile elde edilir.

$$z = L_T + L_c ; w_2 = y_2$$

$$EI_{ye2} = - \frac{1}{y_2 - y_1 + (\psi_0 - \psi_1)(L_T + L_c)} \left\{ F_1 \frac{(L_T + L_c)^3}{6} \right\} + \frac{1}{y_2 - y_1 + (\psi_0 - \psi_1)(L_T + L_c)} \left\{ F_1 \frac{(L_T + L_c)^2}{2} \right\} (L_T + L_c) \quad (6.209)$$

Birinci bölgede maksimum hız kuvvetin olduğu noktada oluşur. Kuvvetin olduğu noktadaki deplasman Eş. 6.210'daki gibi yazılabilir.

$$w_{2m} = y_2 \quad (6.210)$$

Dolayısıyla hız profili Eş. 6.211'deki gibi yazılabilir.

$$v = \frac{w_2}{w_{2m}} v_{max} \quad (6.211)$$

Buna paralel olarak diferansiyel elemanın kinetik enerjisi, dT , Eş. 6.212'deki gibi ifade edilebilir.

$$dT = \frac{1}{2} \rho A dz \left(\frac{w_2}{w_{2m}} v_{max} \right)^2 \quad (6.212)$$

Birinci kısmın toplam kinetik enerjisi ise Eş. 6.213 ile bulunur.

$$T_2 = \frac{1}{2} \int_0^{L_T+L_C} \rho A \left(\frac{w_2}{w_{2m}} v_{max} \right)^2 dz \quad (6.213)$$

Eş. 6.213'te kesit alanı, malzeme yoğunluğu, maksimum deformasyon ve maksimum hız sabittir. Dolayısıyla kinetik enerji eşitliği Eş. 6.214 gibi yazılabilir.

$$T_2 = \frac{1}{2} \rho A v_{max}^2 \frac{1}{w_{2m}^2} \int_0^{L_T+L_C} (w_2)^2 dz \quad (6.214)$$

Pay ve paydayı integral alt ve üst sınırı arasındaki farka bölersek Eş. 6.214, Eş. 6.215'e dönüşür.

$$T_2 = \frac{1}{2} \rho A (L_T + L_C) \frac{v_{max}^2}{(L_T + L_C)} \frac{1}{w_{2m}^2} \int_0^{L_T+L_C} (w_2)^2 dz \quad (6.215)$$

Burada; kirişin kütlesi Eş. 6.216'daki gibi verilebilir.

$$m_{k2} = \frac{1}{2} \rho A (L_T + L_C) \quad (6.216)$$

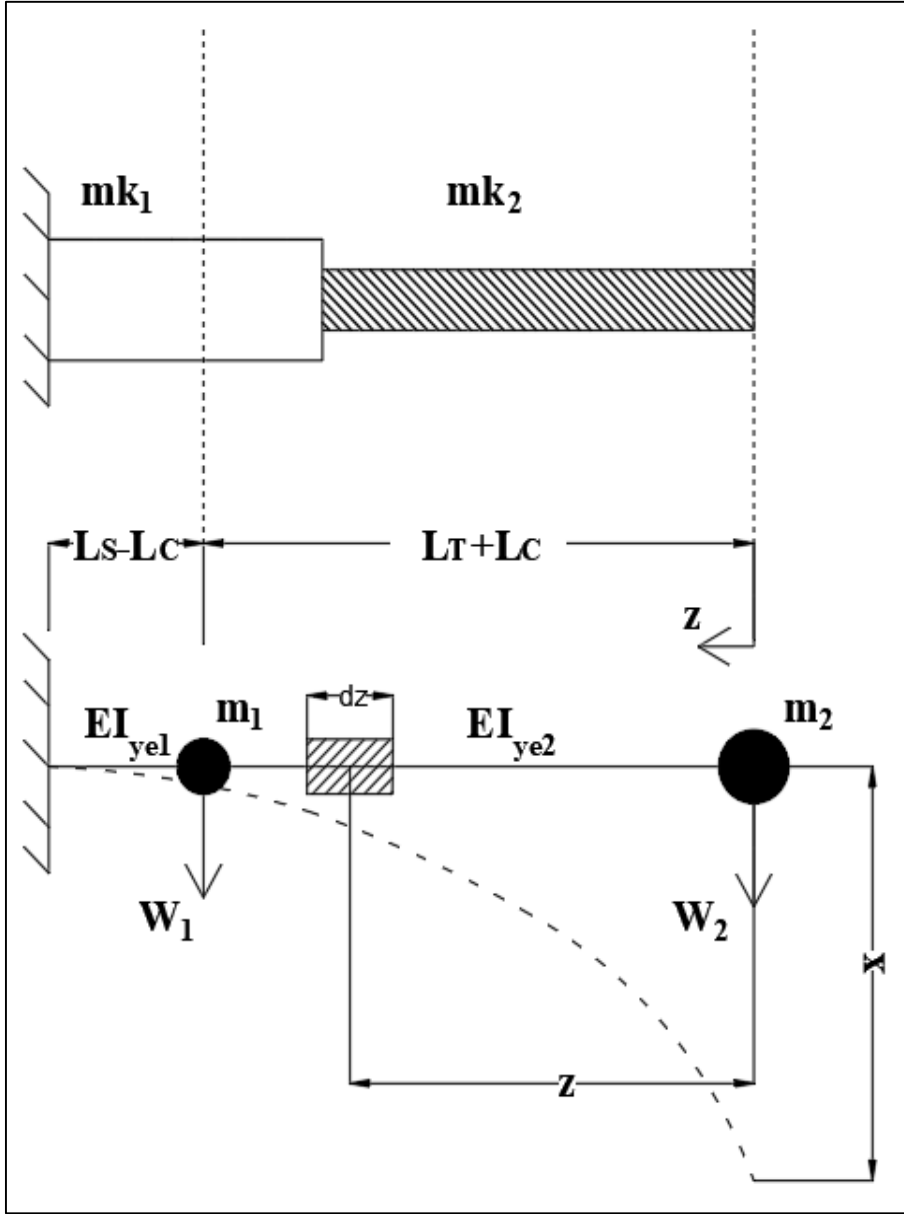
Burada, m_{k2} ; ikinci kirişin kütlesidir. Dolayısıyla toplam kinetik enerji Eş. 6.217'deki gibi ifade edilebilir.

$$T_2 = \frac{1}{2} m_{k2} \frac{v_{max}^2}{(L_T + L_C)} \frac{1}{y_2^2} \int_0^{L_T+L_C} (w_2)^2 dz \quad (6.217)$$

Dolayısıyla etkili kütle için katsayı Eş. 6.218'deki gibi olur.

$$T_2 = \frac{1}{2} m_{k2} v_{max}^2 \left[\frac{1}{L_T + L_C} \frac{1}{(y_2^2)} \int_0^{L_T+L_C} (w_2)^2 dz \right] \quad (6.218)$$

Birinci kiriş ve ikinci kirişi temsil eden kütleler Şekil 6.31'de verilmiştir.



Şekil 6.31. Kirişlerin kütlelerini temsil eden aralıkların gösterimi

Bu çalışmadaki yöntemi doğrulayabilmek için kullanılabilecek kombine deniz üzeri rüzgâr türbinleri için literatürde sınırlı sayıda çalışma vardır. Nasab ve diğ. (2022) kombine deniz üzeri rüzgâr türbinini ele almışlar, fakat tekil rüzgâr türbini gibi yapının doğal frekans çözümünü kullanmışlardır. Lande – Sudall ve diğ. (2019) tarafından yapılan çalışmada kombine deniz rüzgâr türbini ile elde edilebilecek enerji miktarı incelenmiş, fakat herhangi bir şekilde yapının doğal frekans değeri üzerine durulmamıştır. 2017 yılında Strathclyde Üniversitesindeki bir grup araştırmacı tarafından yapılan çalışmada ise 5 MW bir rüzgar türbiniyle 2 MW bir akıntı türbininin bir arada olduğu sistem analiz edilmiştir (URL – 24).

Söz konusu bu çalışmada kullanılan tüm bilgiler en detaylı şekilde verildiğinden bu çalışmada elde edilen yöntemin doğrulanması için uygun bir analiz olarak kabul edilmiştir.

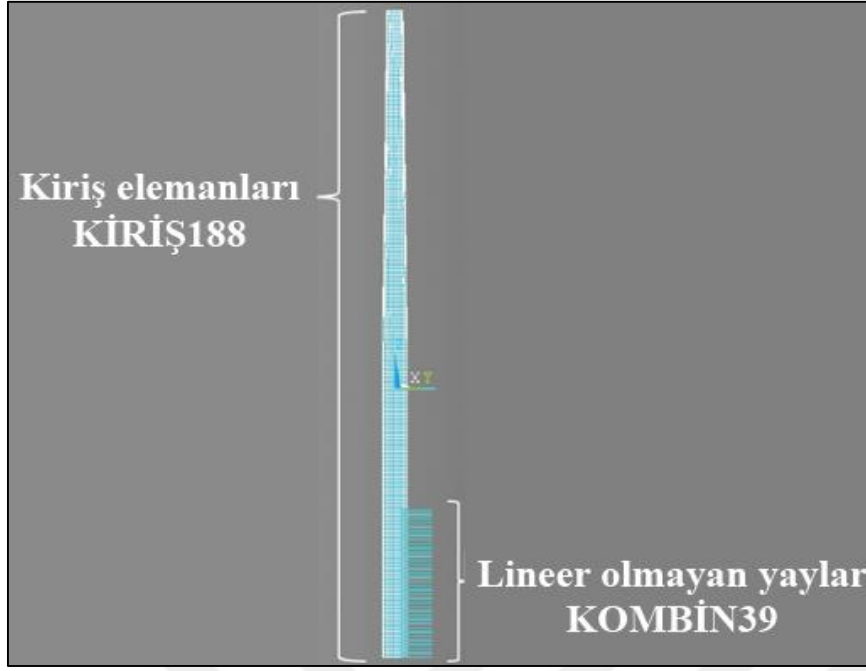
6.2.3. Kombine sistem için tezde önerilen yöntemin doğrulanması

Doğrulama için Strathclyde Üniversitesinde bir grup araştırmacı tarafından yapılan çalışmada, NREL (National Renewable Energy Laboratory – Ulusal Yenilenebilir Enerji Laboratuvarı) tarafından geliştirilen 5 MW kurulu gücündeki açık deniz rüzgâr türbini kullanılmıştır. Rüzgâr türbini, kule ve tekil kazığın boyutları ve özellikleri OC 3 (Offshore Code Comparison Collaboration – Açık Deniz Kod Karşılaştırma Birliği) 2. Faza göre seçilmiştir (Jonkman ve diğ., 2009; Jonkman ve diğ., 2010). Akıntı türbini olarak MCT (Marine Current Turbines – Deniz Akıntı Türbinleri) tarafından geliştirilen 2 MW kurulu gücündeki SeaGen S 2MW tercih edilmiştir. Tekil kazık modellenmesi için sabit kazık dış çapı 6 m ve duvar kalınlığı 70 mm olarak kullanılmıştır. Geçiş parçası sadece kütle olarak hesaba katılmıştır. Dolayısıyla tekil kazık, zemin kotundan kule temel seviyesine kadar devam etmektedir. Rüzgâr türbini kulesi OC 3, 2. Faz ile aynıdır. Kule tabanı ve tepesi, sırasıyla ortalama deniz seviyesinin 10 m ve 90 m yukarısında yer almaktadır. Kule kalınlığı ve çapı, geleneksel olarak, tabandan tepeye doğru doğrusal olarak inceltilmiştir. Kule temeli ve tepedeki dış çap ve duvar kalınlığı, sırasıyla 6 m ile 27 mm ve 3,87 m ile 19 mm olarak modellenmiştir. Akıntı türbininin ek destek yapısı modellenmemiştir. Akıntı türbinlerinin eşzamanlı çalışacağı varsayıldığından herhangi bir burulma yükü beklenmemiş ve bu yüzden dikkate alınmamıştır. Akıntı türbininden kaynaklanan yükler doğrudan tekil kazığa uygulanmıştır. Bununla birlikte, destek yapısının ağırlığını ve yapı üzerindeki akım sürüklenmesini belirlemek için basitleştirilmiş bir destek yapısı kullanılmıştır. Kombine yapı Şekil 6.32’de verilmiştir (URL – 24).



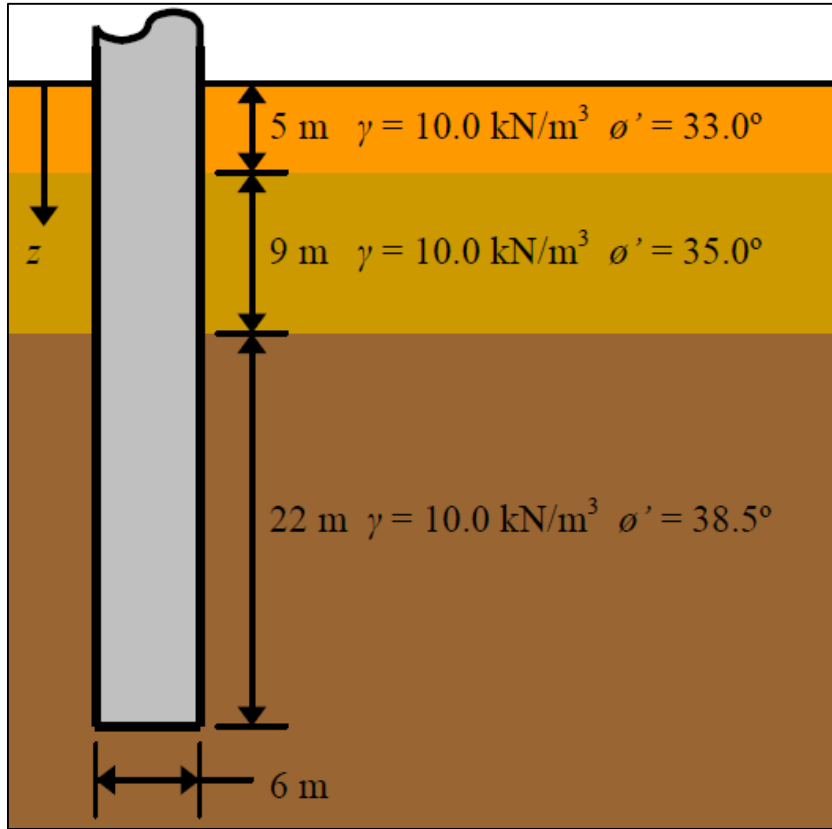
Şekil 6.32. Strathclyde üniversitesindeki araştırmacılar tarafından önerilen kombine sistemin görseli (URL – 24)

Araştırmacılar bu sisteme gelen kuvvetleri, türbinlerin çalışması durumu için itki eğrilerinden elde ettikten sonra ANSYS (Swanson Analysis System – Swanson Analiz Sistemi) ortamında modelleme yaparak doğal frekans değerlerini hesaplamışlardır. ANSYS ortamındaki model Şekil 6.33’teki gibidir.



Şekil 6.33. Strathclyde üniversitesindeki araştırmacılar tarafından önerilen kombine sistemin ANSYS ortamında modellenmesi (URL – 24)

Tekil kazık zemin kotunun altından başlayıp kule tabanına kadar uzanan bir yapı halindedir. Zemin katmanlarının yoğunluğu orta sıkıdan sıkıya doğru değişmekte ve katmanların rijitliği derinlikle artmaktadır. Derin katmanların rijitliğinin artmasıyla bu tür tabakalı zeminlerde, zemin ile yapı arasındaki etkileşim modelinin dinamik tepkiye katılımı, büyük ölçüde üst katman tarafından sağlanırken, alt katmanlar genel temel rijitliğinin uygun şekilde sağlanmasını garantiler (Passon, 2006). Benzer çıkarım Arany ve diğ. (2016) tarafından da yapılmış ve zemine yakın tabakaların deplasman ve rijitlik hesaplarında daha baskın olduğu belirtilmiştir. OC 3, 2. Faz için zemin profili ise Şekil 6.34'teki gibidir.



Şekil 6.34. OC 3, 2. Faz için zemin profili (URL – 24)

OC 3, 2. Faz için sistemde akıntı türbininin olmadığı, yani sadece rüzgâr türbininin bulunduğu durumda, yapının doğal frekans değeri Passon (2006) tarafından hesaplanmıştır. Bu çalışmada bahsi geçen karma yöntemle de bu değer bulunmuştur. Ayrıca yine Strathclyde üniversitesindeki araştırmacıların yaptığı çalışmadan elde edilen kombine sistemin doğal frekans değeri ile bu çalışma kapsamında önerilen yöntemden elde edilen sonuçlar da kıyaslamalarıyla birlikte Çizelge 6.6’da verilmiştir.

Çizelge 6.6. OC 3, 2. Faz için doğal frekans değerleri

Yapı	Araştırmacı	Zemin etkisi dikkate alınarak hesaplanan doğal frekans değeri		
		Önerilen yöntem	Araştırma	Mutlak yüzde bağlı Fark (%)
Sadece rüzgâr türbini	Passon (2006)	0,238 Hz	0,246 Hz	3,25
Kombine sistem	Strathclyde Üniversitesi (2017)	0,214 Hz	0,218 Hz	1,84

Çizelge 6.6'dan da görüleceği üzere yapıda rüzgâr türbininin yanında akıntı türbininin de olması yapının doğal frekansını azaltmaktadır. Önerilen yöntemle yapılan hesaplamalarda sisteme akıntı türbini eklendiğinde, yapının doğal frekans değeri %11,34 azalmıştır. Literatürde verilen değerlerden ise bu azalmanın %11,38 olduğu görülmüştür. Bu azalma, yapının yumuşak – yumuşak tasarım bölgesine doğru düşmesine sebebiyet verebilir. Ayrıca sadece rüzgâr türbininin olması durumunda, önerilen yöntemden elde edilen değer ile literatürde verilen değer arasında %3,25'lik bir fark bulunması, yöntemin tutarlı ve literatür ile uyumlu olduğu anlamına gelmektedir. Yine benzer şekilde bu fark kombine sistemde %1,84'tür ki, bu da daha önce Ashes benzeşimi ile elde edilen sonuçlar ile analitik yöntemlerden elde edilen sonuçlar arasındaki fark oranındadır. Dolayısıyla bu çalışmada önerilen yöntemin tutarlı ve literatür ile uyumlu olduğu sonucuna varılabilir.

6.3. Kombine Hibrid Sistem (KHS) doğal frekans analizi

Bu tezde önerilen rüzgar, dalga, akıntı kombine hibrid sistem (KHS) için doğal frekans sonuçları ise Çizelge 6.7'de verilmiştir.

Çizelge 6.7. KHS kombine sistemi için doğal frekans değerleri ve bağıl farkları

	Zemin etkisi dikkate alınarak hesaplanan kombine sistem doğal frekans değeri	Zemin etkisi dikkate alınarak hesaplanan sadece rüzgâr türbininden oluşan sistemin doğal frekans değeri	Zemin etkisi dikkate alınmadan hesaplanan sadece rüzgâr türbininden oluşan sistemin doğal frekans değeri
Doğal frekans değeri	0,113 Hz	0,179 Hz	0,220 Hz
Zemin etkisinin dikkate alınmadığı durum ile aradaki mutlak bağıl fark	% 48,64	% 18,64	-

Çizelge 6.7'den de görüleceği üzere sisteme akıntı türbini eklenmesiyle birlikte yapının doğal frekans değeri düşmekte ve yapı yumuşak – yumuşak tasarım bölgesine düşmeye eğilim göstermektedir. Zemin etkisinin dikkate alınmasıyla doğal frekans değerindeki azalma %18,64 oranında olurken, sisteme fazladan akıntı türbini eklenmesi bu değeri %48,64 oranına getirmektedir. Kombine sistemdeki bu büyük fark, sisteme yeni bir kuvvet

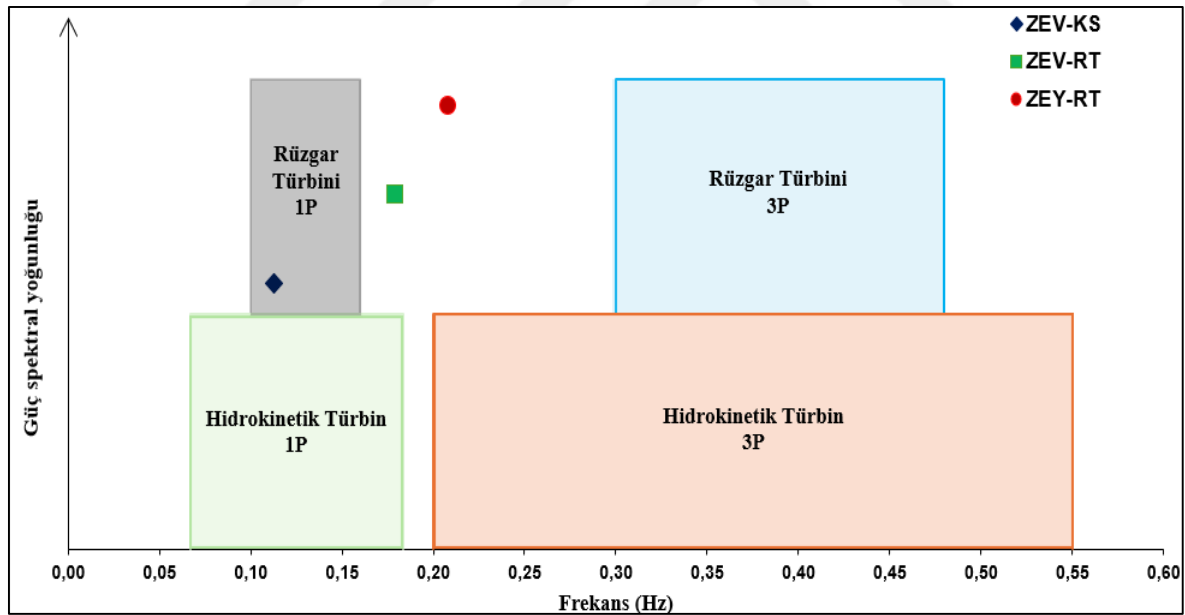
gelmesinden ve artık sistemin doğal frekansının kuvvetten bağımsız hale gelmesinden kaynaklanmaktadır.

Rüzgar ve hidrokinetik türbin için frekans aralıkları Çizelge 6.8’de verilmiştir.

Çizelge 6.8. KHS türbinler için frekans aralıkları

Türbin	Düşük rotor hızları			Yüksek rotor hızları		
	Hız (dev/dk)	1P Frekans (Hz)	3P Frekans (Hz)	Hız (dev/dk)	1P Frekans (Hz)	3P Frekans (Hz)
Rüzgâr	6	0,1000	0,3000	9,6	0,1600	0,4800
Hidrokinetik	4	0,0667	0,2000	11,5	0,1917	0,5750

Çizelge 6.8’deki aralıklar ve Çizelge 6.7’deki doğal frekans değerleri Şekil 6.35’te gösterilmiştir.



Şekil 6.35. KHS türbinlerinin frekans değerleri

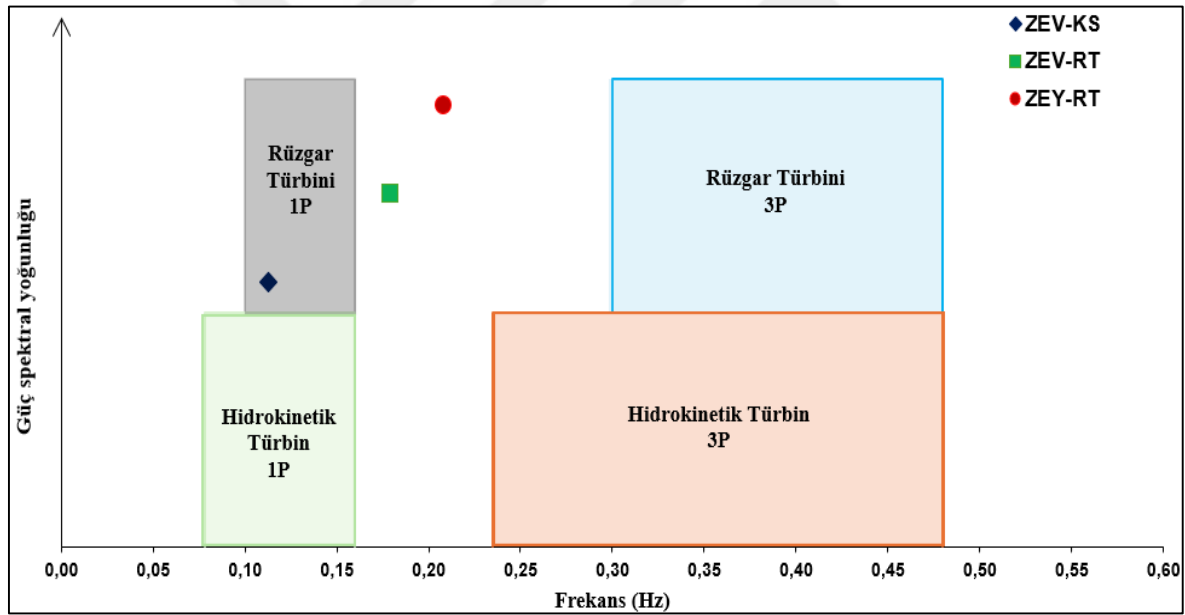
Burada, ZEV; zemin etkisi var, ZEY; zemin etkisi yok KS; kombine sistem ve RT; rüzgâr türbinidir. Şekil 6.35’ten de görüleceği üzere, doğal frekans değerlerini temsil eden tüm noktalar rüzgâr türbini veya hidrokinetik türbinin 1P ve 3P frekanslarıyla örtüşmektedir. Bu durum rezonansa sebep olacak istenmeyen bir durumdur. Dolayısıyla bu durumda

hidrokinetik türbinin üst ve alt çalışma aralığı yenilenerek bir yumuşak – sert tasarım alanı oluşturulmalıdır. Türbinler için yenilenmiş frekans aralıkları Çizelge 6.9’da verilmiştir.

Çizelge 6.9. KHS türbinleri için yenilenmiş frekans aralıkları

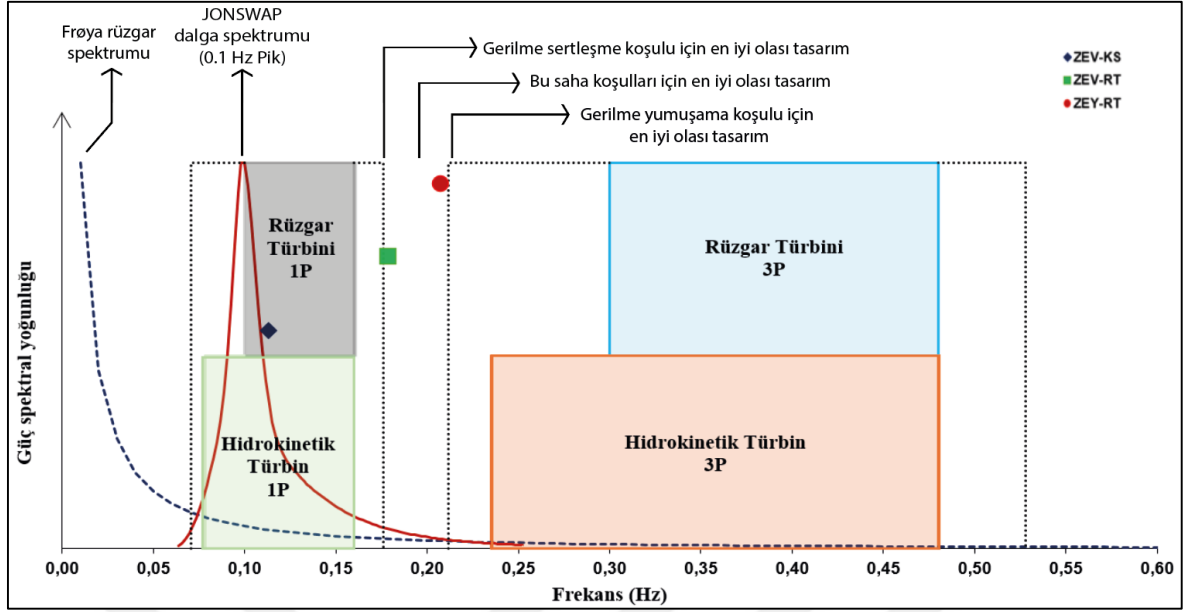
	Düşük rotor hızları			Yüksek rotor hızları		
Türbin	Hız (dev/dk)	1P Frekans (Hz)	3P Frekans (Hz)	Hız (dev/dk)	1P Frekans (Hz)	3P Frekans (Hz)
Rüzgâr	6	0,1000	0,3000	9,6	0,1600	0,4800
Hidrokinetik	4,7	0,0783	0,2350	9,6	0,1600	0,4800

Çizelge 6.9’daki aralıklar ve Çizelge 6.7’deki doğal frekans değerleri Şekil 6.36’da gösterilmiştir.



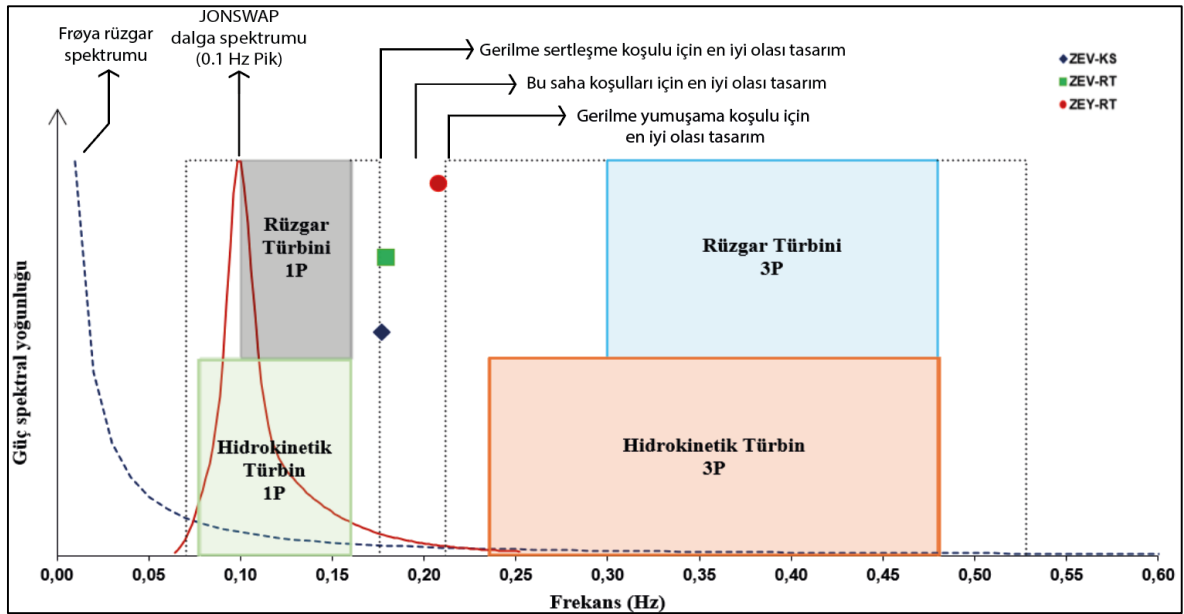
Şekil 6.36. KHS türbinlerinin yenilenmiş frekans değerleri

Şekil 6.1’de Bhattacharya (2014) tarafından önerilen %10’luk güvenlik katsayısı dikkate alınır ve dalga için JONSWAP spektrumu ile rüzgâr için Frøya spektrumu bir arada gösterilmek istenirse Şekil 6.37 elde edilir.



Şekil 6.37. KHS için dinamik yüklerin frekans spektrumu tasarımının seçimi

Şekil 6.37'den de görüleceği üzere zemin etkisinin dikkate alındığı kombine sistem hariç diğer iki durumda da yapının doğal frekans değeri en iyi olası tasarım bölgesinde kalmaktadır. Zemin etkisinin dikkate alındığı kombine sistemde tekil kazığının gömülü uzunluğu, duvar kalınlığı ve rüzgâr türbini kulesinin taban çapı artırılarak doğal frekans değeri en iyi olası tasarım bölgesinde olacak şekilde tasarım yenilenmiştir (Şekil 6.38).



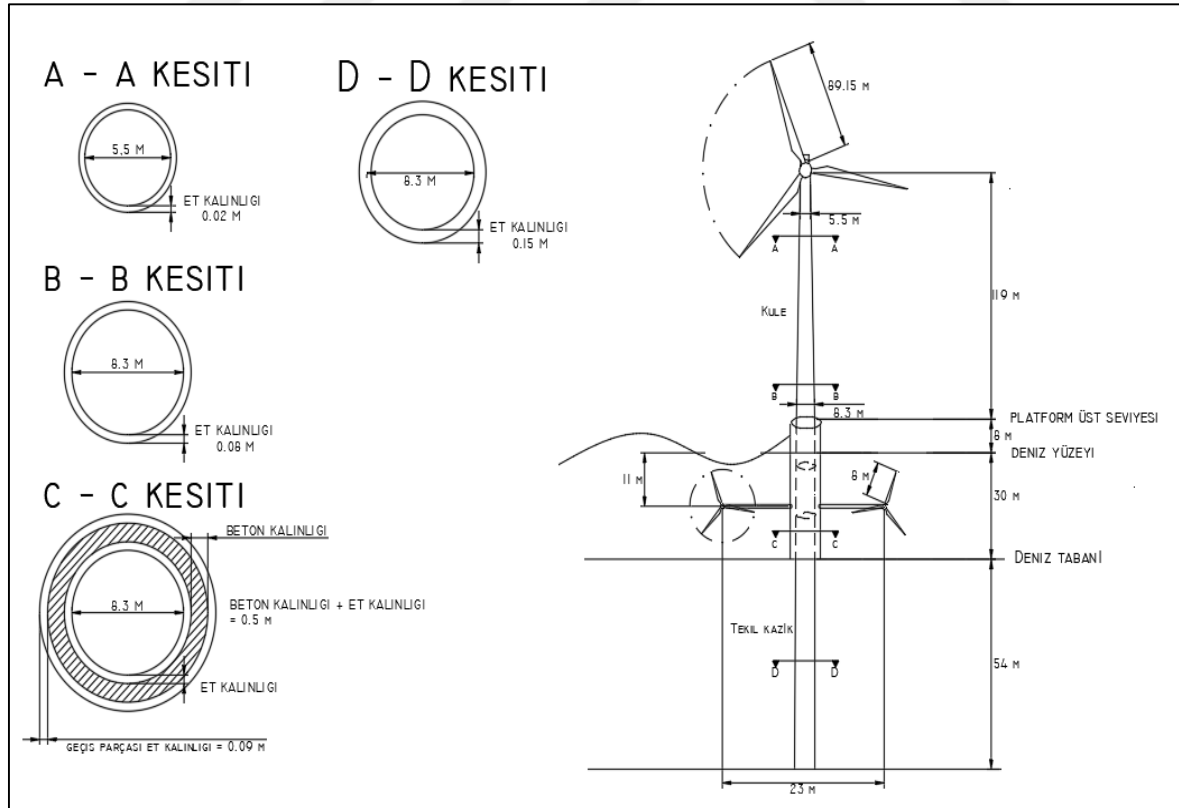
Şekil 6.38. Optimum KHS için dinamik yüklerin frekans spektrumu tasarımının seçimi

Optimum KHS için yapı bileşenlerinin eski ve yeni değerleri Çizelge 6.10'da verilmiştir.

Çizelge 6.10. Optimum KHS için yapı bileşenlerinin eski ve yeni değerleri

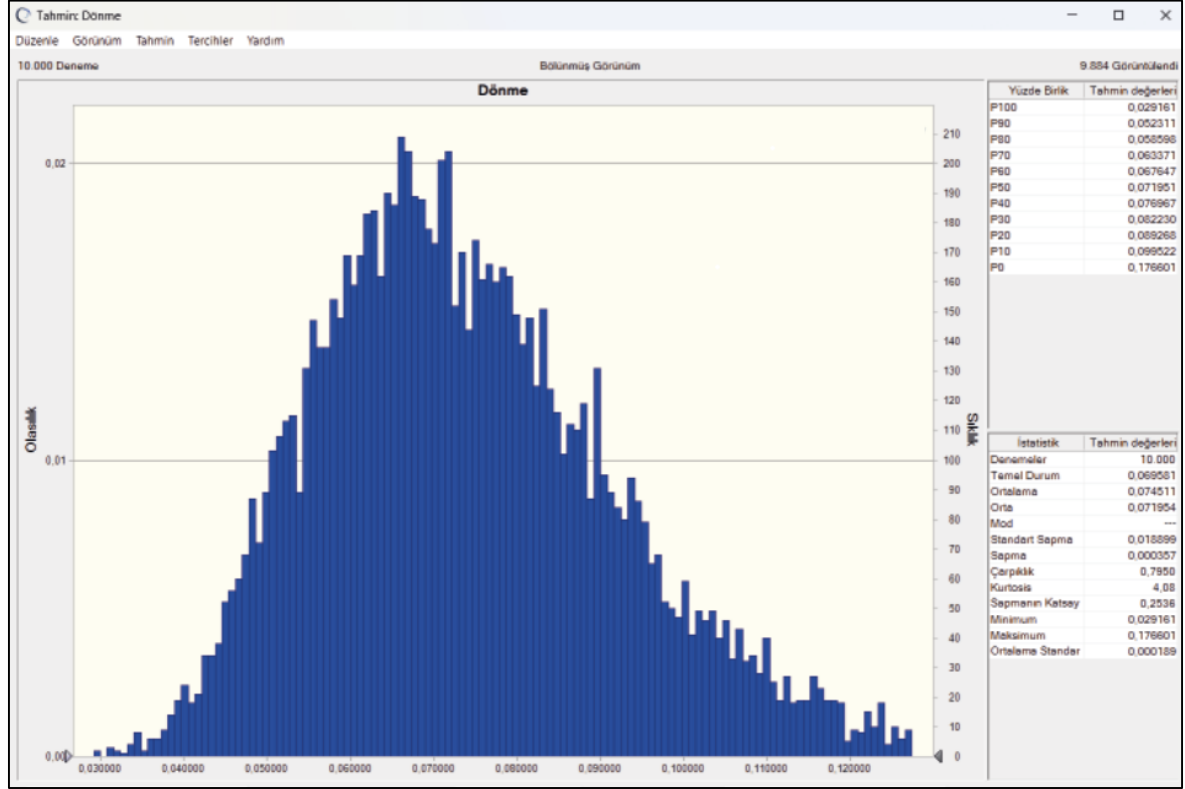
	Eski değer	Yeni değer	Artış miktarı
Kule taban duvar kalınlığı	0,038 m	0,080 m	% 57,89
Kule kütlesi	673,65 ton	895,73 ton	% 32,97
Tekil kazık et kalınlığı	90 mm	150 mm	% 66,67
Kazık gömülü uzunluğu	31,00 m	54,00 m	% 74,19
Tekil kazık kütlesi	558,83 t	1247,47 t	% 123,23

Çizelge 6.10'dan da görüleceği üzere en az artış %32,97 ile kule kütlesinde gerçekleşirken en büyük artış %123,23 ile tekil kazık kütlesinde gerçekleşmiştir. Çizelge 6.10'daki artırımlar deneme – yanılma (trial – error) yöntemiyle gerçekleştirilmiştir. Kırklareli – Kıyıköy balıkçı barınağı yakınında yapılan zemin sondaj logunda kuyu sonu 23 m olarak sondaj bitirilmiştir. Dolayısıyla 54 metrede herhangi bir kaya yapısına rastlanıp rastlanmayacağı daha detaylı zemin analizleri sonucunda belirlenmelidir. Kombine hibrit sistemin nihai tasarımı Şekil 6.39'daki gibidir.



Şekil 6.39. Kombine hibrit sistem nihai tasarımı

Kombine hibrit sistemin nihai tasarımında MCS analizi uygulanarak göçme ihtimali (probability of failure) değerlendirildiğinde Şekil 6.40 elde edilir.



Şekil 6.40. Kombine hibrit sistemin nihai tasarımı için MCS analizi

Şekil 6.40'tan da görüleceği üzere maksimum dönme değeri $0,18^\circ$ olarak elde edilmiştir. Dolayısıyla kombine hibrit sistemin nihai tasarımında hiçbir şekilde $0,50^\circ$ aşılmadığından sistem ekonomik ömrü içerisinde güvenli ($R \approx \%100$) olarak nitelendirilebilir.



7. KOMBİNE ADRES FİZİBİLİTE ETÜDÜ

Buraya kadar anlatılan tüm kısımda yapısal analiz üzerinde durulmuştur. Bu kısımda kombine hibrit sistemin fizibilitesi üzerinde durulacaktır.

Offshore Renewable Energy Catapult – OREC (2019) raporuna göre 10 MW güce sahip bir açık deniz rüzgar türbini için maliyet dağılımı Çizelge 7.1’deki gibidir.

Çizelge 7.1. Deniz üzeri rüzgar türbini maliyet dağılımı (OREC, 2019)

Rüzgar Türbini Maliyeti	10 MW Deniz Üzeri Rüzgar Türbini İçin
Nasel	% 60,61
- Ana plaka ve şaft	% 6,06
- Ana rulman	% 3,03
- Dişli kutusu	% 10,61
- Jeneratör	% 15,15
- Güç aktarımı	% 10,61
- Kontrol sistemi	% 3,79
- Diğerleri	% 11,06
Rotor	% 28,79
- Kanat	% 19,70
- Göbek dökümü	% 2,27
- Pitch sistemi	% 1,52
- Diğerleri	% 5,15
Kule	% 10,61
- Kule	% 10,61

OREC (2019)’a göre 10 MW deniz üzeri rüzgar türbini için göbek yüksekliği, rotor çapına bağlı olarak deniz seviyesinden yaklaşık 110 metre yüksekliktedir. Her kule yaklaşık 100 metre uzunluğunda olup, 600 tondan fazla bir kütleye sahiptir. Kütlenin yaklaşık %90’ı çelik plakalardan oluşurken, geri kalan kısmın büyük çoğunluğunu dövme çelik flanşlar oluşturmaktadır. Kuleler genellikle düzgün konik bir yapıya sahiptir ve 10 MW türbinler için tepe çapı yaklaşık 5 – 6 metre, taban çapı ise 7 – 8 metre civarındadır. Dolayısıyla bu özellikler çalışmadaki modifiye edilmemiş durumdaki özellikler ile uyum içerisindedir.

OREC (2019)'a göre bu kulenin maliyeti 700 000 £ olarak ortaya çıkmaktadır. Çalışmadaki kulenin modifiye edilmeden önceki halinin ağırlığı 673,65 ton olarak hesaplanmıştır. S355 çeliğin maliyeti Türkiye özelinde 1000 £ / tondur. Dolayısıyla tekil kulenin maliyeti 673 650 £ olur ki bu da yine bu sonuçlarla uyumludur. Çizelge 7.1'e göre tüm değerler hesaplanırsa kombine hibrit sistem için dalga enerji üretici ve hidrokinetik türbin olmadan maliyet elde edilir (Çizelge 7.2).

Çizelge 7.2. Kombine hibrit sistemin hidrokinetik türbin ve dalga enerji üretici hariç maliyeti

Rüzgar Türbini Maliyeti	10 MW Deniz Üzeri Rüzgar Türbini İçin
Nasel	3 848 249 £
Rotor	1 827 934 £
Kule	673 650 £
Tekil kazık	558 530 £
Toplam	6 907 729 £ (300 000 000 TL)

Çizelge 7.2'deki değerlerin üzerine kablolama, kurulum gibi değerleri de katarsak OREC (2019)'a göre 10 MW gücündeki deniz üzeri rüzgar türbinin maliyeti 10 000 000 £ yani 434 321 000 TL olarak ortaya çıkmaktadır. Kombine hibrit sistem için tasarımda Çizelge 6.10'dan görüleceği üzere 910,72 ton fazla çelik kullanılması gerekmektedir. Bu da 910 720 £ yani 39 554 382 TL fazladan maliyet getirmektedir. Dolayısıyla bu ek maliyet ileride ilk maliyet kısmında dikkate alınmalıdır.

Kombine hibrit sistemin rüzgar türbininden elde edilecek yıllık elektrik üretimi rotor kanatlarının mekanik güç eğrisi (Şekil 4.18) ile rüzgar hızı dağılımı üzerinde entegrasyon yapılarak, Eş. 7.1'deki gibi hesaplanmıştır (Abrahamsen, 2018).

$$E_{i,c} = \int_{v_{\text{çalışma}}}^{v_{\text{kapama}}} P_{\text{mekanik}}(V) P_{\text{weibull}}(v) dv \quad (7.1)$$

Eş. 7.1'da entegrasyon yapılarak yıllık elektrik üretimi 40 950,87 MWh bulunmuştur. Türbin elektrik üretiminde önemli faktörlerden biri de kapasite faktörüdür. Kapasite faktörü Eş. 7.2 ile tanımlanır.

$$Kapasite Faktörü = \frac{Gerçekleşen \text{ Üretim (MWh)}}{Teorik Maksimum Üretim (MWh)} \quad (7.2)$$

Teorik maksimum üretim Eş. 7.3 ile verilmiştir ve bir yıl boyunca nominal güçte türbinin çalışmasını temsil eder.

$$Teorik Maksimum Üretim (MWh) = P_{nominal} \times Saat (yıl) \quad (7.3)$$

Dolayısıyla Eş. 7.2 ve Eş. 7.3 ile türbinin kapasite faktörü % 46,75 olarak elde edilmiştir.

Elektrik maliyetinin düzeylendirilmiş değeri (LCOE – Levelized Cost of Energy) bir enerji santralinin ekonomik fizibilitesini değerlendiren ve farklı enerji teknolojilerinin maliyet-etkinliklerini karşılaştırmada kullanılan bir ölçüttür. Özellikle deniz üzeri rüzgar türbinleri için, yatırım ve işletme maliyetlerinin yüksek olması nedeniyle LCOE hesaplamaları, projelerin karlılığını ve uzun vadeli sürdürülebilirliğini anlamak için kritik öneme sahiptir (Mehta ve diğ., 2024). LCOE'nin genel denklemi Eş. 7.4'teki gibidir.

$$LCOE = \frac{\sum_{t=1}^N \frac{C_t}{(1+r)^t}}{\sum_{t=1}^N \frac{E_t}{(1+r)^t}} \quad (7.4)$$

Burada, C_t ; t. ci yıldaki toplam maliyet olup Eş. 7.5 ile verilmiştir.

$$C_t = CapEx + OpEx \quad (7.5)$$

Burada, CapEx; türbinlerin satın alımı, taşıma, kurulum ve şebeke bağlantısı gibi başlangıç yatırım maliyetleri ve OpEx ise işletme ve bakım maliyetleridir. Eş. 7.5'de E_t ; t. ci yılda üretilen elektrik miktarı, r; iskonto oranı ver N; projenin ekonomik ömrüdür.

OREC (2019)'a göre MW başına bakım ve işletim giderleri 75 000 £'dir. Dolayısıyla OpEx değeri 75 000 £ olarak alınıp Eş. 7.4'te yerine konulursa, LCOE değeri 41,60 £/MWh olarak elde edilir. Bu değer Euro bazında 50,34 Eur/MWh olarak elde edilmiş olur ki bu da, Danimarkalı Orsted şirketinin AB Düzenleyici İşler Başkanı Jorgen Skovmose Madsen'in yapmış olduğu deniz üzeri rüzgar türbinlerinde LCOE değerlerinin 50 Eur ile 70 Eur arasına

düştü açıklamasıyla uyum göstermektedir (URL – 25). Ayrıca YEKDEM'in deniz üstü rüzgar enerjisi fiyatlandırmasında 261,63 kr/kWh olan bu değerin yerli aksam desteği olarak da 69,84 kr/kWh ek ödeme aldığı göz önünde bulundurulmalıdır (URL – 26). Tüm bunlar düşünülüp hesap yapıldığında ise yerli aksam desteği almadan 6. yılda yerli aksam desteği alması halinde ise sistemin 4. yılda kendini amorti ettiği hesaplanmıştır.

YETI dalga enerji dönüştürücü için elektrik üretimi hesaplarında dalga iklimi verileri kullanılmıştır. YETI dalga enerji dönüştürücüsünün yapıya etkidiği kuvvetler diğer kuvvetlere nispeten daha düşük olduğundan gömülü kazık derinliğinde sadece 1 metre etki ettiği daha önceden belirtilmişti. JONSWAP dalga spektrumundan Ashes Simis yazılımı ile üretilen enerji miktarı m² başına 6,98 kW olarak hesaplanmıştır. Daha önce yapılan Antalya Kaş bölgesindeki modelleme esas alınarak yıllık elektrik üretim miktarı hesabı yapılacaktır. Bu esaslar maddeler halinde şöyledir.

- % 45 sistem hidrodinamiğinden kaynaklı verimlilik kaybı ile,
- 12 metre çaplı dönüştürücü sistem kullanılarak,
- % 27 kapasite faktörü ile.

12 metre çaplı dönüştürücü sistem kullanılması ile yıllık enerji üretim miktarı Eş. 7.6 ile hesaplanır.

$$\text{Teorik elektrik üretim (kWh)} = \text{Alansal enerji} \times \text{Dönüştürücü} \times \text{Saat (yıl)} \quad (7.6)$$

Eş. 7.6'teki teorik elektrik üretim miktarı kapasite faktörü ile çarpılırsa gerçekleşen üretim miktarı elde edilir (Eş 7.7).

$$\text{Kapasite Faktörü} = \frac{\text{Gerçekleşen Üretim (kWh)}}{\text{Teorik Maksimum Üretim (kWh)}} \quad (7.7)$$

Buradan, tek sistem kullanılması halinde üretilen elektrik 95,914 kW ya da 840 206, 64 kWh'dir. Bizim toplamda iki sistemimiz olduğu için üretilen elektrik miktarı 1,68 MWh olarak bulunmuştur. Antalya Kaş bölgesindeki modelleme 2013 yılında yapılmıştır. 2013 yılı Türkiye Cumhuriyeti Merkez Bankası rakamlarına göre bir türbinin kurulum yatırımı 148

000 £ olarak hesaplanmıştır. Bu değer günümüz kuru ile 7 215 000 TL değerine denk gelmektedir.

Benzer bir şekilde yapılan hesaplamalarda YETI türbini için LCOE değeri 26,23 £/MWh olarak elde edilir. Bu değer Euro bazında 31,61 Eur/MWh'dır. Projenin geri dönüş süreci ise hesaplandığında yerli aksam desteğiyle kendini 3. yılda yerli aksam desteği almadan ise 5. yılda amorti ettiği hesaplanmıştır.

Benefit / Cost (Fayda / Maliyet – B/C) oranı, bir projenin ekonomik fizibilitesini değerlendirmek amacıyla, projenin getirisinin (fayda) proje süresi boyunca elde edilen nakit akışlarının, proje maliyetlerinin (örneğin, başlangıç yatırımı ve yıllık işletme maliyetleri) nakit akışlarına oranını göstermektedir. Bu oran, elektrik maliyetinin düzeylendirilmiş değerine benzer şekilde, gelecekteki nakit akışlarının bugünkü değere, indirgenmesiyle hesaplanır (Eş. 7.8).

$$B/C \text{ oranı} = \frac{\text{Proje süresi boyunca elde edilecek gelirlerin bugünkü değeri}}{\text{Proje süresi boyunca yapılacak giderlerin bugünkü değeri}} \quad (7.8)$$

Verilen bilgilerle yapılan hesaplamalar sonucunda dalga enerji üretici için B/C değeri 2,17 deniz üzeri rüzgar türbini için ise 1,39 bulunmuştur. Bu sistemlerin kombine kullanılması ile de bu değer B/C=1,40 olarak hesaplanmıştır. Ortalama değer deniz üzeri rüzgar türbininin B/C değerine yakın olmasının sebebi deniz üzeri rüzgar enerji türbininin kurulu gücüne bağlı ürettiği yıllık elektrik miktarının dalga enerji üreticisine göre çok daha fazla olmasındandır. B/C oranının 1'den büyük olması projenin ekonomik olarak uygulanabilir olduğunu göstermiştir. Dalga enerji üreticinin B/C oranının rüzgar türbininden büyük olması düşük maliyetine oranla daha yüksek getiri sunacağı anlamına gelmektedir.



8. SONUÇ VE ÖNERİLER

1. Çalışma kapsamında ülkemizdeki enerji ihtiyacının artmasıyla birlikte yapılan projeksiyonlarla önümüzdeki dönem temiz ve yenilenebilir enerji açısından girişimlerde bulunacağı görülmektedir. Bu kapsamda yapılan çalışmada irdelenen kombine hibrid sistem yenilenebilir enerji kaynaklarından rüzgar, dalga ve akıntı enerjilerini elektrik enerjisine dönüştürerek ülkemizin enerji ihtiyacını karşılamak için iyi bir örnek teşkil etmektedir. Ülkemizin üç tarafı denizlerle çevrili olduğu düşünüldüğünde söz konusu bu denizlerden “mavi enerji” kapsamında temiz enerji elde edilmesi önemli bir husustur.
2. Tez kapsamında değerlendirilen BKAY ve DSP kavramları ülkemiz ve sürdürülebilir bir çevre eylem planı için büyük önem arz etmektedir. Artan nüfusa bağlı olarak kıyıların korunaksız hale gelmesi, sürdürülebilir kıyı yaşamı için planlı bir BKAY sürecinin oluşturulması yadsınamaz bir gerçektir. Çalışmada BKAY ve BKAY sürecinin bütüncül bir yaklaşım olduğu üzerinde durulmuş ve tüm paydaşların bu sürece katılarak gelecekleri hakkında söz sahibi olması konusu vurgulanmıştır.
3. DSP ise enerji kaynakları başta olmak üzere müşterek deniz alanlarına sahip ülkelerin bu deniz alanlarını hangi derecede kullanabileceği sorununa temas eden önemli bir başlıktır. Bu çalışma özelinde Türkiye denizlerinin misak – 1 millisi olarak kabul edilebilecek “Mavi Vatan” doktrini kapsamında bir ÇKKV modeli geliştirilmiştir.
4. Bu model açık deniz saha planlaması kriterleri, çevresel etki kriterleri ve ekolojik – biyolojik çeşitlilik kriterleri adı altında üç farklı kriter ve her bir kriterin kendi altında alt kriterlerinden oluşan bir matris sistemi biçiminde verilmiştir. Her bir kriterin puanlaması belirlenmiş ve daha sonra bu kriterlerin her bir puanı belli dağılımlara uygun şekilde dağılımlarla temsil edilip toplam puan şeklinde yine bir dağılım şeklinde tanımlanmıştır. Bu modelin ismine Çok Kriterli Karar Verme Stratejik Planlama Modeli denilmiştir.
5. Çalışma kapsamında geliştirilen kombine hibrit model deniz alanından alınabilecek farklı şekillerdeki enerjilerin bir arada alındığı, rüzgar, dalga ve akıntı enerjisinin bir arada kullanıldığı öncü bir model olarak öne çıkmaktadır.
6. Literatür taramasında bugüne kadar yapılmış analiz yöntemlerinin zaman içindeki gelişimi tarif edilmiş ve sonuç olarak bu çalışmanın gerek doğal frekans analizi hesaplanırken kullanılan yöntem olarak gerek birden fazla türbinin bir arada bir yapı dahilinde meydana gelmesiyle beraber yenilikçi bir çalışma olduğunun altı çizilmiştir. Ayrıca deformasyon analizinde kullanılan yöntemlerden p – y eğrilerinin büyük çaplı

- kazıklar için doğru sonuçlar vermediği Bryne ve diğ. (2015) tarafından yapılan çalışmalar ışığında belirtilmiştir.
7. Kombine hibrid sistemin tasarımında kullanılacak yöntemler ilk aşamasından son aşamasına kadar titizlikle akış şeması ile verilmiş ve bu akış şemasına uyularak analizler yapılmıştır. Deniz alanı ile ilgili veri girdileri HYDROTAM – 3D ortamından elde edilmiştir. HYDROTAM – 3D ortamından dalga verileri, akıntı verileri ve rüzgar verileri elde edilmiş ve 10 metre yükseklikte ölçülen rüzgar verilerinin türbin seviyesine dönüştürülmesi sağlanmıştır.
 8. Çalışmadaki modelin uygulama noktası için daha önce de YEKA alanı olarak ilan edilmiş üç bölgeden biri olan Kırklareli – Kıyıköy bölgesi seçilmiştir. Bölgedeki batimetri Seyir Hidrografi ve Oşinografi Dairesi (SHOD) tarafından sağlanan haritalardan elde edilmiştir. Bu batimetri incelendiğinde ESMAP (2020) tarafından önerilen sabit tabanlı rüzgar türbinlerinin 50 metrede derinlikten az olması esası gözetilerek 30 metre derinlikte inşa edilmesi seçilmiştir.
 9. ESMAP (2020)'ye göre bölgede rüzgar türbini seviyesinde elde edilen hız olan 8,2 m/s'lik değer optimal rüzgar kaynak koşulunu karşılamaktadır. Ayrıca bulunan bu değer daha önce bu bölgede çalışma yapan Yıldırım (2022)'in çalışmasıyla uyum içerisinde olduğu görülmüştür. Kombine hibrid sistemin tasarlanacağı bölge Google Earth üzerinde işaretlemeyle birlikte gösterilmiştir.
 10. HYDROTAM – 3D ortamından rüzgar iklimi, dalga iklimi ve akıntı iklimi incelenmiş ve maksimum değerler nihai limit durum analizinde kullanılmıştır. Bu yönde türbin seviyesinde ortalama rüzgar hızı 8,2 m/s olarak elde edilmiştir. Dalga ikliminde baskın yönün kuzey kuzey doğu yönü olduğu belirlenmiş ve tasarım dalga yüksekliği olarak 50 yıl tekerrür süresine sahip dalga yüksekliği olan 6,38 m kullanılmıştır. Akıntı ikliminde tasarım için olasılık en yüksek akıntı değeri olan 1 m/s değeri kullanılmıştır. Söz konusu bu değerler göz önünde bulundurularak rüzgar türbini olarak DTU 10 MW referans türbini, akıntı türbini olarak SeaGen 1,2 MW akıntı türbini ve dalga enerji üretici olarak tamamen yerli YETI dalga enerji üretici seçimi yapılmıştır.
 11. Deformasyon ve doğal frekans analizinde büyük öneme sahip olan zemin cinsi Kıyıköy bölgesinde balıkçı barınağı yakınlarında yapılan sondaj çalışmalarından elde edilen verilerle elde edilmiştir. Zemin profilinin kumdan oluştuğu görülerek gerekli zemin parametreleri Brinkgreve ve diğ. (2010) tarafından verilen çalışmalarla belirlenmiştir. Üç farklı rölatif sıklıkta kum için çalışma gerçekleştirilmiş ve her bir sıklık için p – y eğrilerinin 3 boyutlu sonlu elemanlar yazılımı PLAXIS 3D'den elde edilen sonuçlarla

farkı ortaya konmuştur. Detaylı analizlerin yapılırken zemin cinsi olarak balıkçı barınağı yakınında görülen orta – sıkı kum kullanılmış ve söz konusu analizler bu zemin parametrelerine göre gerçekleştirilmiştir. Orta – sıkı kum için Brinkgreve ve diğ. (2020) tarafından verilen eşitlikler Caceoğlu (2023)'ün çalışmasıyla uyumlu olduğu görülmüştür.

12. Deformasyon analizinde kullanılan yöntemlerin farklılıkları yapılan hesaplamalarla ortaya konmuştur. Buna göre API (2014) ve DNV (2014) tarafından önerilen $p - y$ eğrileri büyük çaplı kazıkların deplasman değerlerini doğru tahmin edememekte, 3 boyutlu sonlu elemanlar yazılımı olan PLAXIS 3D saha deneyleri ile doğru sonuçlar vermektedir. Bu kapsamda PLAXIS 3D ortamında yapılan modelin doğruluğu saha deneyleriyle mukayese edilmiş oluşturulan modelin doğruluğu kanıtlanmıştır.
13. Kazığın göçme ve devrilme kriterleri literatürdeki en tutucu şekilde alınmış ve nihai limit durum analizi için Zdravkovic ve diğ. (2015)'nin çapın %10'u kadar deformasyon, servis limit durumu için ise Arany ve diğ. (2017)'nin 0,5 derece dönme kıstasları kabul edilmiştir. Farklı L/D değerlerine göre yapılan analizlerde küçük L/D değerlerinde $p - y$ eğrilerinin 3 boyutlu sonlu elemanlar analizi ile elde edilen sonuçlardan farklı sonuçlar verdiği bu değer büyüdükçe, kazık kısa kazık davranışından uzun kazık davranışını göstermeye doğru gittikçe, sonuçların birbirlerine yaklaştığı görülmüştür.
14. Kazığa gelen rüzgar, dalga ve akıntı kuvvetleri göz önünde bulundurularak hesaplanmıştır. Kazığa gelen dalga ve rüzgar kuvvetleri olarak E – 3 senaryosu maksimum olarak belirlenerek kombine kuvvetin 9,88 MN ve bunun zemin kotunda oluşturduğu momentin 567,9 MN olduğu belirlenmiştir. Söz konusu bu hesapta oluşabilecek en maksimum durum kuvvetlerin kombinasyonlarından elde edilmiş ve bu bilgiler ışığında kazığın ön boyutlandırması gerçekleştirilip, kazık çapı, kazık et kalınlığı, kazık gömülü derinliği belirlenerek AutoCAD çizimi ve dijital olarak görselleştirilmesi yapılmıştır.
15. Dört farklı yöntem ile yapılan deformasyon analizi sonucu maksimum dönme ve deformasyon değerlerinin 3 boyutlu sonlu elemanlar yöntemi olan PLAXIS 3D ortamından elde edilen sonuçlar olduğu görülmüş, minimum değerlerin ise API (2014) ve DNV (2014) tarafından önerilen $p - y$ eğrilerinden elde edildiği saplanmıştır. Bu kapsamda yine deformasyon analiz yöntemlerinden olan basitleştirilmiş üçlü yay yönteminden elde edilen sonuçların bu aralıkta kaldığı tespit edilmiştir. Zeminin ve kazığın üretildiği malzemenin belirsizlikleri dikkate alınarak söz konusu bu basitleştirilmiş üçlü yay yöntemine MCS analizi uygulanarak her iki çözümü de

kapsayıcı bir çözüm elde edilmiştir. MCS analizinde girdiler literatüre uygun olarak belirli dağılımlar halinde girilmiş ve çıkan sonuç da doğal haliyle bir dağılım olarak elde edilmiş ve söz konusu bu dağılımın alt ve üst değerlerine bakıldığında çözümün kapsayıcılığı garanti altına alınmıştır.

16. Deniz üzeri rüzgar türbinlerinin en önemli tasarım ilkelerinden biri de servis limit durum analizidir. Bu analizde ele alınması gereken en önemli husus hiç şüphesiz yapının doğal frekans analizidir. Kombine hibrid sistemin hem dalga, hem rüzgar hem de akıntıya maruz kaldığı düşünüldüğünde inşa edilecek yapının doğal frekansının söz konusu bu çevresel etkenlerden herhangi birinin frekansı ile çakışması rezonansı meydana getirecektir ki bu da şüphesiz yapıya ağır hasar verecek belki de sonu yapının yıkılmasına kadar gidecektir.
17. Kombine hibrid sistem için doğal frekans analizinde spektrumlar elde edilerek yapının doğal frekansının buraya düşmemesine dikkat edilmiştir. Bu kapsamda daha önce hem rüzgar hem akıntı türbinin olduğu Nasab ve diğ. (2022)'nin çalışmasında yapının tek dereceli serbestliğe göre çözülmesinin doğru sonuçlar vermeyeceği düşünülerek yapının iki dereceli serbestliğe göre çözülmesi gerektiği düşünülmüştür. Bu kapsamda iki dereceli serbestliğe göre gerekli eşitlikler türetilmiştir. Türetilen bu eşitlikler Strathelyde Üniversitesi (2017)'nden bir grup araştırmacı tarafından yapılan rüzgar ve akıntı türbininden meydana gelen sistemin ANSYS ortamından elde edilen sonuçlarıyla mukayese edilmiş ve aradaki mutlak bağıl farkın %1,84 olduğu görülerek eşitliklerin uyumu ortaya konmuştur.
18. Tek dereceli serbestliğe ve iki dereceli serbestliğe göre çözümler yapıp aradaki farkın %48,64 olduğu ortaya koyularak hibrit sistemlerin tek dereceli çözümlerinin hatalı olacağı, iki dereceli serbestliğe göre çözümlerinin ise daha isabetli olacağı vurgulanmıştır. Ayrıca ortaya konulan modelin tek dereceli serbestliğe sahip yapılarda da doğruluğunun ispatı için Simis Ashes yazılımından elde edilen sonuçlarla eşitlikler mukayese edilmiş bunun sonucunda mutlak yüzde bağıl fark %2,23 bulunarak eşitliklerin doğruluğu ispatlanmıştır.

19. Yapının doğal frekansının türbinlerin frekanslarıyla çakışıp rezonans oluşturmaması için hidrokinetik türbinlerin alt dönme hızları arttırılmış böylece Bhattacharya (2014) tarafından verilen yumuşak – sert bölge aralığının daha fazla açılması sağlanmıştır. Yapının doğal frekansının rüzgar ve hidrokinetik türbinlerin frekansı ile üst üste gelmesinden dolayı yapının boyutları arttırılmıştır. Söz konusu bu boyutlar kombine hibrit sistemin en son hali olarak AutoCad çizimi ile verilmiştir.
20. Kombine hibrit sistemin maliyet analizi yapılarak her bir türbin için elektrik maliyetinin düzeylendirilmiş değeri LCOE bulunmuştur. LCOE içinde başlangıç yatırım maliyetini ve yapının ekonomik ömrü boyunca bakım masrafları ile getirisinin kıyaslandığı MWh başına elektrik üretim maliyetidir. Bu kapsamda OREC (2019) tarafından verilen 10 MW’lık bir türbin için maliyet dağılımı ele alınarak kombine hibrit sistemdeki her bir türbinin amortisman süreleri hesaplanmıştır.
21. Her bir türbinin rüzgar türbini sistemine sonradan eklenmesiyle ortaya çıkan yapıdaki malzeme artış miktarı dikkate alınmıştır. Buna göre rüzgar türbinin LCOE’si 52,90 Eur/MWh bulunmuştur. Bu değer Danimarkalı Orsted şirketinden Jorgen Skovmos Madsen’in yapmış olduğu deniz üzeri rüzgar türbinlerinin LCOE aralığı olan 50 Eur ile 70 Eur arasına düşmektedir ki bu sonuç da bunu doğrular niteliktedir. Ayrıca YEKDEM tarafından verilen elektrik alım fiyatları da incelenip hem yerli üretim hem de yerli üretim teşviği olmadan amortisman süreleri hesaplanmış ve yerli aksam desteği alması kapsamında 4. yılda yerli desteği almaması halinde ise 5. yılda kendini amorti ettiği belirtilmiştir.
22. Bu kapsamda YETI dalga enerji üreticinin analizleri bölge için elde edilen JONSWAP spektrumundan alınan değerler incelenmiş ve LCOE değeri 28,57 Eur/MWh olduğu bulunmuştur. Yapılan hesaplamalarda YETI dalga enerji üreticinin 3. yılda kendini amorti ettiği görülmüştür ki bunun sebebi YETI dalga enerji üreticinden elde edilen elektrik miktarının DTU 10 MW rüzgar türbininden elde edilen elektrik miktarından oldukça küçük olmasından kaynaklanmaktadır. YETI dalga enerji üreticinden bir yılda 1,68 MWh elektrik enerjisi üretilirken, DTU 10 MW rüzgar türbini için bu değer 40950, 87 MWh’dır.

Sonuç olarak geliştirilen model, deniz üzerindeki kombine rüzgar ve hidrokinetik enerji santrallerinin doğal frekans davranışlarını, yapısal güvenilirlik ve mavi enerji verimliliği açılarından değerlendirilerek kritik tasarım parametresi olan rezonans riskini minimize etmeyi hedeflemektedir. Zemin etkisi ve türbin kombinasyonlarının doğal frekansa olan etkileri

modelde ortaya konmuş, tasarım süreçlerine yönelik bir metodoloji geliştirilmiştir. Model yenilenebilir mavi enerji kaynaklarının optimum şekilde entegre edilmesini sağlamaktadır. Model kombine ADRES sistemlerde zemin etkisinin ve farklı türbin konfigürasyonlarının doğal frekans üzerinde önemli etki yarattığını göstermektedir. Bu sonuçlar, sistem tasarımında rezonans riskini minimize etmek için ilave kuvvetlerin ve kütlelerin optimum konfigürasyon için optimize edilmesi gerektiğini ortaya koymaktadır.

Rüzgar ve hidrokinetik türbinlerin doğal frekansları arasındaki örtüşme, rezonans riski oluşturduğundan, yeni frekans aralıkları belirlenmiş ve yumuşak – sert tasarım stratejisi geliştirilmiştir. Yenilenen tasarımda duvar kalınlığı, kazık gömülü uzunluğu ve konfigürasyon optimize edilerek sistemin doğal frekans değerlerinin güvenli aralıkta tutulması sağlanmıştır. Bu tasarım güncellemeleri, kombine sistemlerin uzun vadeli yapısal dayanıklılığı için kritik adım olarak değerlendirilmektedir.

Optimum tasarıma yönelik güncellemeler, sistemin bileşenlerinde önemli artışlar gerektirmiştir. Özellikle tekil kazık kütlelerinde, kazık gömülü uzunluğunda ve kule kütlelerinde artışlar yapılmıştır. Bu yapısal iyileştirmeler, sistemin güvenilirliğini artırarak enerji üretim süreçlerinin verimini de sağlamaya yönelik bir stratejidir.

Sonuç olarak bu tezde, sistemin sürdürülebilirliği, fizibilitesi ve operasyonel ömrü açısından Karadeniz koşullarında özgün bir mavi enerji tasarım modeli geliştirilmiştir. Hibrit sistemlerin tek dereceli çözümlerinin hatalı olacağı, iki dereceli serbestliğe göre çözümlerin yapılması gerektiği literatürde ilk defa ortaya konmuştur. Toplamda kombine sistemin üreteceği elektrik miktarı 1,68 MW saat olarak bulunmuştur. Dalga enerji üretici için B/C fizibilite değeri 2,17 deniz üzeri rüzgar türbini için ise 1,39 bulunmuştur. Bu sistemlerin kombine kullanılması ile de bu değer $B/C=1,40$ olarak hesaplanmıştır. Görüldüğü üzere tezde Türkiye’ye özgü geliştirilen yerli ve milli kombine mavi enerji santrali aynı zamanda verimli ve ekonomik açıdan yapılabilir. Bu yapıların tasarımı için de çift dereceli serbestliğe dayalı yeni bir tasarım modeli geliştirilmiştir.

Tez kapsamında ileride yapılacak çalışmalara öneri olarak ise denizin sönümleyici etkisinin derinliğe bağlı olarak değişiminin, değişken şekilde yapının doğal frekans analizine katılması söylenebilir.

KAYNAKLAR

- Abadie, C. N., Bryne, B., Houlsby, G., Burd, H., McAdam, R. ve Beuckelaers, ve W. J. A. P. (2024). *Modelling of offshore wind monopile lifetime performance*. 4th International Symposium on Frontiers in Offshore Geotechnics (ISFOG)'de sunuldu, Texas.
- Abrahamsen, A.B., Mijatovic, N., Seiler, E., Zirngibl, T., Træholt, C., Norgård, P.B. ve Ostergaard, J. (2010). Superconducting wind turbine generators. *Superconductor Science and Technology*, 23(3), 034019.
- Adhikari, S. ve Bhattacharya S. (2011). Vibrations of wind-turbines considering soil-structure interaction. *Wind Structures*, 14, 85 – 112.
- Ağaçdiken, Ş. (2020). *Bütünleşik kıyı alanları ve yönetimi planlaması*. Mekansal Planlama Genel Müdürlüğü Mekansal Stratejiler ve Çevre Düzeni Planları Daire Başkanlığı Sunumu'nda sunuldu, Ankara.
- Ahmed, S. S. ve Hawlader, B. (2016). Numerical analysis of Large – diameter monopiles in dense sand Supporting offshore Wind turbines. *International Journal of Geomechanics*, 16(5), 04016018.
- Albotoush, R. ve Shau Hwai, A. T. (2022). A mathematical approach for linking/integrating management plans: Marine Spatial Planning (MSP) and Integrated Coastal Zone Management (ICZM) as a case study. *Italian Journal of Pure and Applied Mathematics*, 47 (2022), 147.
- Alkhoury, P., Soubra, A – H., Rey, V. ve Ait – Ahmed, M. (2020). A full three-dimensional model for the estimation of the natural frequencies of an offshore wind turbine in sand. *Wind Energy*, 24(7), 699 – 719.
- Alkhoury, P., Soubra, A – H., Rey, V. ve Ait – Ahmed, M. (2022). Dynamic analysis of a monopile-supported offshore wind turbine considering the soil-foundation-structure interaction. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 158, 107281.
- Alvarez – Romero, J., G., Pressey, R. L., Ban, N. C., Vance – Borland, K., Willer, C., Klein, C. J. ve Gaines, S. D. (2011). Integrated Land – Sea Conservation Planning: The Missing Links. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, 42(1), 381 – 409.
- Amel, D., Djillali, A. B., Bhattacharya, S. ve Nasreddine, A. (2022). Evaluation of sand p–y curves by predicting both monopile lateral response and OWT natural frequency. *Studia Geotechnica et Mechanica*, 23(3), 034019.
- Andersen, O. J. ve Lovseth, J. (2006). The Frøya database and maritime boundary layer wind description. *Marine Structures*, 19 (2 – 3), 173 – 192.
- Andersen, L. V., Vahdatirad, M. J., Sichani, M. T. ve Sorensen, J. D. (2012). Natural frequencies of wind turbines on monopile foundations in clayey soils – A probabilistic approach. *Computers and Geotechnics*, 43, 1 – 11.

- Andersen, H. K., Engin, H. K., D'Ignazio, M. ve Yang, S. (2023). Determination of cyclic soil parameters for offshore foundation design from an existing data base. *Ocean Engineering*, 267, 113180.
- API (2014) *Planning, designing and constructing fixed offshore platforms – working stress design, API Recommended Practice 2A – WSD* (22 nd edition) American Petroleum Institute.
- Arany, L., Bhattacharya, S., Adhikari, S., Hogan, S. J. ve MacDonald, J. H. G. (2015). An analytical model to predict the natural frequency of offshore wind turbines on three-spring flexible foundations using two different beam models. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 74, 40 – 45.
- Arany, L., Bhattacharya, S., MacDonald, J. H. G. ve Hogan, S. J. (2016). Closed form solution of Eigen frequency of monopile supported offshore wind turbines in deeper waters incorporating stiffness of substructure and SSI. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 83, 18 – 32.
- Arany, L., Bhattacharya, S., MacDonald, J. H. G. ve Hogan, S. J. (2017). Design of monopiles for offshore wind turbines in 10 steps. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 92, 126 – 152.
- Atik, S. (2011). *Bütünleşik kıyı alanları yönetimi ve Türkiye’de bazı uygulamalarının değerlendirilmesi*, TMMOB 7. Kıyı Mühendisliği Sempozyumu’nda sunuldu, Trabzon.
- Avrupa Komisyonu (1999). *Towards a European integrated coastal zone management strategy, General principles and Policy options*. European Commission.
- Avrupa Komisyonu (2011). *Maritime Spatial Planning in the EU – Achievements and Future Development*. European Commission.
- Avrupa Komisyonu (2018). *Land Sea Interactions in Maritime Spatial Planning*. European Commission.
- Bak, C., Zahle, F., Bitsche, R., Kim, T., Yde, A., Henriksen, L. C., Hansen, M. H., Blasques, J. P. A. A., Gaunaa, M. ve Natarajan, A. (2013). *The DTU 10-MW Reference Wind Turbine*. Danish wind power research içerisinde.
- Balas, C. E. ve Koç, L. (2002). Risk assessment of vertical breakwaters - A case study in Turkey. *China Ocean Engineering*, 16(1), 123 – 134.
- Balas, C. E. (2024). *Türkiye’nin Açık Saha Deniz Planlaması, Mavi Ekonomi ve Deniz Saha Planlaması Eğitim Programı’nda sunuldu*, Ankara.
- Balas, E.A., Genç, A.N. ve Balas, C.E. (2024). Strategic adaptation to climate change through Monte Carlo – based multi – criteria decision model in marine Spatial planning. *Journal of Coastal Research*, SI (113), 169 – 174.

- Balas, E.A., Uğurlu, A. ve Balas, C. E. (2024). A hybrid probabilistic design model of riverine jetties incorporating three-dimensional numerical simulations of transport phenomena in the context of emerging climate change. *Journal of Coastal Research*, SI (113), 220 – 224.
- Balas, L. ve Özhan, E. (2001). Applications of a 3-D Numerical Model to Circulations in Coastal Waters. *Coastal Engineering Journal, Japan Society of Civil Engineers and Word Scientific Publications*, 43(2), 99 – 120.
- Balas, L. ve Özhan, E. (2003). A baroclinic three-dimensional numerical model applied to coastal Lagoons. *International Conference on Computational Science (ICCS 2003), LECTURE NOTES IN COMPUTER SCIENCE*, 2658, 205 – 212.
- Balas, L. (2004). Modelling of Interaction Between Surface Waves and Mud Layer. *Lecture Notes in Computer Science*, 3037, 618 – 621.
- Balas, L., Numanoğlu Genç, A. ve İnan, A. (2012). *HYDROTAM: 3D Model For Hydrodynamic and Transport Processes in Coastal Waters*. 6th International Congress on Environmental Modelling and Software’de sunuldu, Leipzig.
- Balas, L., İnan, A. ve Numanoğlu Genç, A. (2012). *Antalya- Lara Denizel Alanı Dalga İklimi ve Dalga Enerjisi Modellemesi*. DLTM Yazılım Teknolojileri Sanayi Ve Ticaret Ltd.Şti. Gazi Üniversitesi, Teknopark, Ankara.
- Balas, L., İnan, A. ve Numanoğlu Genç, A. (2013). Modelling of Dilution of Thermal Discharges in Enclosed Coastal Waters. *Research Journal of Chemistry and Environment*, 17(10), 82 – 89.
- Balas, L. ve Balas, C. E. (2020). *Edirne – Tekirdağ – Kırklareli illeri bütünleşik kıyı alanı planlaması araştırma raporu, sahil şeridi batimetrik ve oşinografik ölçümler uzman değerlendirme raporu*, EduGlobe Yurtdışı Akreditasyon Eğitim Danışmanlık ve Mühendislik.
- Barber, E. S. (1953). Discussion to paper by SM Gleser, *ASTM, STP*, 154(1953), 96 – 99.
- Bergua, R., Robertson, A., Jonkman, J. ve Platt, A. (2021). *Specification Document for OC6 Phase II: Verification of an Advanced Soil-Structure Interaction Model for Offshore Wind Turbines*. Golden, CO: National Renewable Energy Laboratory. NREL/TP-5000-79938.
- Bhattacharya, S. (2014). Challenges in Design of Foundations for Offshore Wind Turbines. *Engineering & Technology Reference*, 1(1).
- Biçer Aymergen, B. (2023). *Deniz Yapılarının Çok Kriterli Karar Verme Yöntemi (ÇKKV) İle Planlanması Ve Tasarım Parametrelerinin Uyarlamalı Ağ Tabanlı Bulanık Çıkarım Sistemi İle Tahmini*, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Brinkgreve, R. B. J., Engin, E. ve Engin, H. K. (2010). *Validation of empirical formulas to derive model parameters for sands*. 7th NUMGE Conference’da sunuldu, Trondheim.

- Brinkgreve, R., Lsi, D., Lahoz, M. ve Panagoulas, S. (2020). Validation and Application of a New Software Tool Implementing the PISA Design Methodology. *Journal of Marine Science and Engineering*, 8, 457.
- Broms, B. B. (1964). Lateral Resistance of Piles in Cohesionless Soils. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, 90(3), 123 – 156.
- Byrne, B. W., McAdam, R., Burd, H. J., Houlsby, G. T., Martin, C. M., Zdrakovic, L., Taborda, D. M. G., Potts, D. M., Jardine, R. J., Sideri, M., Schroeder, F. C., Gavin, K., Doherty, P., Igoe, D., Muir Wood, A., Kallehave, D., ve Skov Gretlund, J. (2015). *New design methods for large diameter piles under lateral loading for offshore wind applications*. Third International Symposium on Frontiers in Offshore Geotechnics (ISFOG 2015)'de sunuldu, Oslo.
- Bryne, B. W., McAdam, R., Burd, H. ve Houlsby, G. T. (2017). *PISA: New Design Methods for Offshore Wind Turbine Monopiles*. 8th International Conference for Offshore Site Investigation and Geotechnics'de sunuldu, Londra.
- Byrne, B. W., Burd, H. J., W., Zdrakovic, L., McAdam, R., Taborda, D. M. G., Houlsby, G. T., Jardine, R. J., Martin, C. M., Potts, D. M. ve Gavin, K. (2019). PISA: new design methods for offshore wind turbine monopiles. *Revue Française de Geotechnique*, 158, 3.
- Burbridge, P., Glavovic, B. ve Olsen, S. (2011). *Practitioner Reflections on Integrated Coastal Management Experience in Europe, South Africa, and Ecuador*. Treatise on Estuarine and coastal Science içinde; editörler Wolanski, E. ve McLusky, D., S., Waltham: Academic Press, 131 – 158.
- Bush, E. ve Manuel, L. (2009). *Foundation Models for Offshore Wind Turbines*. 47th AIAA Aerospace Sciences Meeting Including The New Horizons Forum and Aerospace Exposition'da sunuldu, Orlando.
- Buyruk, T., Balas, E. A., Numanoğlu Genç, A. ve Balas, L. (2024). Exploring Renewable Energy on the coastline of Türkiye: Wind and Wave Energy potential, *Journal of Coastal Research*, SI (113), 788 – 792.
- Caceoğlu, E. (2023). *Offshore Wind turbines in Marmara Region, Türkiye: Site selection and preliminary geotechnical design of monopiles*, Yüksek Lisans Tezi, Orta Doğu Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Fakültesi, Ankara.
- Carswell, W., Arwade, S. R., DeGroot, D. J. ve Lackner, M. A. (2015). Soil – structure reliability of offshore wind turbine monopile foundations. *Wind Energy*, 18, 483 – 498.
- Cebe, K., Balas, L. ve Yıldırım Fidanoğlu, P. (2024). Exploring renewable energy on the coastline of Türkiye: Wind and wave power potential. *Journal of Coastal Research*, SI (113), 402 – 406..

- Cicin – Sain, B., Knecht, R., W., Vallega, A. ve Harakunarak, A. (2000). Education and Training in Integrated Coastal Management: Lessons from the International Arena. *Ocean & Coastal Management*, 43, 291 – 330.
- Clough, R. ve Penzien, J. (2006). *Dynamics of Structures*, Beijing: Higher Education Press.
- Coastal Engineering Research Center (1984) *Shore Protection Manual* (Vol. 1), U.S. Army Coastal Engineering Research Center.
- Cuellar, P. (2011). *Pile Foundations for Offshore Wind Turbines: Numerical and Experimental Investigations on the Behaviour under Short-Term and Long-Term Cyclic Loading*, Doktora Tezi, Technischen Universität Berlin, Berlin.
- Cui, L., Amani, S., Gabr, M., Kumari, W. G. P., Ahmed, A., Ozcan, H., Horri, B. A. ve Bhattacharya, S. (2024). Synergistic Hybrid Marine Renewable Energy Harvest System. *Energies*, 17(5), 1240.
- Cui, L., Chen, J., Liu, D. ve Zhen, D. (2024). Fault diagnosis of offshore wind turbines based on component separable synchroextracting transform. *Ocean Engineering*, 291, 116275.
- Damgaard M., Zania V., Andersen L. ve Ibsen, L. B. (2014). Effects of soil–structure interaction on real time dynamic response of offshore wind turbines on monopiles. *Engineering Structures*, 75, 388 – 401.
- Davison, A. ve Mallows, T. (2005). *Strangford Lough Marine Current Turbine Environmental Statement (Non-Technical Summary)*. Project No. 9P5161. Edinburg: Royal Haskoning Ltd.
- Değerli, B. ve Erbaş, A., E. (2020). Bütünleşik kıyı alanları planları ve mekansal planlama ilişkisi, İzmit Körfezi ve Bursa ili örneği üzerinden bir değerlendirme. *Journal of Awareness*, 6(1), 1 – 11.
- Demir, A. K., Balas, C. E. ve Balas, L. (2024). Enhancing Türkiye’s renewable energy capacity: An advanced hybrid model for combined offshore wind and wave turbines design utilizing Hydrodynamic and Monte Carlo Simulations, *Journal of Coastal Research*, SI (113), 793 – 798.
- DNV (2014). *Offshore Standard Det Norske Veritas Dnv – Os – J101, Design Of Offshore Wind Turbine Structures*. Der Notske Veritas.
- DNV (2023). *Annual report 2023*. Der Notske Veritas.
- Doherty, P. ve Gavin, K. (2012). Laterally loaded monopile design for offshore wind farms. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers – Energy*, 165(1), 7 – 17.
- Douglas, C. A., Harrison, G. P. ve Chick, J. P. (2007). Life cycle assessment of the Seagen marine Current turbine. *ImechE Part M: Journal of Engineering for the Marine Environment*, 222, 1 – 12.
- Durap, A. ve Balas, C. E. (2024). Towards sustainable coastal management: a hybrid model for vulnerability and risk assessment. *Journal of Coastal Conservation*, 28(4), 66.

- Duru, B. (2003). *Kıyı politikası: kıyı yönetiminde bütünleşik yaklaşımlar ve ulusal kıyı politikası*. Ankara: Mülkiyeliler Birliği Vakfı Yayınları.
- EC DG MARE (2017). *2017 Annual Activity Report*. European Commission Directorate – General for Maritime Affairs and Fisheries.
- Ergin, A. ve Balas, C. E. (2006). Damage risk assessment of breakwaters under tsunami attack. *Natural Hazards*, 39, 231 – 243.
- Ergin, A. (2019). *Coastal Engineering* (Second Edition). Ankara: ODTÜ Geliştirme Vakfı Yayıncılık ve İletişim A. Ş.
- Eser, E., Balas, L., İnan, A. ve Yıldırım Fidanoğlu, P. (2024). Integrated modeling for the determination of typology and boundaries of coastal and transitional. *Journal of Coastal Research*, SI (113), 604 – 608.
- ESMAP (2020). *Going global: Expanding offshore wind to emerging markets*. Energy Sector Management Assistance Program.
- Frohboese, P. ve Schmuck, C. (2010). *Thrust coefficients used for estimation of wake effects for Fatigue load calculation*. European Wind Energy Conference’da sunuldu, Varşova.
- Glavovic, B. (2008). *Ocean and Coastal Governance for Sustainability: Imperatives for Integrating Ecology and Economics*, Chapters, in: Murray Patterson & Bruce Glavovic (ed.), *Ecological Economics of the Oceans and Coasts*, Edward Elgar Publishing: 14, 313-342, Florida: Edward Elgar Publishing.
- Hald, T., Morch, C., Jensen, L., LeBlanc Bakmar, C., ve Ahle, K. (2009). *Revisiting monopile design using py curves. Results from full scale measurements on Horns Rev*. European Offshore Wind Conference and Exhibiton’da sunuldu, Stockholm.
- Haldar, S., Sharma, J. ve Basu, D. (2019). *Probabilistic analysis of monopile-supported offshore wind turbine in clay*. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 105, 171 – 183.
- Hu, Q., Han, F., Prezzi, M. ve Salgado, R. (2021). Lateral load response of large-diameter monopiles in sand. *Géotechnique*, 72(12), 1035 – 1050.
- IEC (2019). *IEC – 61400 – 1, Wind energy generation systems - Part 1: Design requirements*. International Electrotechnical Commission.
- IOC (2006). *A Handbook for measuring the progress and outcomes of integrated coastal and ocean management, IOC. Manuals and guides*, Intergovernmental Oceanographic Commission.
- IOC (2009). *Marine Spatial Planning: A Step-by-Step Approach toward Ecosystem-based Management*. Intergovernmental Oceanographic Commission.

- İnan, A. ve Balas, L. (2010). *Numerical modelling of oil spill*. 5th IASME/WSEAS International Conference on Water Resources, Hydraulics and Hydrology/4th IASME/WSEAS International Conference on Geology and Seismology'de sunuldu, Cambridge.
- İnternet: WindArt 4.X URL – 1: <https://www.aselsan.com/tr/teknoloji/urun/3221/windart-4x>, Son Erişim Tarihi: 09/08/2024.
- İnternet: Yeşil ekonomi URL – 2: <https://www.aa.com.tr/tr/yesilhat/yesil-ekonomi/turkiyenin-ilk-deniz-ustu-ruzgar-santrali-icin-teknik-calismalar-2024te-baslayacak/1821998>, Son Erişim Tarihi: 11/08/2024.
- İnternet: Coastal zone management URL – 3: <https://www.unep.org/topics/ocean-seas-and-coasts/regional-seas-programme/coastal-zone-management>, Son Erişim Tarihi: 12/08/2024.
- İnternet: Hakkımızda URL – 4: <http://www.dured.org/>, Son Erişim Tarihi: 14/08/2024.
- İnternet: Coastal zone management URL – 5: <https://www.unep.org/topics/ocean-seas-and-coasts/regional-seas-programme/coastal-zone-management>, Son Erişim Tarihi: 15/08/2024.
- İnternet: Sürdürülebilir mavi ekonomi eylem planı URL – 6: <https://www.turkiyeyuzyili.com/proje-surdurulebilir-mavi-ekonomi-eylem-planı-mavi-plan>, Son Erişim Tarihi: 17/08/2024.
- İnternet: Investing in the Oceans—Accelerating the Blue Economy Through Market-Based Solutions URL – 7: <https://altasea.org/investing-in-the-oceans-accelerating-the-blue-economy-through-market-based-solutions/>, Son Erişim Tarihi: 19/08/2024.
- İnternet: Global Offshore Wind Report 2024 URL – 8: <https://gwec.net/global-offshore-wind-report-2024/>, Son Erişim Tarihi: 20/08/2024.
- İnternet: Denizcilik Genel Müdürlüğü ve DEHUKAM Arasında Mavi Ekonomi ve Deniz Saha Planlaması Projesi Protokolü İmzalandı URL – 9: <https://www.dehukam.org/2024/08/02/denizcilik-genel-mudurlugu-ve-dehukam-arasinda-mavi-ekonomi-ve-deniz-saha-planlamasi-projesi-protokolu-imzalandi/>, Son Erişim Tarihi: 20/08/2024.
- İnternet: Türkiye deniz üstü rüzgar potansiyeli yüksek 4 ülke arasında URL – 10: <https://www.trthaber.com/haber/ekonomi/turkiye-deniz-ustu-ruzgar-potansiyeli-yuksek-4-ulke-arasinda-669854.html>, Son Erişim Tarihi: 21/08/2024.
- İnternet: Ordu'da dünyanın en büyük dalga enerjisi santrali için baharda ilk kazma vurulacak URL – 11: <https://www.aa.com.tr/tr/ekonomi/orduda-dunyanin-en-buyuk-dalga-enerjisi-santrali-icin-baharda-ilk-kazma-vurulacak/2768016>, Son Erişim Tarihi : 22/08/2024.
- İnternet: Offshore Wind – Floating Wind URL – 12: <https://www.topcorr.com/projects/offshore-wind-floating-wind.html>, Son Erişim Tarihi: 22/08/2024.

İnternet: Hywind Tampen URL – 13: <https://www.equinor.com/energy/hywind-tampenl>, Son Erişim Tarihi: 12/01/2025.

İnternet: Hornsea 2 Offshore Wind Farm URL – 14: <https://orsted.co.uk/energy-solutions/offshore-wind/our-wind-farms/hornsea2>, Son Erişim Tarihi: 12/01/2025.

İnternet: Rüzgar enerji potansiyellerinin değerlendirilmesi URL – 15: <https://egesa.com.tr/blog/ruzgar-enerjisi-potansiyelinin-degerlendirilmesi#:~:text=Weibull%20da%C4%9F%C4%B1%C4%B1m%C4%B1%2C%20r%C3%BCzgar%20h%C4%B1z%C4%B1n%C4%B1n%20olas%C4%B1%C4%B1k,tahminleri%20i%C3%A7in%20temel%20bir%20ara%C3%A7t%C4%B1r>, Son Erişim Tarihi: 22/08/2024.

İnternet: Dalga kırılması URL – 16: <https://www.hydrotam.com/wave-refraction/#:~:text=DALGA%20KIRILMASI&text=Bu%20s%C3%BCre%C3%A7%20fiziksel%20limit%20olan,yak%C4%B1n%20oldu%C4%9Fu%20b%C3%B6lgede%20meydana%20gelir>, Son Erişim Tarihi: 24/08/2024.

İnternet: Wave devices URL – 17: <https://www.emec.org.uk/marine-energy/wave-devices/>, Son Erişim Tarihi: 26/08/2024.

İnternet: SeaGen Turbine, Northern Ireland, UK URL – 18: <https://www.power-technology.com/projects/strangford-lough/?cf-view>, Son Erişim Tarihi: 25/08/2024.

İnternet: Ocean Energy Systems., 2013. Development and testing of Marine Current Turbine's SeaGen 1.2MW tidal stream turbine UK URL – 19 <https://www.ocean-energy-systems.org/publications/icoe/icoe2010/document/develoment-and-testing-of-marine-current-turbinea-s-seagen-1.2mw-tidal-stream-turbine/>, Son Erişim Tarihi: 25/08/2024.

İnternet: What is Monte Carlo Simulation? URL – 20: <https://www.ibm.com/topics/monte-carlo-simulation>, Son Erişim Tarihi: 26/08/2024.

İnternet: Oracle Crystal Ball URL – 21: <https://oracle.com/my/middleware/technologies/crystalball/downloads.html>, Son Erişim Tarihi: 27/08/2024.

İnternet: PLAXIS 3D Geotechnical Engineering Software URL – 22: <https://www.bentley.com/software/plaxis-3d/>, Son Erişim Tarihi: 28/08/2024.

İnternet: Wind turbine design with superpowers URL – 23: <https://www.simis.io/#products>, Son Erişim Tarihi: 29/08/2024.

İnternet: HoWAT URL – 24: https://www.esru.strath.ac.uk/EandE/Web_sites/16-17/WindAndTidal/, Son Erişim Tarihi: 30/08/2024.

İnternet: Offshore wind power production cost drops 60% over last decade: Orsted URL – 25: <https://www.aa.com.tr/en/energy/wind/offshore-wind-power-production-cost-drops-60-over-last-decade-orsted/36713/>, Son Erişim Tarihi: 15/01/2024.

- İnternet: EPIAŞ, 2025 Ocak Ayı YEKDEM Fiyatlarını Yayınladı: Orsted URL – 26: <https://enerjiajansi.com.tr/yekdem-fiyatlari/>, Son Erişim Tarihi: 15/01/2024.
- Jardine, R., Chow, F. ve Overy, R. (2005). *ICP design methods for driven piles in sands and clays*. London: Thomas Telford.
- Jiang, Y., Zhou, X. ve Liu, Y. (2023). Simplified Calculation Method for the Natural Frequencies of the Offshore Wind Turbine Structures with Monopile Foundations Based on Euler–Bernoulli Beam Theory, *Advances in Civil Engineering*, Article ID 8262901.
- Jonkman, J., Butterfield, S., Musial, W. ve Scott, G. (2009). *Definition of a 5-MW Reference Wind Turbine for Offshore System Development, Technical Report*. NREL/TP – 500 – 38060.
- Jonkman, J. (2010). *Definition of the Floating System for Phase IV of OC3, Technical Report*. NREL/TP – 500 – 47535.
- Jostad, H. P., Haoyuan, L., Sivasithamparam, N. ve Ragni, R. (2022). Cyclic Capacity of Monopiles in Sand under Partially Drained Conditions: A Numerical Approach. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 149(2), 10435.
- Joubert, J. (2013). *Design and development of a novel wave Energy converter*, Doktora Tezi, Stellenbosch University, Stellenbosch.
- Justus, C. G. (1978). Wind energy statistics for large arrays of wind turbines (New England and Central U.S. Regions). *Solar Energy*, 20(5), 379 – 386.
- Kallehave, D., Leblanc, C. T. ve Liingaard, M. A. (2012). *Modification of the API p – y formulation of initial stiffness of the sand*. 7th International Conference on Offshore Site Investigations and Geotechnics’de sunuldu, Londra.
- Kaltekis, K., Panagoulas, S., van Dijk, B. F. J., Brinkgreve, R. B. J. ve Ramos da Silva, M. (2019). Comparative Concept Design Study of Laterally Loaded Monopiles. *IOP Conference Series: Journal of Physics: Conference Series*, 1222 (2019), 012027.
- Katsikogiannis, G. (2024). *Estimation of Long-Term Fatigue and Extreme Responses of Large-Diameter Monopiles for Offshore Wind Turbines*, Doktora Tezi, Norwegian University of Science and Technology Faculty of Engineering Department of Structural Engineering, Trondheim.
- Klinkvort, R. T. ve Hedeal, O. (2013). Lateral response of Monopile Supporting an offshore Wind turbine. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Geotechnical Engineering*, 166 (2), 147 – 158.
- Korçak, M. ve Balas, C. E. (2020). Reducing the probability for the collision of ships by changing the passage schedule in Istanbul Strait. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 48, 101593.
- Kurban, M., Kantar, Y.M. ve Hocaoglu F.O. (2007). Weibull dağılımı kullanılarak rüzgar hız ve güç yoğunluklarının istatistiksel analizi. *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 7, 205-218.

- Kurumahmut, A. ve Yayıcı, C. (2011). *Deniz Subayları için Temel Deniz Hukuku, Barış ve Savaş Dönemi*. İstanbul: Deniz Basımevi.
- Lande – Sudall, D., Stallard, T. ve Stansby, P. (2019). Co-located deployment of offshore wind turbines with tidal stream turbine arrays for improved cost of electricity generation. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 104, 492 – 503.
- Liang, J., Kato, B. ve Wang, Y. (2023). Constructing simplified models for dynamic analysis of monopile-supported offshore wind turbines. *Ocean Engineering*, 271, 113785.
- Liu, H.Y., Abell, J.A., Diambra, A. ve Pisano, F. (2019). Modelling the cyclic ratcheting of sands through memory – enhanced bounding surface plasticity. *Géotechnique*, 69 (9), 783 – 800.
- Liu, H. Y., Kementzetzidis, E., Abell, J. A. ve Pisano, F. (2021). From cyclic sand ratcheting to tilt accumulation of offshore monopiles 3D FE modelling using SANISAND – MS. *Géotechnique*, 72(9), 753 – 768.
- Liu, H. Y. ve Kaynia, A. M. (2022). Monopile responses to monotonic and cyclic loading in undrained sand using 3D FE with SANISAND-MSu. *Water Science and Engineering*, 15(1), 69 – 77.
- Loken, I. B. (2017). *Dynamic Response and Fatigue of Offshore Wind Turbines - Effect of Foundation Type and Modelling Method Using Software FAST*, Yüksek Lisans Tezi, Norwegian University of Science and Technology Faculty of Engineering Department of Structural Engineering, Trondheim.
- Loken, I. B. ve Kaynia, A. M. (2019). Effect of foundation type and modelling on dynamic response and fatigue of offshore wind turbines. *Wind Energy*, 22, 1667 – 1683.
- Lombardi D., Bhattacharya S. ve Muir Wood D. (2013). Dynamic soil–structure interaction of monopile supported wind turbines in cohesive soil. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 49, 165 – 180.
- Luo, R., Yang, M. ve Li, W. (2018). Numerical study of diameter effect on accumulated deformation of laterally loaded monopiles in sand. *European Journal of Environmental Civil Engineering*, 24(14), 2440 – 2452.
- MacCamy, R. C. ve Fuchs, R. A. (1954). *Wave forces on piles: A diffraction theory*, Technical Memorandum No. 69. Beach Erosion Board Corps of Engineers.
- Mann, J. (1994). The spatial structure of neutral atmospheric surface – layer Turbulence. *Journal of Fluid Mechanics*, 273, 141 – 168.
- Manwell, J. F., McGowan, J. G. ve Rogers, A. L. (2009). *Wind Energy Explained: Theory, Design and Application* (2nd Edition), Chippingham: John Wiley & Sons, Ltd.
- McAdam, R. A., Bryne, B. W., Houlsby, G. T., Beuckelaers, W. J. A. P., Burd, H. J., Gavin, K. G., Igoe, D. J. P., Jardine, R. J., ve Martin, C. M. (2020). Monotonic laterally loaded pile testing in an dense marine sand at Dunkirk. *Géotechnique*, 70(11), 986 – 998.

- Mehta, M., Zaaier, M., ve von Terzi, D. (2024). Drivers for optimum sizing of wind turbines for offshore wind farms. *Wind Energy Science*, 9(1), 141-163.
- Minga, E. ve Burd, H. (2019). *Validation of the PLAXIS MoDeTo 1D model for dense sand*. PLAXIS MoDeTo report.
- Mitchell, J. K. ve Soga, K. (2005). *Fundamentals of soil behavior* (Third Edition), ABD: John Wiley & Sons.
- Morf, A., Pohja – Mykra, M. ve Volosina, M. (2019). *Integrating Land – Sea Interactions into MSP, Lessons, stories insights from MSP in the Central Baltic*, 3rd Baltic Marine Spatial Planning Forum'da sunuldu, Riga.
- Morison, J. R., O'Brien, M. D., Johnson, J. W. ve Schaaf, S. A. (1950). The force exerted by surface wave on piles. *Petrol Trans AIME*, 189.
- Muratoğlu, A. ve Yüce, M. İ. (2015). *Alternatif bir enerji üretim yöntemi olarak hidrokinetik enerji türbinleri*, 4. Su yapıları sempozyumu'nda sunuldu, Antalya.
- Murphy, G., Igoe, D., Doherty, P. ve Gavin, K. (2018). 3D FEM approach for laterally loaded monopile design. *Computers and Geotechnics*, 100, 76 – 83.
- Nasab, N. M., Kilby, J. ve Bakhtiaryfard, L. (2022). Design of Monopile Foundations for Offshore Wind and Tidal Turbine Structures. *Water*, 14, 3555.
- Nigitha, D., Rathod, D. ve Krishnanunmi, K. T. (2021). Analysis of a Monopile Under Two – Way Cyclic Loading, *International Journal of Geotechnical Earthquake Engineering*, 12(2), 42 – 61.
- Numanoğlu Genç, A., İnan, A., Yılmaz, N. ve Balas, L. (2013). Modeling of Erosion at Göksu Coasts. *Journal of Coastal Research*, 65(SP2), 2155 – 2160.
- OCDI (2002). *Technical Standarts and Commentaries for Port and Harbour Facilities in Japan*. The Overseas Coastal Area Development Institute of Japan.
- Orakçı, O., Huvaj, N., François, S., ve Anoyatis, G. (2023). Probability of unsatisfactory performance of monopile foundations for offshore wind turbines considering variations in seabed properties. *Ocean Engineering*, 277, 114335.
- OREC (2019). *Guide to an offshore wind farm, Updated and extended*. Offshore Renewable Energy Catapult.
- Önöz, B. (2013). *Dalga enerjisi*, İstanbul Teknik Üniversitesi Temiz Enerji Günlerinde sunuldu, İstanbul.
- Özhan, E. ve Abdalla, S. (2002). *Türkiye kıyıları rüzgar ve derin deniz dalga atlası*, Ankara: MEDCOAST.
- Özügül, M., D. ve Yerliyurt, B. (2017). Evaluation of Integrated Coastal Zone Management plan practices in the Turkish Case. *IOP Conference Series Materials Science and Engineering*, 245 (6), 062032.

- Panagoulas, S., Brinkgreve, R. B. J., Minga, E., Burd, H. J. ve McAdam, R. A. (2018). *Application of the PISA framework to the design of offshore wind turbine monopile foundations*, WindEurope 2018 Conference'de sunuldu, Hamburg.
- Passon, P. (2006). OC3 memo from SWE, Memorandum: Derivation and Description of the Soil-Pile Interaction Models. *IEA – Annex XXIII Subtask*, 2.
- PIANC (1994). *Floating breakwaters, a practical guide for design and construction*, World Association for Waterborne Transport Infrastructure.
- PLAXIS (2018). *PLAXIS MoDeTo Manual*, Bentley.
- PLAXIS (2023). *PLAXIS 3D 2023.2; Scientific Manual 3D*, Bentley.
- Poulos, H. G. ve Davis, E. H. (1980). *Pile foundation analysis and design*, Canada: Rainbow – Bridge Book Co.
- Psaroudakis, E., Mylonakis, G. ve Klimis, N. (2021). Non-linear Analysis of Laterally Loaded Piles Using "p-y" Curves. *Geotechnical and Geological Engineering*, 39(2), 1541 – 1556.
- Ramieri, E., Bocci, M., ve Markovic, M. (2019). *Linking Integrated Coastal Zone Management to Maritime Spatial Planning: The Mediterranean Experience*. In: Zaucha, J., Gee, K. (eds) *Maritime Spatial Planning*. Cham: Palgrave Macmillan, 271 – 284.
- Reale, C., Tott – Buswell, J. ve Prendergast, L. (2021). Impact of geotechnical uncertainty on the preliminary design of monopiles supporting offshore wind turbines. *ASCE-ASME Journal of Risk and Uncertainty in Engineering Systems Part B: Mechanical Engineering*, 7(4), 040903.
- Reese, L., C. (1997). Analysis of Laterally Loaded Piles in Weak Rock. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 123(11), 1010 – 1017.
- Sağlam, M. ve Uyar, T. D. (2005). Dalga enerjisi ve Türkiye'nin dalga enerjisi teknik potansiyeli. *Elektrik Mühendisleri Odası Dergisi*, 19, 2020 – 2024.
- Samso, R., Crespin, J., Garcia – Olivares, A. ve Sole, J. (2023). *Examining the potential of marine Renewable Energy: A net Energy perspective*. *Sustainability*, 15, 8050.
- Shahulhameed, B., Gopinath, A. S., Jishor, E. K., Thangavelu, R., Koyyala, K. K. ve Dilba, R. K. (2024). *Feasibility Analysis of Green Hydrogen Generation from Offshore Energy Resources*, In: Phillips, M.R. Al – Naemi, S. ve Duarte, C.M. (eds.), *Coastlines under Global Change: Proceedings from the International Coastal Symposium (ICS) 2024 (Doha, Qatar)*. *Journal of Coastal Research*, Special Issue No. 113, 971 – 975, Charlotte.
- Shi, Y., Yao, W. ve Jiang, M. (2023). Dynamic analysis on monopile supported offshore wind turbine under wave and wind load. *Structures*, 47(12), 520 – 529.

- Sjoukes, J. (2013). *Theoretical performance of the Yeti – System, Converting wave Energy*, Yüksek Lisans Tezi, Department of Offshore Engineering, Delft University of Technology, Delft.
- Sorensen, S., P. H., Ibsen, L. B. ve Augustesen, A. H. (2010). *Effects on diameter on initial stiffness of p – y curves for large diameter piles in sand*. Conference on Numerical Methods in Geotechnical Engineering’de sunuldu, Londra.
- Stäblein, A. R. (2016). *Analysis and design of bend-twist coupled wind turbine blades*. In W. Ostachowicz, M. McGugan, J.-U. Schröder-Hinrichs and M. Luczak (Eds.), MARE-WINT. New Materials and Reliability in Offshore Wind Turbine Technology, 67-80.
- Söylemez, E., Çakır, Ö., Gökalp, T. ve Nal, S. (2018). *Türkiye’de Bütünleşik Kıyı Alanları Yönetimi ve Planlaması Yaklaşımında Yaşanan Değişim Süreci ve Sonuçları Açısından Bir Değerlendirme*, İnşaat Mühendisleri Odası 9. Kıyı Mühendisliği Sempozyumu’nda sunuldu, Adana.
- Şahin, M. E. (2020). Açık Deniz Rüzgar Sistemleri Üzerine Bir İnceleme ve Danimarka Modeli. *Recep Tayyip Erdoğan Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 1(1), 54 – 67.
- Şentürk, E. (2019). *Kıyı alanları planlaması bağlamında bütünleşik kıyı alanları yönetimi planlaması: İzmit Körfezi (Kocaeli – Yalova) bütünleşik kıyı alanları planı örneği*, Yüksek Lisans Tezi, Mimar Sinan Güzel Sanatlar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Terzaghi, K. (1955). Evaluation of coefficients of subgrade reaction. *Géotechnique*, 5(4), 297 – 326.
- Thielen, K., Achmus, M., Lemke, K. ve Terceros, M. (2015). Evaluation of p-y Approaches for Large-Diameter Monopiles in Sand. *International Journal of Offshore and Polar Engineering*, 25 (2), 134 – 144.
- Timoshenko, S. (1937). *Vibration problems in Engineering* (Second Edition), New York: D. Van Nostrand Company.
- Toluner, S. (1996). *Milletlerarası hukuk dersleri*, İstanbul: Beta Basım Yayınevi.
- Trojan, K. (2024). New hybrid foundation solutions for offshore wind turbines. *Archives of Civil Engineering*, 70(1), 5 – 18.
- Türkiye Cumhuriyeti Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı (2022). *Türkiye Ulusal Enerji Planı, 2022*. Türkiye Cumhuriyeti Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı.
- Uğurlu, A. ve Balas, C. E. (2024). Assessment of single-layer armor units in breakwater design under climate change: In-depth case analysis of Rize-Artvin airport breakwater. *Journal of Coastal Research*, SI (113), 660 – 664.
- UNEP/MAP/PAP (2008). *Protocol on Integrated Coastal Zone Management in the Mediterranean*. Split: Priority Actions Programme.

- Uygur, İ., Demirci, R., Saruhan, H., Özkan, A. ve Belenli, İ. (2006). Batı Karadeniz bölgesindeki dalga enerji potansiyelinin araştırılması. *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 12(1), 7 – 13.
- Wang, H., Lehane, B. M., Bransby, M. F., Wang, L. Z., Hong, Y. ve Askerinejad, A. (2023). Lateral behavior of monopiles in sand under monotonic loading: Insights and a new simple design model. *Ocean Engineering*, 277, 114334.
- Wiemann, J., Lesny, K. and Richwien, W. (2004). *Evaluation of pile diameter effects on soil – pile stiffness*, 7th German Wind Energy Conference’da sunuldu, Berlin.
- Wilkie, D. (2020). *Advancing probabilistic risk assessment of offshore wind turbines on monopiles*, Doktora Tezi, Department of Civil, Environmental and Geomatic Engineering University College London, London.
- Williams, A. T., Davies, P., Ergin, A., ve Balas, C. E. (1998). Coastal Recession and the Reliability of Planned Responses: Colhuw Beach, the Glamorgan Heritage Coast, Wales, UK. *Journal of Coastal Research*, 26 (SI), 72–81.
- Williams, S. A., Pelecanos, L. ve Darby, A. P. (2022). A Winkler model of monopile ratcheting under long-term dynamic cyclic loading. *Ocean Engineering*, 266(1), 112625.
- WFO (2024). *Global offshore Wind report 2023*, World Forum Offshore Wind.
- Yang, S., Deng, X. ve Yang, J. (2022). Modeling of soil-pile-structure interaction for dynamic response of standalone wind turbine. *Renewable Energy*, 186, 394 – 410.
- Yaycı, C. (2022). *Mavi Vatan “Bir Harita ve Bir Doktrin Kitabı”*, İstanbul: İstanbul Üniversitesi Yayınevi.
- Yeter, B., Garbatov, Y. ve Guedes Soares, C. (2019). Uncertainty analysis of soil-pile interactions of monopile offshore wind turbine support Structures. *Applied Ocean Research*, 82, 74 – 88.
- Yıldırım, B. (2022). *Hydrodynamic analysis of floating offshore wind turbine concepts: A case study in Black Sea*, Yüksek Lisans Tezi, Middle East Technical University, Graduate School of Natural and Applied Sciences, Ankara.
- Yıldırım Fidanoğlu, P., Cebe, K. ve Balas, L. (2024). Exploring coastal ecosystem biodiversity in a Mediterranean hotspot: Marmaris Bay, Türkiye. *Journal of Coastal Research*, SI (113), 896 – 900.
- Yılmaz Şimşek, Z. (2024). Bütünleşik kıyı alanları yönetimi (BKAY) modelinin Van Gölü kıyılarına uygulanabilirliği. *The Journal of Social Sciences*, 68, 186 – 203.
- Zaaijer, M. B. (2006). Foundation modelling to assess dynamic behaviour of offshore wind turbines. *Applied Ocean Research*, 28, 45 – 57.
- Zania V. (2014). Natural vibration frequency and damping of slender structures founded on monopiles. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 59, 8 – 20.

- Zdravkovic, L., Taborda, D. M. G., Potts, D., Jardine, R., Sideri, M., Schroeder, F., Byrne, B., McAdam, R., Burd, H., Houlsby, G. T., Martin, C., Gavin, K., Doherty, P., Igoe, D., Wood, A., Kallehave, D., ve Gretlund, J. (2015). *Numerical modelling of large diameter piles under lateral loading for offshore wind applications*. Third International Symposium on Frontiers in Offshore Geotechnics (ISFOG 2015)'de sunuldu, Oslo.
- Zdravkovic, L., Jardine, R. J., Taborda, D. M. G., Abadías, D., Burd, H. J., Bryne, B. W., Gavin, K. G., Houlsby, G. T., Igoe, D. J. P., Tingfa, L., Martin, C. M., McAdam, R. A., Wood, A. M., Potts, D. M., Skov Gretlund, J. ve Ushev, E. (2020). Ground characterisation for PISA pile testing and analysis. *Géotechnique*, 70 (11), 945 – 960.







EK-1. Görünür sabitlik yöntemiyle uzatılmış tekil kazığın Ashes ortamındaki kodu

```
# This support section file was exported with documentation and placeholders.
# To export without documentation and placeholders, go to 'Preferences/Export settings'
# and turn off 'Include documentation/comments and placeholder text'.

# This text file represents a support section that can be imported into Ashes.
# The file has three kinds of lines (content):
# 1) Keyword lines: Lines with a keyword.
# 2) Parameter values lines: Lines with multiple parameter values (numbers and/or text)
# 3) Comments lines.

# KEYWORDS:
# Lines with parameter values must be preceded with a line consisting of only a predefined
# keyword to recognize what the parameter values below represent.
# Keywords are case insensitive as well as whitespace insensitive, i.e. a keyword can
# contain whitespace such as 'Circular hollow cross sections' (so, 'keysting' might be a more
# accurate term).
# The keywords are:
# 'All sensors', 'Angle cross sections', 'Beam end fatigue sensors', 'Circular hollow cross
# sections',
# 'Circular shape cross sections', 'Circular solid cross sections', 'Damping loads', 'H cross
# sections', 'Joints',
# 'Materials', 'Mooring lines', 'Members', 'Name', 'Nodes', 'Nonlinear springs', 'Orientation',
# 'Rectangular hollow cross sections', 'Rectangular shape cross sections', 'Rectangular solid
# cross sections', 'RNA nodes',
# 'Slave nodes', 'Springs', 'Substructure node', 'Supports', 'Table', 'Transforms', 'Tubular joint
# fatigue sensors',
# 'Tubular tower nodes'

# LINES WITH PARAMETER VALUES:
# After a keyword has been recognized on a line the parameter lines should follow directly
# below.
```

EK-1. (devam) Görünür sabitlik yöntemiyle uzatılmış tekil kazığın Ashes ortamındaki kodu

There can be comments between the keyword line and the parameter values, but no blank lines.

Immediately above the parameter lines there is typically a comment line with column titles and units.

The parameter lines are read consecutively until an empty line is found.

COMMENTS:

Lines that start with '#'(such as this one and the next) are comments and thus the content is not read.

They are primarily used to help getting the formatting of the data right.

Comments lines can be inserted/added anywhere.

About Name

The given name appears on the support section that is based on this file.

Name

Monopile

About Orientation

Defines how to position and orient the structure when it is imported.

#

A zero rotation will align the axes in the Ashes standard coordinate system; with y

pointing upwind and z pointing up. One method of oriented can be chosen among the following # two::

- Heading: You specify the heading of the y axis (the forward direction) relative to north.

A typical case: if you want the structure to have a heading 30 degrees towards the east, enter:

Heading 30

#

- Angles: You can specify up to three angles, one for rotation about each axis.

EK-1. (devam) Görünür sabitlik yöntemiyle uzatılmış tekil kazığın Ashes ortamındaki kodu

```
# Each angle represents a right-handed rotation about the axes, in the following order:
# x (roll), y (pitch), z (yaw). The angles are hence Euler angles. Rotations are intrinsic,
# which means that successive rotations are performed about the previously rotated axes.
# To reproduce the previous example where the structure is oriented 30 degrees towards the
east, enter:
```

```
# Angles 0 0 30
```

Orientation

Heading 0

```
# About Tubular tower nodes
# A non-tubular tower support section (such as a floater or a monopile) can have one or
more tubular towers that are put on top of it.
# A support section with one or more tubular towers on top is typically called substructure.
# In this section, you can specify which nodes have a tubular tower on top.
# For example, for an RNA connected to the node with the name '10', enter 10.
# (the node name is alpha-numeric without white space).
```

Tubular tower nodes

```
# Node name
```

```
Tubular_tower_node
```

```
# About Materials
```

```
# For each material line, the name, elastic modulus (Young's modulus), Poisson's ratio, and
density must be given.
```

```
# The name of a material must be unique - and the names are used for the cross sections.
```

```
# The damping method implemented is the stiffness part of Rayleigh damping (also called
proportional damping).
```

```
# The mass part of Rayleigh damping is not yet implemented.
```

```
# When a material is defined by the user (you) in the Material tool, the damping ratio (ksi)
at a particular frequency are given.
```

EK-1. (devam) Görünür sabitlik yöntemiyle uzatılmış tekil kazığın Ashes ortamındaki kodu

The lambda coefficient is calculated as: $\lambda = 2 \cdot \text{damping ratio} / \text{frequency}$, with frequency as rad/s.

In the Materials tool, however, you can specify the frequency as [Hz]

Materials

# Name	Elastic modulus (Pa)	Poisson's ratio (-)	Density (kg/m ³)
--------	----------------------	---------------------	------------------------------

Steel	2.1e+11	0.3	7850
-------	---------	-----	------

AF	5.43e+11	0.3	7850
----	----------	-----	------

About cross sections.

There are 2 categories of cross sections:

#

Category 1:

Circular and rectangular shaped cross sections that can be loaded with aero- and hydrodynamical loads.

Five kinds of such cross sections can be imported/exported, each with their own keyword:

'Circular hollow cross sections', 'Circular solid cross sections', 'Circular shape cross sections',

'Rectangular hollow cross sections', 'Rectangular solid cross sections', and 'Rectangular shape cross sections'.

The different kinds have mandatory parameters given first in each line for their name, respective geometry.

Then, either material or explicit stiffness and mass.

Additionally, the cross sections have some parameters that are optional and are given after the mandatory parameters.

Optional parameters: 'Growth density', 'Growth thickness', 'Filling density', 'Filling portion', 'Aero drag coef.',

'Hydro drag coef.', 'Hydro inertia coef.', 'Heave plate drag coef.', 'Heave plate inertia coef.', 'Has heave plate FK forces?', 'Buoyancy tuning factor'.

Rectangular shapes have coefficients for two directions (height and width).

#

EK-1. (devam) Görünür sabitlik yöntemiyle uzatılmış tekil kazığın Ashes ortamındaki kodu

Category 2:

Standardized cross sections (typically documented in tables). These can not be loaded with aero- and hydrodynamical loading.

Two kinds of cross sections can be imported/exported, each with their own keyword:

'H cross sections', 'Angle cross sections'.

As category 1, they have mandatory parametes for their name, respective geometry, and material.

Then, optionally, explicit stiffnesses can be given (typically found in aformentioned tables), in which case these

explicit values are used. If they are not given, then the geometry is used to calculate stiffness.

For a cross section that is not doubly symmetric, the explicit stiffnesses can either be given for the

geometric axes or for the principal axes. The choice is made by the 'Axes' parameter that can be either 'Geometry' or 'Principal'.

The default values are given in the title line.

Circular hollow cross sections

# Name	Diameter(m)	Thickness(m)	Material	[Growth density (kg/m ³) = 0]							
				[Growth thickness (m) = 0]		[Aero drag coef. (-) = 0]		[Hydro drag coef. (-) = 0]			
				[Hydro inertia coef. = 0]		[Heave plate drag coef. (-) = 0]		[Heave plate inertia coef. (-) = 0]		[Has heave plate FK forces? (-) = 0]	
								[Buoyancy tuning factor (-) = 1.0]			
CH_8.300x0.090	8.3	0.09	Steel	0	0	1	1.2	1.63	0	0	
	0	1									
CS2	8.3	0.09	AF	0	0	1	1	2	0	0	1

Circular shape cross sections

# Name	Diameter(m)	Mass (kg/m)	EI (Nm ²)	GJ (Nm ²)	EA	(N)
			[Growth density (kg/m ³) = 0]	[Growth thickness (m) = 0]	[Aero drag coef.	

EK-1. (devam) Görünür sabitlik yöntemiyle uzatılmış tekil kazığın Ashes ortamındaki kodu

(-) = 0] [Hydro drag coef. (-) = 0] [Hydro inertia coef. = 0] [Heave plate drag coef. (-) = 0] [Heave plate inertia coef. (-) = 0] [Has heave plate FK forces? (-) = 0] [Buoyancy tuning factor (-) = 1.0]

(no cross sections used of this type used - can be added here following the pattern above.)

Circular solid cross sections

Name Diameter(m) Material [Growth density (kg/m³) = 0] [Growth thickness (m) = 0] [Aero drag coef. (-) = 0] [Hydro drag coef. (-) = 0] [Hydro inertia coef. = 0] [Heave plate drag coef. (-) = 0] [Heave plate inertia coef. (-) = 0] [Has heave plate FK forces? (-) = 0] [Buoyancy tuning factor (-) = 1.0]

(no cross sections used of this type used - can be added here following the pattern above.)

Rectangular hollow cross sections

Name Height(m) Width(m) Thickness(m) Material [Growth density (kg/m³) = 0] [Growth thickness (m) = 0] [Aero drag coef., height (-) = 0] [Aero drag coef., width (-) = 0] [Hydro drag coef. height (-) = 0] [Hydro drag coef. width (-) = 0] [Hydro inertia coef., height (-) = 0] [Hydro mass coef., width (-) = 0] [Heave plate drag coef. (-) = 0] [Heave plate inertia coef. (-) = 0] [Has heave plate FK forces? (-) = 0] [Buoyancy tuning factor (-) = 1.0]

(no cross sections used of this type used - can be added here following the pattern above.)

Rectangular solid cross sections

Name Height(m) Width(m) Material [Growth density (kg/m³) = 0] [Growth thickness (m) = 0] [Aero drag coef., height (-) = 0] [Aero drag coef., width (-) = 0] [Hydro drag coef. height (-) = 0] [Hydro drag coef. width (-) = 0] [Hydro inertia coef., height (-) = 0] [Hydro mass coef., width (-) = 0] [Heave plate drag coef. (-) = 0] [Heave plate inertia coef. (-) = 0] [Has heave plate FK forces? (-) = 0] [Buoyancy tuning factor (-) = 1.0]

(no cross sections used of this type used - can be added here following the pattern above.)

EK-1. (devam) Görünür sabitlik yöntemiyle uzatılmış tekil kazığın Ashes ortamındaki kodu

Rectangular shape cross sections

```
# Name      Height (m)   Width (m)   Mass (kg/m)  EI1st (Nm^2) EI2nd (Nm^2)
              GJ (Nm^2)   EA (N)      [GAs,1st (N)] [GAs,2nd (N)] [S_offset,1st (m)=0]
              [S_offset,2nd=0] (m) [m_offset,1st (m)=] [m_offset,2nd (m)]=0 [Growth
density (kg/m^3) = 0] [Growth thickness (m) = 0] [Aero drag coef., height (-) = 0]
              [Aero drag coef., width (-) = 0] [Hydro drag coef. height (-) = 0] [Hydro
drag coef. width (-) = 0] [Hydro inertia coef., height (-) = 0] [Hydro mass coef., width
(-) = 0] [Heave plate drag coef. (-) = 0] [Heave plate inertia coef. (-) = 0]
              [Has heave plate FK forces? (-) = 0] [Buoyancy tuning factor (-) = 1.0]
# (no cross sections used of this type used - can be added here following the pattern above.)
```

H cross sections

```
# Name      Height(m)   Flange width(m)   Web thickness(m)   Flange
thickness(m) Material   [Area(m^2)] [I1(m^4)] [I2(m^4)] [Ixy(m^4)]
# (no cross sections used of this type used - can be added here following the pattern above.)
```

Angle cross sections

```
# Name      Length 1st leg(m)   Length 2nd leg(m)   Thickness(m) Material
              [Axes] [e1st (m)] [e2nd (m)] [Area(m^2)] [I1(m^4)] [I2(m^4)]
              [Ixy(m^4) or alpha(deg)]
# (no cross sections used of this type used - can be added here following the pattern above.)
```

About All sensors

This line is used to choose sensors set for all parts of a particular category.

All sensors

```
# [All element sensors = 0] [All node sensors = 0] [All node loads sensors = 0]
[All node fluid kinematic sensors = 0] [All support sensors = 0] [All linear
spring sensors = 0] [All nonlinear spring sensors = 0]
0 0 0 0 0
```

About Nodes

EK-1. (devam) Görünür sabitlik yöntemiyle uzatılmış tekil kazığın Ashes ortamındaki kodu

The node names can be arbitrary alpha-numeric strings without white space.
 # When exporting a support section, nodes are given increasing integers as names, starting with 1.
 # The last column [Point mass (kg) = 0] contains point mass for the node in question.
 # Point mass is optional with a default value of 0. It can be used to define ballast on a floater.

Nodes

```
# Node name  x (m)  y (m)  z (m)  [Point mass (kg) = 0] [Rot. point inertia, x (kg m^2) = 0]
[Rot. point inertia, y (kg m^2) = 0] [Rot. point inertia, z (kg m^2) = 0] [Node
sensor = 0] [Node loads sensor = 0] [Node fluid kinematic sensor = 0]
Tubular_tower_node 0.000000 0.000000 8.190000 0 0 0 0
0 0 0
1 0.000000 0.000000 5.000000 0 0 0 0 0
0
2 0.000000 0.000000 0.000000 0 0 0 0 0
0
3 0.000000 0.000000 -5.000000 0 0 0 0 0
0
4 0.000000 0.000000 -10.000000 0 0 0 0 0
0
5 0.000000 0.000000 -15.000000 0 0 0 0 0
0
Mudline 0.000000 0.000000 -30.000000 0 0 0 0 1
0 0
7 0.000000 0.000000 -37.000000 0 0 0 0 0
0
7m 0.000000 0.000000 -46.000000 0 0 0 0 1 0
0
8 0.000000 0.000000 -55.000000 0 0 0 0 0 0
0
9 0.000000 0.000000 -60.500000 0 0 0 0 0 0
0
```

EK-1. (devam) Görünür sabitlik yöntemiyle uzatılmış tekil kazığın Ashes ortamındaki kodu

About Slave nodes:

Slave nodes are typically used to create hinges. If a member is connected to a node by a hinge

then the member's start or end node should be a slave node of the (master) node in question.

Parameters:

Slave node name: The name of the slave node to be created. Cannot be the same as the name of a node (master or slave) already created.

Master node name: The name of the master node. Must be the name of an existing regular (master) node.

Slave nodes

Slave node name Master node name

About Members

Members are straight (structural) parts (beams, columns etc) of the support section with the same cross section.

A member is divided in 1 or more elements (in the FEM sense)

Initial rotation ([Init rot. [deg] = 0]) The initial rotation of the principal axes referenced to the default rotation. Given in degrees.

Default rotation: The 2nd principal axis (blue) is horizontal, thus, the 1st (green) has the max gradient upwards (or downwards).

Members

Member name Start node End node Cross section [Num. of elements = 1]
 [Initial rotation (deg) = 0] [Filling density (kg/m³) = 0] [Filling portion(-)
) = 1] [Beam Sensor = 0]

1 Tubular_tower_node 1 CH_8.300x0.090 1 0 0 1 0

2 1 2 CH_8.300x0.090 1 0 0 1 0

MSL 2 3 CH_8.300x0.090 1 0 0 1 1

4 3 4 CH_8.300x0.090 1 0 0 1 0

Halfway 4 5 CH_8.300x0.090 1 0 0 1 1

EK-1. (devam) Görünür sabitlik yöntemiyle uzatılmış tekil kazığın Ashes ortamındaki kodu

6	5	Mudline	CH_8.300x0.090	1	0	0	1	0
Mudline	Mudline	7	CS2	1	0	0	1	1
7m	7	7m	CS2	1	0	0	1	1
8	7m	8	CS2	1	0	0	1	0
9	8	9	CS2	1	0	0	1	0
10	9	10	CS2	1	0	0	1	0

About Supports

Type can be:

"Fixed" - translations and rotations constrained

"Pinned" - translation constrained, rotations free

Supports

Name Type Node name [Sensor = 0]

1 Fixed 10 0

About Springs

Linear springs with the given stiffness in global coordinates.

Name: Each support must have a locally unique name.

Type can be:

"Spring" - a linear translational spring with the given stiffness in global coordinates.

"RotationalSpring" - a linear rotational spring with the given stiffness about global axes.

(note: nonlinear (translational) springs are given in the 'Nonlinear springs' section.)

Node name: The node that the support is connected to. The name must be given in the node list.

Stiffness: The stiffnesses of the spring given in global coordinates.

IsPy?: This parameter does not influence the simulation results, but is used to keep track of

which springs that are Py springs (i.e. geotech. springs). Optional parameter. Default value: 0 (i.e. NOT a Py spring).

Springs

EK-1. (devam) Görünür sabitlik yöntemiyle uzatılmış tekil kazığın Ashes ortamındaki kodu

# Name	Type	Node name	Stiffness x-dir (N/m or Nm/rad)	Stiffness	y-dir.
		Stiffness z-dir.	[IsPy? = 0 (-)]	[Sensor = 0]	

About Nonlinear (translational) springs

Nonlinear translational springs with the given direction in global coordinates and where the stiffness relation is given in

a table in the Table section.

Name: Each support must have a locally unique name.

Type - Can be either:

"Spring" - a translational spring with the given direction.

"RotationalSpring" - a rotational spring with the given direction.

Direction: The direction of the nonlinear spring given in global coordinates. For a rotational spring, this is the direction of the spring's axis.

Stiffness table name: The name of the table giving the (nonlinear) stiffness curve.

The table must be given in the table section of this file (keyword: Table).

IsPy?: This parameter does not influence the simulation results, but is used to keep track of

which springs that are Py springs (i.e. geotech. springs). Optional parameter. Default value: 0 (i.e. NOT a Py spring).

Nonlinear springs

# Name	Type	Node name	x-direction (m)	y-direction (m).	z-
direction (m)	Stiffness table name	[IsPy? = 0 (-)]	[Sensor = 0]		

About Damping loads

Damping can be implemented as (nonlinear) loads.

The damping factor is multiplied with the velocity of the node in question to give a damping load

in the opposite direction.

Damping loads

Node name Damping factor (Ns/m)

EK-1. (devam) Görünür sabitlik yöntemiyle uzatılmış tekil kazığın Ashes ortamındaki kodu

About Beam end fatigue sensors

Beams (or rather beam ends) can have two kind of sensors - a 'normal' sensor and a fatigue sensor.

They can both be set in the beam element window in the GUI.

However, when exporting a beam element with a 'normal' and/or fatigue sensor,

the normal sensor is included in the beam element section,

whereas the fatigue sensor is included in this section.

This is because the fatigue sensor has quite a few parameters.

The second column is the node option (the alternatives are: 'i', 'j').

The third column is the stress range filter in [MPa].

The fourth column is the SN collection name (one of: 'EurocodeEN1993', 'DNV-C203-seawatercathodicprotection', 'DNV-C203-air').

The fifth column is all the stress point triplets in one string. The triplets are divided by the character '#'.
Note: it is possible to have multiple triplets for the same angle

(e.g. to compare fatigue life for different SN categories).

(e.g. to compare fatigue life for different SN categories).

Beam end fatigue sensors

# Beam element name	SN collection	SN-curve	Stress filter	Node	option
Stress point(s)	SCF(s)				

The exported support section had no beam end fatigue sensors. To import beam end fatigue sensors, add them here.

About Tubular joint fatigue sensors

Fatigue analysis of tubular joints are different from beam end fatigue.

MORE DOC TO BE ADDED.

Tubular joint fatigue sensors

# Beam element name	SN collection	SN-curve	Stress filter	Local joint name
Side				

EK-1. (devam) Görünür sabitlik yöntemiyle uzatılmış tekil kazığın Ashes ortamındaki kodu

The exported support section had no tubular joint fatigue sensors. To import tubular joint fatigue sensors, add them here.

About Joints

Joints are not required, but have to be defined to add joint fatigue sensors (keyword: 'Tubular joint fatigue sensors').

The 'Joint name' column (first column) is the joint local name and must be: 1) An alpha-numeric string,

2. Unique for this support section (file), and 3. Cannot contain whitespace.

The 'Chord elements' column is a list of element local names that constitute the chord of the joint.

There must be 1 or 2 chord elements.

The 'Brace elements' column is a list of element local names that constitute the braces of the joint.

There is 1 element per brace.

The '[Hard coded SCFs]' column is optional. If it is used it must have 4 strictly positive scalars.

The list (string) of chord or brace element names and SCFs cannot have white space and the elements are divided by the character: '&'.

The element local names for chords and braces must be defined in this file in the members sections (keyword: 'Members').

Joints

# Joint name	Chord elements	Brace elements	[Hard coded SCFs]
--------------	----------------	----------------	-------------------

The exported support section had no joints. To import joints, add them here.

About Transforms

The support section structure can be scaled, translated or rotated by defining one or more transformations.

EK-1. (devam) Görünür sabitlik yöntemiyle uzatılmış tekil kazığın Ashes ortamındaki kodu

```
# Valid transforms are scale, translate and rotate. The transformations will be applied in the
order specified.
# Note that if this structure is imported onto another structure, translations will be ignored,
# since the structure will be connected to the existing one.
# Examples
# Translate structure [dx, dy, dz]
# Translate 10 20 30
# Rotate structure 90 deg around x axis at node 10. If no Node parameter is given,
# the rotation will be performed around the global origin.
# Rotate 90 0 0 Node 10
# Scale structure to 50 %, while keeping node 12 fixed:
# Scale 0.5 Node 12
```

Transforms

```
# About Table
# A table can contain various data that can be used in multiple contexts.
#
# A table entry should specify the header in the following layout:
# Table
# <UniqueName>
# <ColumnName1> <ColumnName2> <ColumnName3> ...
#
# The table data should follow after the header as a table of values with the same
# number of columns as specified in the header.
```

EK-2. Geliştirilmiş görünür sabitlik yöntemiyle uzatılmış tekil kazığın Ashes ortamındaki kodu

```
# This support section file was exported with documentation and placeholders.
# To export without documentation and placeholders, go to 'Preferences/Export settings'
# and turn off 'Include documentation/comments and placeholder text'.

# This text file represents a support section that can be imported into Ashes.
# The file has three kinds of lines (content):
# 1) Keyword lines: Lines with a keyword.
# 2) Parameter values lines: Lines with multiple parameter values (numbers and/or text)
# 3) Comments lines.

# KEYWORDS:
# Lines with parameter values must be preceded with a line consisting of only a predefined
# keyword to recognize what the parameter values below represent.
# Keywords are case insensitive as well as whitespace insensitive, i.e. a keyword can
# contain whitespace such as 'Circular hollow cross sections' (so, 'keysting' might be a more
# accurate term).
# The keywords are:
# 'All sensors', 'Angle cross sections', 'Beam end fatigue sensors', 'Circular hollow cross
# sections',
# 'Circular shape cross sections', 'Circular solid cross sections', 'Damping loads', 'H cross
# sections', 'Joints',
# 'Materials', 'Mooring lines', 'Members', 'Name', 'Nodes', 'Nonlinear springs', 'Orientation',
# 'Rectangular hollow cross sections', 'Rectangular shape cross sections', 'Rectangular solid
# cross sections', 'RNA nodes',
# 'Slave nodes', 'Springs', 'Substructure node', 'Supports', 'Table', 'Transforms', 'Tubular joint
# fatigue sensors',
# 'Tubular tower nodes'

# LINES WITH PARAMETER VALUES:
# After a keyword has been recognized on a line the parameter lines should follow directly
# below.
```

EK-2. (devam) Geliştirilmiş görünür sabitlik yöntemiyle uzatılmış tekil kazığın Ashes ortamındaki kodu

There can be comments between the keyword line and the parameter values, but no blank lines.

Immediately above the parameter lines there is typically a comment line with column titles and units.

The parameter lines are read consecutively until an empty line is found.

COMMENTS:

Lines that start with '#'(such as this one and the next) are comments and thus the content is not read.

They are primarily used to help getting the formatting of the data right.

Comments lines can be inserted/added anywhere.

About Name

The given name appears on the support section that is based on this file.

Name

Monopile

About Orientation

Defines how to position and orient the structure when it is imported.

#

A zero rotation will align the axes in the Ashes standard coordinate system; with y

pointing upwind and z pointing up. One method of oriented can be chosen among the following # two::

- Heading: You specify the heading of the y axis (the forward direction) relative to north.

A typical case: if you want the structure to have a heading 30 degrees towards the east, enter:

Heading 30

#

- Angles: You can specify up to three angles, one for rotation about each axis.

Each angle represents a right-handed rotation about the axes, in the following order:

EK-2. (devam) Geliştirilmiş görünür sabitlik yöntemiyle uzatılmış tekil kazığın Ashes ortamındaki kodu

```
# x (roll), y (pitch), z (yaw). The angles are hence Euler angles. Rotations are intrinsic,
# which means that successive rotations are performed about the previously rotated axes.
# To reproduce the previous example where the structure is oriented 30 degrees towards the
east, enter:
# Angles 0 0 30
```

Orientation

Heading 0

```
# About Tubular tower nodes
# A non-tubular tower support section (such as a floater or a monopile) can have one or
more tubular towers that are put on top of it.
# A support section with one or more tubular towers on top is typically called substructure.
# In this section, you can specify which nodes have a tubular tower on top.
# For example, for an RNA connected to the node with the name '10', enter 10.
# (the node name is alpha-numeric without white space).
```

Tubular tower nodes

```
# Node name
```

```
Tubular_tower_node
```

```
# About Materials
```

```
# For each material line, the name, elastic modulus (Young's modulus), Poisson's ratio, and
density must be given.
```

```
# The name of a material must be unique - and the names are used for the cross sections.
```

```
# The damping method implemented is the stiffness part of Rayleigh damping (also called
proportional damping).
```

EK-2. (devam) Geliştirilmiş görünür sabitlik yöntemiyle uzatılmış tekil kazığın Ashes ortamındaki kodu

The mass part of Rayleigh damping is not yet implemented.

When a material is defined by the user (you) in the Material tool, the damping ratio (ksi) at a particular frequency are given.

The lambda coefficient is calculated as: $\lambda = 2 \cdot \text{damping ratio} / \text{frequency}$, with frequency as rad/s.

In the Materials tool, however, you can specify the frequency as [Hz]

Materials

# Name	Elastic modulus (Pa)	Poisson's ratio (-)	Density (kg/m ³)
Steel	2.1e+11	0.3	7850
AF1	1.523e+11	0.3	7850
AF2	1.359e+12	0.3	7850

About cross sections.

There are 2 categories of cross sections:

#

Category 1:

Circular and rectangular shaped cross sections that can be loaded with aero- and hydrodynamical loads.

Five kinds of such cross sections can be imported/exported, each with their own keyword:

'Circular hollow cross sections', 'Circular solid cross sections', 'Circular shape cross sections',

'Rectangular hollow cross sections', 'Rectangular solid cross sections', and 'Rectangular shape cross sections'.

The different kinds have mandatory parameters given first in each line for their name, respective geometry.

Then, either material or explicit stiffness and mass.

Additionally, the cross sections have some parameters that are optional and are given after the mandatory parameters.

Optional parameters: 'Growth density', 'Growth thickness', 'Filling density', 'Filling portion', 'Aero drag coef.',

EK-2. (devam) Geliştirilmiş görünür sabitlik yöntemiyle uzatılmış tekil kazığın Ashes ortamındaki kodu

'Hydro drag coef.', 'Hydro inertia coef.', 'Heave plate drag coef.', 'Heave plate inertia coef.', 'Has heave plate FK forces?', 'Buoyancy tuning factor'.

Rectangular shapes have coefficients for two directions (height and width).

#

Category 2:

Standardized cross sections (typically documented in tables). These can not be loaded with aero- and hydrodynamical loading.

Two kinds of cross sections can be imported/exported, each with their own keyword:

'H cross sections', 'Angle cross sections'.

As category 1, they have mandatory parameters for their name, respective geometry, and material.

Then, optionally, explicit stiffnesses can be given (typically found in aforementioned tables), in which case these

explicit values are used. If they are not given, then the geometry is used to calculate stiffness.

For a cross section that is not doubly symmetric, the explicit stiffnesses can either be given for the

geometric axes or for the principal axes. The choice is made by the 'Axes' parameter that can be either 'Geometry' or 'Principal'.

The default values are given in the title line.

Circular hollow cross sections

#	Name	Diameter(m)	Thickness(m)	Material	[Growth density (kg/m ³) = 0]	[Growth thickness (m) = 0]	[Aero drag coef. (-) = 0]	[Hydro drag coef. (-) = 0]	[Hydro inertia coef. = 0]	[Heave plate drag coef. (-) = 0]	[Heave plate inertia coef. (-) = 0]	[Has heave plate FK forces? (-) = 0]	[Buoyancy tuning factor (-) = 1.0]
CH_8.300x0.090	8.3	0.09	Steel	0	0	1	1.2	1.63	0	0	0	1	
CS2	8.3	0.09	AF2	0	0	1	1	2	0	0	0	1	

EK-2. (devam) Geliştirilmiş görünür sabitlik yöntemiyle uzatılmış tekil kazığın Ashes ortamındaki kodu

CS1 8.3 0.09 AF1 0 0 1 1 2 0 0 0 1

Circular shape cross sections

Name Diameter(m) Mass (kg/m) EI (Nm²) GJ (Nm²) EA (N)
 [Growth density (kg/m³) = 0] [Growth thickness (m) = 0] [Aero drag coef. (-) = 0][Hydro drag coef. (-) = 0] [Hydro inertia coef. = 0] [Heave plate drag coef. (-) = 0] [Heave plate inertia coef. (-) = 0] [Has heave plate FK forces? (-) = 0]
 [Buoyancy tuning factor (-) = 1.0]

(no cross sections used of this type used - can be added here following the pattern above.)

Circular solid cross sections

Name Diameter(m) Material [Growth density (kg/m³) = 0] [Growth thickness (m) = 0] [Aero drag coef. (-) = 0] [Hydro drag coef. (-) = 0] [Hydro inertia coef. = 0] [Heave plate drag coef. (-) = 0] [Heave plate inertia coef. (-) = 0]
 [Has heave plate FK forces? (-) = 0] [Buoyancy tuning factor (-) = 1.0]

(no cross sections used of this type used - can be added here following the pattern above.)

Rectangular hollow cross sections

Name Height(m) Width(m) Thickness(m) Material [Growth density (kg/m³) = 0] [Growth thickness (m) = 0] [Aero drag coef., height (-) = 0] [Aero drag coef., width (-) = 0] [Hydro drag coef. height (-) = 0] [Hydro drag coef. width (-) = 0] [Hydro inertia coef., height (-) = 0] [Hydro mass coef., width (-) = 0]
 [Heave plate drag coef. (-) = 0] [Heave plate inertia coef. (-) = 0] [Has heave plate FK forces? (-) = 0] [Buoyancy tuning factor (-) = 1.0]

(no cross sections used of this type used - can be added here following the pattern above.)

Rectangular solid cross sections

Name Height(m) Width(m) Material [Growth density (kg/m³) = 0]
 [Growth thickness (m) = 0] [Aero drag coef., height (-) = 0] [Aero drag coef.,

EK-2. (devam) Geliştirilmiş görünür sabitlik yöntemiyle uzatılmış tekil kazığın Ashes ortamındaki kodu

width (-) = 0] [Hydro drag coef. height (-) = 0] [Hydro drag coef. width (-) = 0]
 [Hydro inertia coef., height (-) = 0] [Hydro mass coef., width (-) = 0] [Heave
 plate drag coef. (-) = 0] [Heave plate inertia coef. (-) = 0] [Has heave plate FK
 forces? (-) = 0] [Buoyancy tuning factor (-) = 1.0]
 # (no cross sections used of this type used - can be added here following the pattern above.)

Rectangular shape cross sections

Name Height (m) Width (m) Mass (kg/m) EI1st (Nm²) EI2nd (Nm²)
 GJ (Nm²) EA (N) [GAs,1st (N)] [GAs,2nd (N)] [S_offset,1st (m)=0]
 [S_offset,2nd=0] (m) [m_offset,1st (m)=] [m_offset,2nd (m)]=0 [Growth
 density (kg/m³) = 0] [Growth thickness (m) = 0] [Aero drag coef., height (-) = 0]
 [Aero drag coef., width (-) = 0] [Hydro drag coef. height (-) = 0] [Hydro
 drag coef. width (-) = 0] [Hydro inertia coef., height (-) = 0] [Hydro mass coef., width
 (-) = 0] [Heave plate drag coef. (-) = 0] [Heave plate inertia coef. (-) = 0]
 [Has heave plate FK forces? (-) = 0] [Buoyancy tuning factor (-) = 1.0]
 # (no cross sections used of this type used - can be added here following the pattern above.)

H cross sections

Name Height(m) Flange width(m) Web thickness(m) Flange
 thickness(m) Material [Area(m²)] [I1(m⁴)] [I2(m⁴)] [Ixy(m⁴)]
 # (no cross sections used of this type used - can be added here following the pattern above.)

Angle cross sections

Name Length 1st leg(m) Length 2nd leg(m) Thickness(m) Material
 [Axes] [e1st (m)] [e2nd (m)] [Area(m²)] [I1(m⁴)] [I2(m⁴)]
 [Ixy(m⁴) or alpha(deg)]
 # (no cross sections used of this type used - can be added here following the pattern above.)

EK-2. (devam) Geliştirilmiş görünür sabitlik yöntemiyle uzatılmış tekil kazığın Ashes ortamındaki kodu

About All sensors

This line is used to choose sensors set for all parts of a particular category.

All sensors

```
# [All element sensors = 0] [All node sensors = 0] [All node loads sensors = 0]
    [All node fluid kinematic sensors = 0] [All support sensors = 0] [All linear
spring sensors = 0] [All nonlinear spring sensors = 0]
0 0 0 0 0
```

About Nodes

The node names can be arbitrary alpha-numeric strings without white space.

When exporting a support section, nodes are given increasing integers as names, starting with 1.

The last column [Point mass (kg) = 0] contains point mass for the node in question.

Point mass is optional with a default value of 0. It can be used to define ballast on a floater.

Nodes

```
# Node name x (m) y (m) z (m) [Point mass (kg) = 0] [Rot. point inertia, x (kg m^2) =
0] [Rot. point inertia, y (kg m^2) = 0] [Rot. point inertia, z (kg m^2) = 0] [Node
sensor = 0] [Node loads sensor = 0] [Node fluid kinematic sensor = 0]
Tubular_tower_node 0.000000 0.000000 8.190000 0 0 0 0
0 0 0
1 0.000000 0.000000 5.000000 0 0 0 0 0 0
0
2 0.000000 0.000000 0.000000 0 0 0 0 0 0
0
3 0.000000 0.000000 -5.000000 0 0 0 0 0 0
0
4 0.000000 0.000000 -10.000000 0 0 0 0 0 0
0
```

EK-2. (devam) Geliştirilmiş görünür sabitlik yöntemiyle uzatılmış tekil kazığın Ashes ortamındaki kodu

5	0.000000	0.000000	-15.000000	0	0	0	0	0	0
0									
Mudline	0.000000	0.000000	-30.000000	0	0	0	0	0	1
0	0								
7	0.000000	0.000000	-35.000000	0	0	0	0	0	0
0									
7m	0.000000	0.000000	-40.000000	0	0	0	0	1	0
0									
8	0.000000	0.000000	-45.000000	0	0	0	0	0	0
0									
9	0.000000	0.000000	-55.000000	0	0	0	0	0	0
0									
10	0.000000	0.000000	-62.830000	0	0	0	0	0	0
0									

About Slave nodes:

Slave nodes are typically used to create hinges. If a member is connected to a node by a hinge

then the member's start or end node should be a slave node of the (master) node in question.

Parameters:

Slave node name: The name of the slave node to be created. Cannot be the same as the name of a node (master or slave) already created.

Master node name: The name of the master node. Must be the name of an existing regular (master) node.

Slave nodes

Slave node name Master node name

About Members

Members are straight (structural) parts (beams, columns etc) of the support section with the same cross section.

EK-2. (devam) Geliştirilmiş görünür sabitlik yöntemiyle uzatılmış tekil kazığın Ashes ortamındaki kodu

A member is divided in 1 or more elements (in the FEM sense)

Initial rotation ([Init rot. [deg] = 0]) The initial rotation of the principal axes referenced to the default rotation. Given in degrees.

Default rotation: The 2nd principal axis (blue) is horizontal, thus, the 1st (green) has the max gradient upwards (or downwards).

Members

#	Member name	Start node	End node	Cross section	[Num. of elements = 1]				
					[Initial rotation (deg) = 0] [Filling density (kg/m ³) = 0] [Filling portion(-) = 1] [Beam Sensor = 0]				
1	Tubular_tower_node	1	CH_8.300x0.090	1	0	0	1	0	
2	1	2	CH_8.300x0.090	1	0	0	1	0	
MSL	2	3	CH_8.300x0.090	1	0	0	1	1	
4	3	4	CH_8.300x0.090	1	0	0	1	0	
Halfway	4	5	CH_8.300x0.090	1	0	0	1	1	
6	5	Mudline	CH_8.300x0.090	1	0	0	1	0	
Mudline	Mudline	7	CS2	1	0	0	1	1	
7m	7	7m	CS2	1	0	0	1	1	
8	7m	8	CS1	1	0	0	1	0	
9	8	9	CS1	1	0	0	1	0	
10	9	10	CS1	1	0	0	1	0	

About Supports

Type can be:

"Fixed" - translations and rotations constrained

"Pinned" - translation constrained, rotations free

Supports

#	Name	Type	Node name	[Sensor = 0]
1	Fixed	10	0	

EK-2. (devam) Geliştirilmiş görünür sabitlik yöntemiyle uzatılmış tekil kazığın Ashes ortamındaki kodu

About Springs

Linear springs with the given stiffness in global coordinates.

Name: Each support must have a locally unique name.

Type can be:

"Spring" - a linear translational spring with the given stiffness in global coordinates.

"RotationalSpring" - a linear rotational spring with the given stiffness about global axes.

(note: nonlinear (translational) springs are given in the 'Nonlinear springs' section.)

Node name: The node that the support is connected to. The name must be given in the node list.

Stiffness: The stiffnesses of the spring given in global coordinates.

IsPy?: This parameter does not influence the simulation results, but is used to keep track of

which springs that are Py springs (i.e. geotech. springs). Optional parameter. Default value: 0 (i.e. NOT a Py spring).

Springs

# Name	Type	Node name	Stiffness x-dir (N/m or Nm/rad)	Stiffness	y-dir.
		Stiffness z-dir.	[IsPy? = 0 (-)]	[Sensor = 0]	

About Nonlinear (translational) springs

Nonlinear translational springs with the given direction in global coordinates and where the stiffness relation is given in

a table in the Table section.

Name: Each support must have a locally unique name.

Type - Can be either:

"Spring" - a translational spring with the given direction.

"RotationalSpring" - a rotational spring with the given direction.

Direction: The direction of the nonlinear spring given in global coordinates. For a rotational spring, this is the direction of the spring's axis.

Stiffness table name: The name of the table giving the (nonlinear) stiffness curve.

The table must be given in the table section of this file (keyword: Table).

EK-2. (devam) Geliştirilmiş görünür sabitlik yöntemiyle uzatılmış tekil kazığın Ashes ortamındaki kodu

IsPy?: This parameter does not influence the simulation results, but is used to keep track of
of
which springs that are Py springs (i.e. geotech. springs). Optional parameter. Default value:
0 (i.e. NOT a Py spring).

Nonlinear springs

# Name	Type	Node name	x-direction (m)	y-direction (m).	z-
direction (m)	Stiffness table name	[IsPy? = 0 (-)]		[Sensor = 0]	

About Damping loads

Damping can be implemented as (nonlinear) loads.

The damping factor is multiplied with the velocity of the node in question to give a damping load

in the opposite direction.

Damping loads

# Node name	Damping factor (Ns/m)
-------------	-----------------------

About Beam end fatigue sensors

Beams (or rather beam ends) can have two kind of sensors - a 'normal' sensor and a fatigue sensor.

They can both be set in the beam element window in the GUI.

However, when exporting a beam element with a 'normal' and/or fatigue sensor,

the normal sensor is included in the beam element section,

whereas the fatigue sensor is included in this section.

This is because the fatigue sensor has quite a few parameters.

The second column is the node option (the alternatives are: 'i', 'j').

The third column is the stress range filter in [MPa].

The fourth column is the SN collection name (one of: 'EurocodeEN1993', 'DNV-C203-seawatercathodicprotection', 'DNV-C203-air').

EK-2. (devam) Geliştirilmiş görünür sabitlik yöntemiyle uzatılmış tekil kazığın Ashes ortamındaki kodu

The fifth column is all the stress point triplets in one string. The triplets are divided by the character '#'.
 # Note: it is possible to have multiple triplets for the same angle
 # (e.g. to compare fatigue life for different SN categories).

Beam end fatigue sensors

# Beam element name	SN collection	SN-curve	Stress filter	Node	option
Stress point(s)	SCF(s)				

The exported support section had no beam end fatigue sensors. To import beam end fatigue sensors, add them here.

About Tubular joint fatigue sensors

Fatigue analysis of tubular joints are different from beam end fatigue.

MORE DOC TO BE ADDED.

Tubular joint fatigue sensors

# Beam element name	SN collection	SN-curve	Stress filter	Local joint name
Side				

The exported support section had no tubular joint fatigue sensors. To import tubular joint fatigue sensors, add them here.

About Joints

Joints are not required, but have to be defined to add joint fatigue sensors (keyword: 'Tubular joint fatigue sensors').

The 'Joint name' column (first column) is the joint local name and must be: 1) An alphanumeric string,

2. Unique for this support section (file), and 3. Cannot contain whitespace.

The 'Chord elements' column is a list of element local names that constitute the chord of the joint.

EK-2. (devam) Geliştirilmiş görünür sabitlik yöntemiyle uzatılmış tekil kazığın Ashes ortamındaki kodu

There must be 1 or 2 chord elements.

The 'Brace elements' column is a list of element local names that constitute the braces of the joint.

There is 1 element per brace.

The '[Hard coded SCFs]' column is optional. If it is used it must have 4 strictly positive scalars.

The list (string) of chord or brace element names and SCFs cannot have white space and the elements are divided by the character: '&'.

The element local names for chords and braces must be defined in this file in the members sections (keyword: 'Members').

Joints

# Joint name	Chord elements	Brace elements	[Hard coded SCFs]
--------------	----------------	----------------	-------------------

The exported support section had no joints. To import joints, add them here.

About Transforms

The support section structure can be scaled, translated or rotated by defining one or more transformations.

Valid transforms are scale, translate and rotate. The transformations will be applied in the order specified.

Note that if this structure is imported onto another structure, translations will be ignored,

since the structure will be connected to the existing one.

Examples

Translate structure [dx, dy, dz]

Translate 10 20 30

Rotate structure 90 deg around x axis at node 10. If no Node parameter is given,

the rotation will be performed around the global origin.

Rotate 90 0 0 Node 10

Scale structure to 50 %, while keeping node 12 fixed:

Scale 0.5 Node 12

EK-2. (devam) Geliştirilmiş görünür sabitlik yöntemiyle uzatılmış tekil kazığın Ashes ortamındaki kodu

Transforms

About Table

A table can contain various data that can be used in multiple contexts.

#

A table entry should specify the header in the following layout:

Table

<UniqueName>

<ColumnName1> <ColumnName2> <ColumnName3> ...

#

The table data should follow after the header as a table of values with the same

number of columns as specified in the header.

EK-4. Bağlı yaylar yöntemiyle tekil kazığın Ashes ortamındaki kodu

```
# This support section file was exported with documentation and placeholders.
# To export without documentation and placeholders, go to 'Preferences/Export settings'
# and turn off 'Include documentation/comments and placeholder text'.

# This text file represents a support section that can be imported into Ashes.
# The file has three kinds of lines (content):
# 1) Keyword lines: Lines with a keyword.
# 2) Parameter values lines: Lines with multiple parameter values (numbers and/or text)
# 3) Comments lines.

# KEYWORDS:
# Lines with parameter values must be preceded with a line consisting of only a predefined
# keyword to recognize what the parameter values below represent.
# Keywords are case insensitive as well as whitespace insensitive, i.e. a keyword can
# contain whitespace such as 'Circular hollow cross sections' (so, 'keysting' might be a more
# accurate term).
# The keywords are:
# 'All sensors', 'Angle cross sections', 'Beam end fatigue sensors', 'Circular hollow cross
# sections',
# 'Circular shape cross sections', 'Circular solid cross sections', 'Damping loads', 'H cross
# sections', 'Joints',
# 'Materials', 'Mooring lines', 'Members', 'Name', 'Nodes', 'Nonlinear springs', 'Orientation',
# 'Rectangular hollow cross sections', 'Rectangular shape cross sections', 'Rectangular solid
# cross sections', 'RNA nodes',
# 'Slave nodes', 'Springs', 'Substructure node', 'Supports', 'Table', 'Transforms', 'Tubular joint
# fatigue sensors',
# 'Tubular tower nodes'

# LINES WITH PARAMETER VALUES:
# After a keyword has been recognized on a line the parameter lines should follow directly
# below.
# There can be comments between the keyword line and the parameter values, but no blank
# lines.
# Immediately above the parameter lines there is typically a comment line with column titles
# and units.
# The parameter lines are read consecutively until an empty line is found.

# COMMENTS:
# Lines that start with '#'(such as this one and the next) are comments and thus the content
# is not read.
# They are primarily used to help getting the formatting of the data right.
# Comments lines can be inserted/added anywhere.

# About Name
# The given name appears on the support section that is based on this file.
```

Name

EK-4. (devam) Bağlı yaylar yöntemiyle tekil kazığın Ashes ortamındaki kodu

Monopile

```
# About Orientation
# Defines how to position and orient the structure when it is imported.
#
# A zero rotation will align the axes in the Ashes standard coordinate system; with y
# pointing upwind and z pointing up. One method of oriented can be chosen among the
# following # two::
# - Heading: You specify the heading of the y axis (the forward direction) relative to north.
# A typical case: if you want the structure to have a heading 30 degrees towards the east,
# enter:
# Heading 30
#
# - Angles: You can specify up to three angles, one for rotation about each axis.
# Each angle represents a right-handed rotation about the axes, in the following order:
# x (roll), y (pitch), z (yaw). The angles are hence Euler angles. Rotations are intrinsic,
# which means that successive rotations are performed about the previously rotated axes.
# To reproduce the previous example where the structure is oriented 30 degrees towards the
# east, enter:
# Angles 0 0 30
```

Orientation

Heading 0

```
# About Tubular tower nodes
# A non-tubular tower support section (such as a floater or a monopile) can have one or
# more tubular towers that are put on top of it.
# A support section with one or more tubular towers on top is typically called substructure.
# In this section, you can specify which nodes have a tubular tower on top.
# For example, for an RNA connected to the node with the name '10', enter 10.
# (the node name is alpha-numeric without white space).
```

Tubular tower nodes

```
# Node name
Tubular_tower_node
```

About Materials

```
# For each material line, the name, elastic modulus (Young's modulus), Poisson's ratio, and
# density must be given.
# The name of a material must be unique - and the names are used for the cross sections.
# The damping method implemented is the stiffness part of Rayleigh damping (also called
# proportional damping).
# The mass part of Rayleigh damping is not yet implemented.
# When a material is defined by the user (you) in the Material tool, the damping ratio (ksi)
# at a particular frequency are given.
# The lambda coefficient is calculated as:  $\lambda = 2 \times \text{damping ratio} / \text{frequency}$ , with
# frequency as rad/s.
# In the Materials tool, however, you can specify the frequency as [Hz]
```

EK-4. (devam) Bağlı yaylar yöntemiyle tekil kazığın Ashes ortamındaki kodu

Materials

# Name	Elastic modulus (Pa)	Poisson's ratio (-)	Density (kg/m ³)
Steel	2.1e+11	0.3	7850

About cross sections.

There are 2 categories of cross sections:

#

Category 1:

Circular and rectangular shaped cross sections that can be loaded with aero- and hydrodynamical loads.

Five kinds of such cross sections can be imported/exported, each with their own keyword:

'Circular hollow cross sections', 'Circular solid cross sections', 'Circular shape cross sections',

'Rectangular hollow cross sections', 'Rectangular solid cross sections', and 'Rectangular shape cross sections'.

The different kinds have mandatory parameters given first in each line for their name, respective geometry.

Then, either material or explicit stiffness and mass.

Additionally, the cross sections have some parameters that are optional and are given after the mandatory parameters.

Optional parameters: 'Growth density', 'Growth thickness', 'Filling density', 'Filling portion', 'Aero drag coef.',

'Hydro drag coef.', 'Hydro inertia coef.', 'Heave plate drag coef.', 'Heave plate inertia coef.', 'Has heave plate FK forces?', 'Buoyancy tuning factor'.

Rectangular shapes have coefficients for two directions (height and width).

#

Category 2:

Standardized cross sections (typically documented in tables). These can not be loaded with aero- and hydrodynamical loading.

Two kinds of cross sections can be imported/exported, each with their own keyword:

'H cross sections', 'Angle cross sections'.

As category 1, they have mandatory parameters for their name, respective geometry, and material.

Then, optionally, explicit stiffnesses can be given (typically found in aforementioned tables), in which case these

explicit values are used. If they are not given, then the geometry is used to calculate stiffness.

For a cross section that is not doubly symmetric, the explicit stiffnesses can either be given for the

geometric axes or for the principal axes. The choice is made by the 'Axes' parameter that can be either 'Geometry' or 'Principal'.

The default values are given in the title line.

Circular hollow cross sections

# Name	Diameter(m)	Thickness(m)	Material	[Growth density (kg/m ³) = 0]
	[Growth thickness (m) = 0]	[Aero drag coef. (-) = 0]		[Hydro drag coef. (-) = 0]
	[Hydro inertia coef. = 0]	[Heave plate drag coef. (-) = 0]		[Heave plate

EK-4. (devam) Bağlı yaylar yöntemiyle tekil kazığın Ashes ortamındaki kodu

inertia coef. (-) = 0] [Has heave plate FK forces? (-) = 0] [Buoyancy tuning factor (-) = 1.0]

CH_8.300x0.090 8.3 0.09 Steel 0 0 1 1.2 1.63 0 0
0 1

Circular shape cross sections

Name Diameter(m) Mass (kg/m) EI (Nm^2) GJ (Nm^2) EA (N)
[Growth density (kg/m^3) = 0] [Growth thickness (m) = 0] [Aero drag coef.
(-) = 0] [Hydro drag coef. (-) = 0] [Hydro inertia coef. = 0] [Heave plate drag coef. (-)
) = 0] [Heave plate inertia coef. (-) = 0] [Has heave plate FK forces? (-) = 0]
[Buoyancy tuning factor (-) = 1.0]

(no cross sections used of this type used - can be added here following the pattern above.)

Circular solid cross sections

Name Diameter(m) Material [Growth density (kg/m^3) = 0] [Growth
thickness (m) = 0] [Aero drag coef. (-) = 0] [Hydro drag coef. (-) = 0] [Hydro
inertia coef. = 0] [Heave plate drag coef. (-) = 0] [Heave plate inertia coef. (-) = 0]
[Has heave plate FK forces? (-) = 0] [Buoyancy tuning factor (-) = 1.0]

(no cross sections used of this type used - can be added here following the pattern above.)

Rectangular hollow cross sections

Name Height(m) Width(m) Thickness(m) Material [Growth density
(kg/m^3) = 0] [Growth thickness (m) = 0] [Aero drag coef., height (-) = 0] [Aero
drag coef., width (-) = 0] [Hydro drag coef. height (-) = 0] [Hydro drag coef. width
(-) = 0] [Hydro inertia coef., height (-) = 0] [Hydro mass coef., width (-) = 0]
[Heave plate drag coef. (-) = 0] [Heave plate inertia coef. (-) = 0] [Has
heave plate FK forces? (-) = 0] [Buoyancy tuning factor (-) = 1.0]

(no cross sections used of this type used - can be added here following the pattern above.)

Rectangular solid cross sections

Name Height(m) Width(m) Material [Growth density (kg/m^3) = 0]
[Growth thickness (m) = 0] [Aero drag coef., height (-) = 0] [Aero drag coef.,
width (-) = 0] [Hydro drag coef. height (-) = 0] [Hydro drag coef. width (-) = 0]
[Hydro inertia coef., height (-) = 0] [Hydro mass coef., width (-) = 0] [Heave
plate drag coef. (-) = 0] [Heave plate inertia coef. (-) = 0] [Has heave plate FK
forces? (-) = 0] [Buoyancy tuning factor (-) = 1.0]

(no cross sections used of this type used - can be added here following the pattern above.)

Rectangular shape cross sections

Name Height (m) Width (m) Mass (kg/m) EI1st (Nm^2) EI2nd (Nm^2)
GJ (Nm^2) EA (N) [GAs,1st (N)] [GAs,2nd (N)] [S_offset,1st (m)=0]
[S_offset,2nd=0] (m) [m_offset,1st (m)=] [m_offset,2nd (m)]=0 [Growth
density (kg/m^3) = 0] [Growth thickness (m) = 0] [Aero drag coef., height (-) = 0]
[Aero drag coef., width (-) = 0] [Hydro drag coef. height (-) = 0] [Hydro

EK-4. (devam) Bağlı yaylar yöntemiyle tekil kazığın Ashes ortamındaki kodu

drag coef. width (-) = 0] [Hydro inertia coef., height (-) = 0] [Hydro mass coef., width (-) = 0] [Heave plate drag coef. (-) = 0] [Heave plate inertia coef. (-) = 0] [Has heave plate FK forces? (-) = 0] [Buoyancy tuning factor (-) = 1.0]
(no cross sections used of this type used - can be added here following the pattern above.)

H cross sections

Name Height(m) Flange width(m) Web thickness(m) Flange thickness(m) Material [Area(m²)] [I1(m⁴)] [I2(m⁴)] [Ixy(m⁴)]
(no cross sections used of this type used - can be added here following the pattern above.)

Angle cross sections

Name Length 1st leg(m) Length 2nd leg(m) Thickness(m) Material
[Axes] [e1st (m)] [e2nd (m)] [Area(m²)] [I1(m⁴)] [I2(m⁴)]
[Ixy(m⁴) or alpha(deg)]
(no cross sections used of this type used - can be added here following the pattern above.)

About All sensors

This line is used to choose sensors set for all parts of a particular category.

All sensors

[All element sensors = 0] [All node sensors = 0] [All node loads sensors = 0]
[All node fluid kinematic sensors = 0] [All support sensors = 0] [All linear spring sensors = 0] [All nonlinear spring sensors = 0]
0 0 0 0 0

About Nodes

The node names can be arbitrary alpha-numeric strings without white space.

When exporting a support section, nodes are given increasing integers as names, starting with 1.

The last column [Point mass (kg) = 0] contains point mass for the node in question.

Point mass is optional with a default value of 0. It can be used to define ballast on a floater.

Nodes

Node name x (m) y (m) z (m) [Point mass (kg) = 0] [Rot. point inertia, x (kg m²) = 0] [Rot. point inertia, y (kg m²) = 0] [Rot. point inertia, z (kg m²) = 0] [Node sensor = 0] [Node loads sensor = 0] [Node fluid kinematic sensor = 0]
Tubular_tower_node 0.000000 0.000000 8.190000 0 0 0 0
0 0 0
1 0.000000 0.000000 5.000000 0 0 0 0 0 0
0
2 0.000000 0.000000 0.000000 0 0 0 0 0 0
0
3 0.000000 0.000000 -5.000000 0 0 0 0 0 0
0

EK-4. (devam) Bağlı yaylar yöntemiyle tekil kazığın Ashes ortamındaki kodu

-42	0.000000	0.000000	-52.000000	0	0	0	0	0	0
-43	0.000000	0.000000	-53.000000	0	0	0	0	0	0
-44	0.000000	0.000000	-54.000000	0	0	0	0	0	0
-45	0.000000	0.000000	-55.000000	0	0	0	0	0	0
-46	0.000000	0.000000	-56.000000	0	0	0	0	0	0
-47	0.000000	0.000000	-57.000000	0	0	0	0	0	0
-48	0.000000	0.000000	-58.000000	0	0	0	0	0	0
-49	0.000000	0.000000	-59.000000	0	0	0	0	0	0
-50	0.000000	0.000000	-60.000000	0	0	0	0	0	0
-51	0.000000	0.000000	-61.000000	0	0	0	0	0	0

About Slave nodes:

Slave nodes are typically used to create hinges. If a member is connected to a node by a hinge

then the member's start or end node should be a slave node of the (master) node in question.

Parameters:

Slave node name: The name of the slave node to be created. Cannot be the same as the name of a node (master or slave) already created.

Master node name: The name of the master node. Must be the name of an existing regular (master) node.

Slave nodes

# Slave node name	Master node name
-------------------	------------------

About Members

Members are straight (structural) parts (beams, columns etc) of the support section with the same cross section.

A member is divided in 1 or more elements (in the FEM sense)

Initial rotation ([Init rot. [deg] = 0]) The initial rotation of the principal axes referenced to the default rotation. Given in degrees.

Default rotation: The 2nd principal axis (blue) is horizontal, thus, the 1st (green) has the max gradient upwards (or downwards).

Members

#	Member name	Start node	End node	Cross section	[Num. of elements = 1]
		[Initial rotation (deg) = 0]	[Filling density (kg/m ³) = 0]		[Filling portion(-) = 1]
		[Beam Sensor = 0]			

EK-4. (devam) Bağlı yaylar yöntemiyle tekil kazığın Ashes ortamındaki kodu

1	Tubular_tower_node 1		CH_8.300x0.090	1	0	0	1	0
2	1	2	CH_8.300x0.090	1	0	0	1	0
MSL	2	3	CH_8.300x0.090	1	0	0	1	1
4	3	4	CH_8.300x0.090	1	0	0	1	0
Halfway	4	5	CH_8.300x0.090	1	0	0	1	1
6	5	Mudline	CH_8.300x0.090	1	0	0	1	0
Mudline	Mudline	-21	CH_8.300x0.090	1	0	0	1	1
-21	-21	-22	CH_8.300x0.090	1	0	0	1	0
-22	-22	-23	CH_8.300x0.090	1	0	0	1	0
-23	-23	-24	CH_8.300x0.090	1	0	0	1	0
-24	-24	-25	CH_8.300x0.090	1	0	0	1	0
-25	-25	-26	CH_8.300x0.090	1	0	0	1	0
7m	-26	7m	CH_8.300x0.090	1	0	0	1	1
-27	7m	-28	CH_8.300x0.090	1	0	0	1	0
-28	-28	-29	CH_8.300x0.090	1	0	0	1	0
-29	-29	-30	CH_8.300x0.090	1	0	0	1	0
-30	-30	-31	CH_8.300x0.090	1	0	0	1	0
-31	-31	-32	CH_8.300x0.090	1	0	0	1	0
-32	-32	-33	CH_8.300x0.090	1	0	0	1	0
-33	-33	-34	CH_8.300x0.090	1	0	0	1	0
-34	-34	-35	CH_8.300x0.090	1	0	0	1	0
-35	-35	-36	CH_8.300x0.090	1	0	0	1	0
-36	-36	-37	CH_8.300x0.090	1	0	0	1	0
-37	-37	-38	CH_8.300x0.090	1	0	0	1	0
-38	-38	-39	CH_8.300x0.090	1	0	0	1	0
-39	-39	-40	CH_8.300x0.090	1	0	0	1	0
-40	-40	-41	CH_8.300x0.090	1	0	0	1	0
-41	-41	-42	CH_8.300x0.090	1	0	0	1	0
-42	-42	-43	CH_8.300x0.090	1	0	0	1	0
-43	-43	-44	CH_8.300x0.090	1	0	0	1	0
-44	-44	-45	CH_8.300x0.090	1	0	0	1	0
-45	-45	-46	CH_8.300x0.090	1	0	0	1	0
-46	-46	-47	CH_8.300x0.090	1	0	0	1	0
-47	-47	-48	CH_8.300x0.090	1	0	0	1	0
-48	-48	-49	CH_8.300x0.090	1	0	0	1	0
-49	-49	-50	CH_8.300x0.090	1	0	0	1	0
-50	-50	-51	CH_8.300x0.090	1	0	0	1	0

About Supports

Type can be:

"Fixed" - translations and rotations constrained

"Pinned" - translation constrained, rotations free

Supports

EK-4. (devam) Bağlı yaylar yöntemiyle tekil kazığın Ashes ortamındaki kodu

```
# Name      Type  Node name  [Sensor = 0]
1      Fixed -51    0
```

About Springs

Linear springs with the given stiffness in global coordinates.

Name: Each support must have a locally unique name.

Type can be:

"Spring" - a linear translational spring with the given stiffness in global coordinates.

"RotationalSpring" - a linear rotational spring with the given stiffness about global axes.

(note: nonlinear (translational) springs are given in the 'Nonlinear springs' section.)

Node name: The node that the support is connected to. The name must be given in the node list.

Stiffness: The stiffnesses of the spring given in global coordinates.

IsPy?: This parameter does not influence the simulation results, but is used to keep track of

which springs that are Py springs (i.e. geotech. springs). Optional parameter. Default value: 0 (i.e. NOT a Py spring).

Springs

# Name	Type	Node name	Stiffness x-dir (N/m or Nm/rad)	Stiffness y-dir.
			[IsPy? = 0 (-)]	[Sensor = 0]
-20x	Spring Mudline	5.84e+04	0	0
-20y	Spring Mudline	0	5.84e+04	0
-21x	Spring -21	5.84e+05	0	0
-21y	Spring -21	0	5.84e+05	0
-22x	Spring -22	1.17e+06	0	0
-22y	Spring -22	0	1.17e+06	0
-23x	Spring -23	1.75e+06	0	0
-23y	Spring -23	0	1.75e+06	0
-24x	Spring -24	2.34e+06	0	0
-24y	Spring -24	0	2.34e+06	0
-25x	Spring -25	2.92e+06	0	0
-25y	Spring -25	0	2.92e+06	0
-26x	Spring -26	3.50e+06	0	0
-26y	Spring -26	0	3.50e+06	0
-27x	Spring 7m	4.09e+06	0	0
-27y	Spring 7m	0	4.09e+06	0
-28x	Spring -28	4.67e+06	0	0
-28y	Spring -28	0	4.67e+06	0
-29x	Spring -29	5.26e+06	0	0
-29y	Spring -29	0	5.26e+06	0
-30x	Spring -30	5.84e+06	0	0
-30y	Spring -30	0	5.84e+06	0
-31x	Spring -31	6.43e+06	0	0
-31y	Spring -31	0	6.43e+06	0
-32x	Spring -32	7.01e+06	0	0
-32y	Spring -32	0	7.01e+06	0

EK-4. (devam) Bağlı yaylar yöntemiyle tekil kazığın Ashes ortamındaki kodu

-33x	Spring -33	7.59e+06	0	0	0	0
-33y	Spring -33	0	7.59e+06	0	0	0
-34x	Spring -34	8.18e+06	0	0	0	0
-34y	Spring -34	0	8.18e+06	0	0	0
-35x	Spring -35	8.76e+06	0	0	0	0
-35y	Spring -35	0	8.76e+06	0	0	0
-36x	Spring -36	9.35e+06	0	0	0	0
-36y	Spring -36	0	9.35e+06	0	0	0
-37x	Spring -37	9.93e+06	0	0	0	0
-37y	Spring -37	0	9.93e+06	0	0	0
-38x	Spring -38	1.05e+07	0	0	0	0
-38y	Spring -38	0	1.05e+07	0	0	0
-39x	Spring -39	1.11e+07	0	0	0	0
-39y	Spring -39	0	1.11e+07	0	0	0
-40x	Spring -40	1.17e+07	0	0	0	0
-40y	Spring -40	0	1.17e+07	0	0	0
-41x	Spring -41	1.23e+07	0	0	0	0
-41y	Spring -41	0	1.23e+07	0	0	0
-42x	Spring -42	1.29e+07	0	0	0	0
-42y	Spring -42	0	1.29e+07	0	0	0
-43x	Spring -43	1.34e+07	0	0	0	0
-43y	Spring -43	0	1.34e+07	0	0	0
-44x	Spring -44	1.40e+07	0	0	0	0
-44y	Spring -44	0	1.40e+07	0	0	0
-45x	Spring -45	1.46e+07	0	0	0	0
-45y	Spring -45	0	1.46e+07	0	0	0
-46x	Spring -46	1.52e+07	0	0	0	0
-46y	Spring -46	0	1.52e+07	0	0	0
-47x	Spring -47	1.58e+07	0	0	0	0
-47y	Spring -47	0	1.58e+07	0	0	0
-48x	Spring -48	1.64e+07	0	0	0	0
-48y	Spring -48	0	1.64e+07	0	0	0
-49x	Spring -49	1.69e+07	0	0	0	0
-49y	Spring -49	0	1.69e+07	0	0	0
-50x	Spring -50	1.75e+07	0	0	0	0
-50y	Spring -50	0	1.75e+07	0	0	0
-51x	Spring -51	1.81e+07	0	0	0	0
-51y	Spring -51	0	1.81e+07	0	0	0

About Nonlinear (translational) springs

Nonlinear translational springs with the given direction in global coordinates and where the stiffness relation is given in

a table in the Table section.

Name: Each support must have a locally unique name.

Type - Can be either:

"Spring" - a translational spring with the given direction.

"RotationalSpring" - a rotational spring with the given direction.

EK-4. (devam) Bağlı yaylar yöntemiyle tekil kazığın Ashes ortamındaki kodu

Direction: The direction of the nonlinear spring given in global coordinates. For a rotational spring, this is the direction of the spring's axis.
 # Stiffness table name: The name of the table giving the (nonlinear) stiffness curve.
 # The table must be given in the table section of this file (keyword: Table).
 # IsPy?: This parameter does not influence the simulation results, but is used to keep track of
 # which springs that are Py springs (i.e. geotech. springs). Optional parameter. Default value:
 0 (i.e. NOT a Py spring).

Nonlinear springs

# Name	Type	Node name	x-direction (m)	y-direction (m).	z-
direction (m)	Stiffness table name	[IsPy? = 0 (-)]		[Sensor = 0]	

About Damping loads

Damping can be implemented as (nonlinear) loads.
 # The damping factor is multiplied with the velocity of the node in question to give a
 damping load
 # in the opposite direction.

Damping loads

# Node name	Damping factor (Ns/m)
-------------	-----------------------

About Beam end fatigue sensors

Beams (or rather beam ends) can have two kind of sensors - a 'normal' sensor and a fatigue
 sensor.
 # They can both be set in the beam element window in the GUI.
 # However, when exporting a beam element with a 'normal' and/or fatigue sensor,
 # the normal sensor is included in the beam element section,
 # whereas the fatigue sensor is included in this section.
 # This is because the fatigue sensor has quite a few parameters.
 # The second column is the node option (the alternatives are: 'i', 'j').
 # The third column is the stress range filter in [MPa].
 # The fourth column is the SN collection name (one of: 'EurocodeEN1993', 'DNV-C203-
 seawatercathodicprotection', 'DNV-C203-air').
 # The fifth column is all the stress point triplets in one string. The triplets are divided by the
 character '#'.
 # Note: it is possible to have multiple triplets for the same angle
 # (e.g. to compare fatigue life for different SN categories).

Beam end fatigue sensors

# Beam element name	SN collection	SN-curve	Stress filter	Node	option
Stress point(s)	SCF(s)				

The exported support section had no beam end fatigue sensors. To import beam end fatigue
 sensors, add them here.

EK-4. (devam) Bağlı yaylar yöntemiyle tekil kazığın Ashes ortamındaki kodu

About Tubular joint fatigue sensors

Fatigue analysis of tubular joints are different from beam end fatigue.

MORE DOC TO BE ADDED.

Tubular joint fatigue sensors

# Beam element name	SN collection	SN-curve	Stress filter	Local joint name
Side				

The exported support section had no tubular joint fatigue sensors. To import tubular joint fatigue sensors, add them here.

About Joints

Joints are not required, but have to be defined to add joint fatigue sensors (keyword: 'Tubular joint fatigue sensors').

The 'Joint name' column (first column) is the joint local name and must be: 1) An alphanumeric string,

2. Unique for this support section (file), and 3. Cannot contain whitespace.

The 'Chord elements' column is a list of element local names that constitute the chord of the joint.

There must be 1 or 2 chord elements.

The 'Brace elements' column is a list of element local names that constitute the braces of the joint.

There is 1 element per brace.

The '[Hard coded SCFs]' column is optional. If it is used it must have 4 strictly positive scalars.

The list (string) of chord or brace element names and SCFs cannot have white space and the elements are divided by the character: '&'.

The element local names for chords and braces must be defined in this file in the members sections (keyword: 'Members').

Joints

# Joint name	Chord elements	Brace elements	[Hard coded SCFs]
--------------	----------------	----------------	-------------------

The exported support section had no joints. To import joints, add them here.

About Transforms

The support section structure can be scaled, translated or rotated by defining one or more transformations.

Valid transforms are scale, translate and rotate. The transformations will be applied in the order specified.

Note that if this structure is imported onto another structure, translations will be ignored,

since the structure will be connected to the existing one.

Examples

Translate structure [dx, dy, dz]

Translate 10 20 30

Rotate structure 90 deg around x axis at node 10. If no Node parameter is given,

the rotation will be performed around the global origin.

Rotate 90 0 0 Node 10

EK-4. (devam) Bağlı yaylar yöntemiyle tekil kazığın Ashes ortamındaki kodu

```
# Scale structure to 50 %, while keeping node 12 fixed:
# Scale 0.5 Node 12
```

Transforms

```
# About Table
# A table can contain various data that can be used in multiple contexts.
#
# A table entry should specify the header in the following layout:
# Table
# <UniqueName>
# <ColumnName1> <ColumnName2> <ColumnName3> ...
#
# The table data should follow after the header as a table of values with the same
# number of columns as specified in the header.

# This support section has no tables.
```



Gazili olmak ayrıcalıktır