

# DENİZ ÜSTÜ RÜZGAR TÜRBİNLERİ: TEMEL TİPİ SEÇİMİ VE DENİZ TABANI ZEMİN ARAŞTIRMALARI

Nejan Huvaj<sup>1</sup>, Eray Caceoğlu<sup>2</sup>, Yelaman Baidol<sup>3</sup>

<sup>1,2,3</sup>Orta Doğu Teknik Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü

<sup>1</sup>ODTÜ Rüzgar Enerjisi Araştırma Merkezi RÜZGEM

<sup>1</sup>nejan@metu.edu.tr, <sup>2</sup>eray.caceoglu@metu.edu.tr, <sup>3</sup>yelaman.baidol@metu.edu.tr

## ÖZET

Bu çalışmada deniz üstü rüzgar türbinleri için kullanılabilen farklı temel tipleri, temel tipi seçimini etkileyen faktörler ve gereken deniz tabanı zemin araştırma çalışmaları ele alınmıştır. Dünyada farklı ülkelerde deniz üstü rüzgar türbin temelleri ile ilgili kullanılmakta olan mevcut uluslararası standartlar incelenerek özet olarak sunulmuştur. Bu bildirinin amacı deniz üstü rüzgar enerjisi ile ilgili yapılması gereken deniz tabanı saha araştırmaları ile ilgili genel bir bilgilendirme sunmaktır. Bu sunumun, ülkemizde deniz üstü rüzgar türbinleri projelerine yönelik olarak bir tartışma-paylaşım ortamı sağlayacağı da düşünülmektedir.

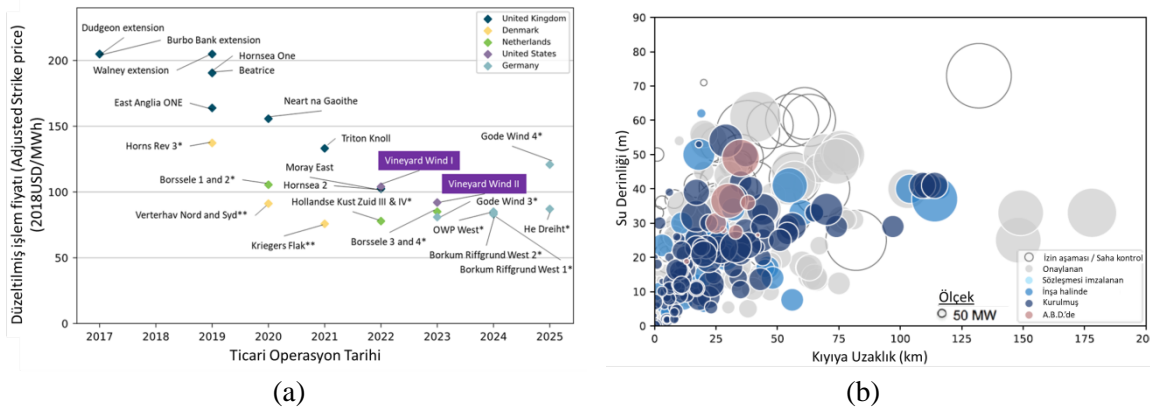
## 1. DENİZ ÜSTÜ RÜZGAR TÜRBİNLERİ

Deniz üstü rüzgar türbini (DRT) çiftliklerinin ilki 1991’de Danimarka’nın Vindeby kasabasında kıydan 2 km uzaklıkta ve 4 m su derinliğinde (11 adet, rotor çapı 35 m olan her biri 450 kW rüzgar türbini) yapılmış, ve bu tarihten itibaren de bu sektör özellikle Danimarka, Almanya, Birleşik Krallık, Hollanda gibi Avrupa ülkelerinde, özellikle Kuzey Denizi’ne yerleştirilen çiftlikler ile giderek büyümüştür. Bu büyümenin başlıca sebebi açık denizlerde tutarlı/devamlılık gösteren ve yüksek rüzgar hızı potansiyelinin karaya göre daha fazla olmasıdır.

2018 yıl sonu itibariyle Avrupa’da elektrik şebeke bağlantısı yapılmış (operasyonel olan) toplam 105 adet DRT çiftliği bulunmaktadır, bunların 39 adedi (1975 adet tekil rüzgar türbini ve toplam 8183 MW kapasite) Birleşik Krallık’ta, 25 adedi (1305 adet tekil rüzgar türbini ve toplam 6380 MW) Almanya’da, 14 adedi (514 adet tekil rüzgar türbini ve toplam 1329 MW) Danimarka’dadır. Yalnızca 2018 yılında kurulumu yapılmış DRT çiftlikleri Çin’de 2652 MW, Birleşik Krallık’ta 2120 MW, Almanya’da 835 MW, Danimarka’da 28 MW’tır [1, 12]. 2018 yılı itibariyle tüm dünyada mevcut deniz üstü rüzgar enerjisi kapasitesi ise 22592 MW’dır ve bunun 17979 MW’ı Avrupa’dadır [1, 12]. Deniz üstü rüzgar enerjisindeki güncel trendler [1, 2]’den özetlenerek aşağıda sunulmaktadır:

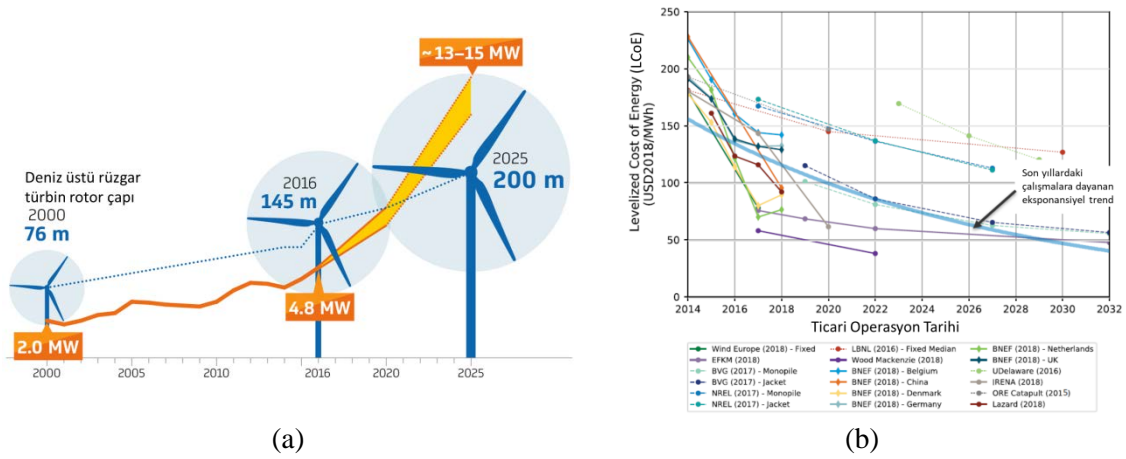
- *Deniz üstü rüzgar enerjisi yarışmalarında kazanan fiyat (strike price) yıllar içinde giderek düşmektedir* (Şekil 1a). Şekil 1a’da, uluslararası farklı projelerin rakamlarında benzerlik sağlanabilmesi için kontrat süresi, elektrik grid bağlantısı ve gelir mekanizması ile ilgili düzeltmeler yapılarak rakamlar verilmiştir [1]. 2017-2019 yıllarında operasyona giren projelerde yaklaşık \$200/MWh olan rakamın 2024-2025’te operasyona girecek projelerde \$75/MWh’ye düştüğü görülmektedir. Ayrıca Amerika’daki ilk DRT çiftliği olacak olan, Massachusetts eyaleti yakınında, karadan 15 mil uzaklıkta, ortalama 42 m su derinliğindeki (tekil kazık temel tipi olan) Vineyard Wind projesi Faz-1 ve Faz-2 de (her iki faz bittiğinde, her birinin kapasitesi 9,5 MW olan toplam kapasite 800 MW) Şekil 1a’da görülmektedir.

- *Yapılan deniz üstü rüzgar türbinlerinde deniz su derinliği yıllar içinde giderek artmaktadır* [1, 2]. 2006-2007 yıllarında operasyon halindeki DRT çiftliklerinde ortalama su derinliği 20 m civarında iken, 2017-2018 yıllarında 30 m'dir ve 2022'lerde ortalamanın 40 m olması beklenmektedir. Bu artışın sebepleri rüzgar türbini teknolojileri ve mühendisliğindeki gelişmeler, kurulum maliyetlerindeki düşüş ve yüzer temelli türbinlerin gelişmesi olarak belirtilmektedir [2]. 2018 Kasım ayında Birleşik Krallık'taki Crowne Estate ajansı, yarışmaya açtığı alanların su derinliğini 50 m'den 60 m'ye çıkarmıştır [1]. Şekil 2(b)'de deniz tabanına sabitlenmiş temel tipi olan türbinler için su derinliği ile kıyıya olan uzaklık arasındaki ilişki görülmektedir. Ayrıca yüzer temelli (floating) DRT'lerinde, Japonya'da su derinliği 120 m olan "yarı-batırılabilir (semisubmersible)" tip, Birleşik Krallık'ta 100 m ve Norveç'te ise 220 m su derinliğinde "spar" tipi yüzer temelli türbinlerin kurulumu yapılmıştır [1].



**Şekil 1.** (a) Düzeltilmiş işlem fiyatı USD/MWh planlanan elektrik satışı olarak, İngiltere, Danimarka, Hollanda, A.B.D. ve Almanya deniz üstü rüzgar yarışmaları rakamları (\*grid bağlantı ve proje geliştirme maliyeti eklenmiş, \*\*grid bağlantı maliyeti eklenmiş ve kontrat süresi düzeltilmesi yapılmış) [1], (b) Deniz tabanına sabitlenmiş temelleri olan DRT için su derinliği ve kıyıya uzaklık ilişkisi [1].

- *Deniz üstü rüzgar türbinlerinin rotor çapı ve güç kapasitesi giderek artmaktadır* (Şekil 2a). Şekil 2a'da görüleceği gibi 2000 yıllarında Avrupa'da yeni yerleştirilen deniz üstü rüzgar türbinlerinin ortalama nominal kapasitesi 2,0 MW iken, 2016 yılında 4,8 MW olmuştur. 2017 yılında 8 MW türbinler operasyonda olup, 9,5 MW türbin tanıtımı yapılmış, ve 2019'da 12 MW prototip mevcut olup, 2025'te ise 13-15 MW türbinlerin sektöre girmesi beklenmektedir. Ayrıca DRT çiftliklerinin büyüklüğü de artmaktadır. 1990'da Avrupa'daki bir DRT çiftliğinin toplam kapasitesi ortalama 5 MW iken, 2017'de 475 MW'dır ve 1200 MW inşaat aşamasındadır (Birleşik Krallık'ta Hornsea rüzgar çiftliği) [3].
- *Deniz üstü rüzgar çiftliklerinde LCoE azalmaktadır* (Şekil 2b). Şekil 2b'de görüleceği gibi son yıllarda yapılan çalışmalara dayanarak, deniz tabanına sabitlenmiş tipte temelleri olan rüzgar çiftliklerinin 2018 yılında \$120/MWh olan LCoE değerinin 2030 yılında \$50/MWh'ye düşeceği öngörülmektedir [3]. Yüzer tipte temelleri olan DRT çiftliklerinde ise 2018 yılında \$175/MWh olan LCoE değerinin 2030 yılında \$70/MWh'ye düşeceği öngörülmektedir. Ayrıca bir DRT yaşam döngüsü maliyet analizinde en büyük parça olan CapEx değerlerinin 2002 yıllarında \$1500/kW değerlerinden başlayarak 2014'lere kadar artış gösterdiği (2014'lerde ortalama \$5500/kW), ancak bu tarihten sonra bir düşüş gözlemlendiği ve 2018 yılında global kapasite-ağırlıklı ortalama CapEx değerinin \$4350/kW'ye geldiği rapor edilmektedir [1]. Avrupa'da 2019 yılında bir proje için CapEx değeri \$2870/kW olarak rapor edilmiştir [1].



**Şekil 2.** (a) Avrupa’da yeni kurulan tekil türbinlerin ortalama kurulmuş kapasitesi ve değişen rotor çapları (2025 için tahminler üreticiler ve işletmeciler tarafından yapılmıştır, veri kaynağı: WindEurope 2017, infografikler Ahnen & Enkel tarafından hazırlanmıştır) [3], (b) Dünyada deniz tabanına sabitlenmiş tipte temelleri olan DRT çiftliklerinin LcoE değerleri ve 2017-2018 yıllarında yapılmış olan çalışmalara dayanan trend [1].

- *Deniz üstü rüzgar türbinlerinde deniz ekosisteminin korunması giderek daha çok ön plana çıkmaktadır.* Çevre koruma açısından deniz üstü rüzgar türbinleri özel ve çok katı regülasyonlara uymak zorundadırlar. Kuşlar için yavrulama ve dinlenme bölgeleri olan alanlar uygun olmayan alan ilan edilmektedir. DRT temellerinin denizde imalatı (çakma-vibrasyon-delme vb) operasyonlarında düşük-gürültülü imalat sağlayan yeni teknolojiler geliştirilmektedir. Örneğin, Hollanda’da Delft Teknik Üniversitesi ve partnerlerinin yürütmekte olduğu “nazık kazık çakma (gentle driving of piles)” projesinde, memeliler ve balıklar için zarar verici seviyede olan kazık çakma gürültü seviyesinin azaltılması için düşük frekans-yüksek frekans vibratörler ile tekil kazık (monopile) çakma operasyonu üzerine çalışılmaktadır [4].

## 2. DENİZ ÜSTÜ RÜZGAR TÜRBİNLERİ İÇİN GEOTEKNİK MÜHENDİSLİĞİ VE TEMEL ÇEŞİTLERİ

DRT yatırım maliyetleri kıyıya yakın ve sığ sulardaki bir türbin sahası için 2009 yılındaki rakamlara göre ortalama 2,0-2,2 milyon €/MW mertebelerinde olabilmektedir [5]. Toplam yatırım maliyeti içinde türbin temelini maliyetteki payına örnek vermek açısından Danimarka’daki en büyük 2 DRT sahası (Horns Rev (80 adet 2 MW türbin, tekil kazık temelli) ve Nysted (72 adet 2,3 MW türbin, ağırlık tipi temelli)) incelenebilir. 2009’daki rakamlara göre her iki projede, temellerin toplam maliyet içindeki payı ortalama olarak %21’dir [5], karadaki bir türbin için ise temelin maliyeti tüm maliyet içinde yaklaşık %5-9’dur. Diğer kalemlerden olan, türbin, ve ulaşım ve kurulumu %49’unu, denizde ara istasyon (trafo) ve kablolu maliyeti (deniz içinde DRT’leri ve ara istasyonu birbirine bağlayan kablolar, ara istasyonun kendisi ve burada toplanan elektriğin karaya iletimini sağlayan kablolar) ise %16’sını oluşturmaktadır [5]. Bu göstermektedir ki, DRT projelerinde türbin temeli en yüksek maliyeti olan kalemlerden biridir ve rüzgar çiftliğini “rekabetçi maliyetli (cost-competitive)” yapmada en önemli rollerden birine sahiptir.

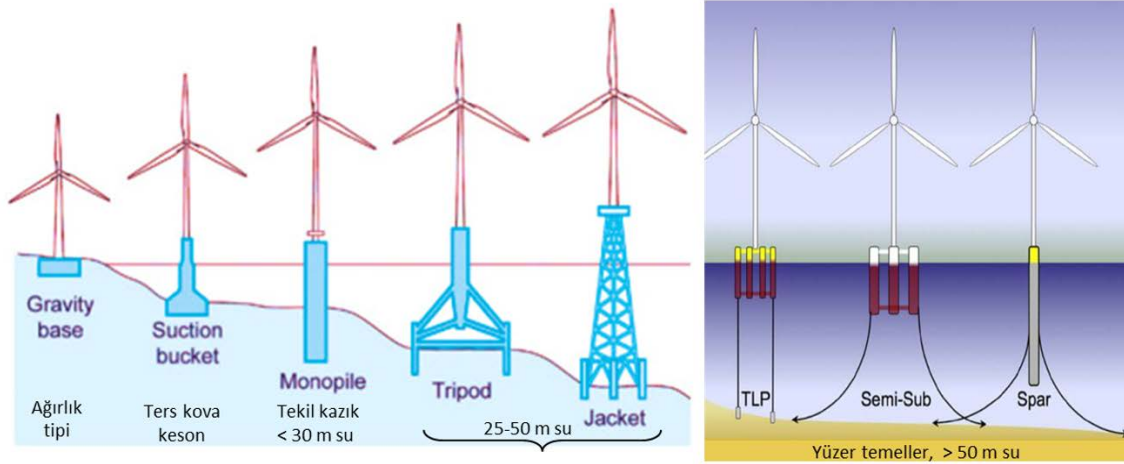
Hızlı gelişen DRT sektörü, aynı zamanda geoteknik mühendisleri için de ilgi çekici bir iş sahası oluşturmaktadır. Ancak, deniz zemini ile ilgili çalışmalarda bazı zorluklarla karşılaşabilmektedir [6]:

- Zemin etütleri genellikle özel gemilerin kullanımını gerektirdiği için yüksek maliyetlidir.
- Zemin koşulları, yüksek karbonat içeriği, gaz içeriği, örselenmemiş numune alımında gereken hassas ve özel yöntemler, deniz tabanı doğal afet problemleri, sağlam (rijit) tabaka altında zayıf (yumuşak) tabakada zımbalama göçmesi (punch through) problemi vb gibi nadir rastlanan durumlar gösterebilir.
- Yapıya uygulanan yükler yüksek oranda çevresel kaynaklı ve tekrarlı yüklerdir. Ayrıca, bu kuvvetler 120 MN·m gibi yüksek momentlere neden olabilmektedir [7].
- Karadaki projelerden farklı olarak, inşaat esnasında karşılaşılan beklenmedik bir durum için tasarımda değişiklik yapılması genellikle mümkün değildir, veya çok zordur.

Bu bölümde DRT'lerinde kullanılan temel tipleri hakkında genel bilgi verilecek ve gerekli deniz tabanı zemin çalışmaları ile ilgili özet bilgiler sunulacaktır.

DRT tasarımında kullanılan IEC 61400-3 kodlu standart [8], temel tasarımı için ISO 19900 standardını [9] (petrol ve doğal gaz endüstrisinin ihtiyaçlarına göre hazırlanmış bir standarttır) referans gösterse de bunun dışındaki şartnamelerin de kullanımına izin vermektedir [8, 9].

DRT'lerinde kullanılmakta olan temeller 4 gruba ayrılmaktadır. Bunlar: (1) Kazıklı temeller (tekil kazıklı, grup kazıklı, jacket (kafesli sistemli kazıklı temel)), (2) Ağırlık tipi temeller, (3) Vakumlu kova keson tip temeller, (4) Yüzer tip temeller'dir. Temel tipi seçimini genel olarak su derinliği, arazi koşulları, türbin çeşitleri, rüzgar hızı, dalga yüksekliği, vb. faktörler etkilemektedir. Şekil 3'te farklı temel tipleri ve kullanıldıkları su derinlikleri gösterilmektedir [10, 11].



Şekil 3. DRT'lerinde kullanılan temel tipleri ve kullanıldıkları yaklaşık su derinlikleri [10, 11]

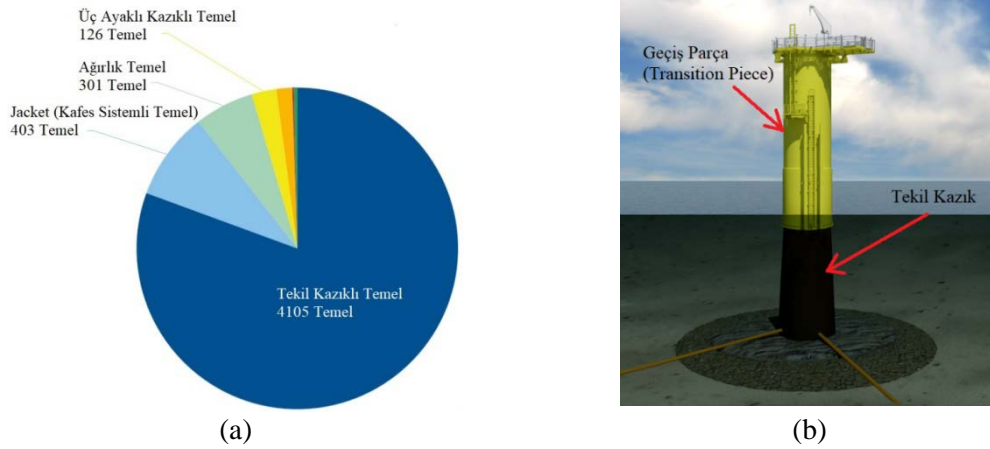
## 2.1. KAZIKLI TEMELLER

Çekme ve sıkışma yüklerini temelden deniz tabanı zeminine aktaran kazıklı temeller DRT'lerinde en yaygın olarak kullanılan temel tipidir (Şekil 3, Şekil 4). 2018 yılında kurulumu yapılan deniz üstü rüzgar türbinlerinde temellerin %75'ini tekil kazıklar, %25'ini ise jacket'lar oluşturmuştur [6, 7, 12]. Kazıklı temeller, büyük çaplı çelik borular kullanılarak inşa edilmesi kolay olmasının yanı sıra, diğer temel tiplerine göre daha ekonomik olabilmektedir. Bu tip temeller deniz tabanına çakılarak, foraj yapılarak veya vibrasyon yöntemi ile yerleştirilmektedir.

Yerleştirme derinliği (tekil kazık uzunluğu) genellikle çevresel ve zemin şartlarına göre 5 ila 120 m arasında değişmektedir, kazık çapı ise 2 m ila 8 m veya daha fazla olabilmektedir [6, 7, 12].

### 2.1.1. TEKİL KAZIKLI TEMELLER

Tekil kazıklı temelerde genellikle aerodinamik ve hidrodinamik yükler yapı üzerinden kazığa kesme kuvveti ve eğilme momenti olarak transfer edilerek deniz tabanındaki zemine yanal yük olarak aktarılmaktadır. Bu tip temelerde türbin kulelerinin, geçiş parçaları (Şekil 4b) (geçiş parçaları temel borularına konularak boruların deniz tabanına çakılırken borularda dönel ve dikeylik hataları oluşmasını engeller) kullanılarak temele kolayca bağlanabilmesinin yanı sıra dalga, akım ve buz yüklerinin tasarımının ve analizinin açık bir biçimde yapılabilmesi bu tip temelerin yaygınlığının nedenleri arasında sayılabilir. Tekil kazıklı temelerin diğer bazı avantajları: (1) deniz tabanında asgari hazırlık gerektirmesi, (2) Deniz tabanındaki deformasyon ve oyulmalara veya buz akımına karşı dayanıklı olması, (3) Boruların üretiminin nispeten ucuz olması, (4) Sınırlı zemin alanının kullanılmasıdır (rüzgar çiftliği için ekolojiktir) [14]. Tekil kazıklı temelerin ana dezavantajları ise çakılarak yerleştirildiği zaman çevre ve canlılar açısından sorunlar yaşanması [4, 14]; belli su derinliklerine kadar uygulanabilir/ekonomik olması; çok derin deniz tabanına yerleştirilmesini gerektiren durumlarda uygulaması çok pahalı ve yerleştirme sırasında burkulma olasılığı bulunmasıdır [14]. Tekil kazıklı temeller ayrıca yanal destekler (strut) ile desteklenebilirler. Standart tekil kazıklar 30 m su derinliğine kadar kullanılmaktadır. Desteklenmişleri ise 30-40 m su derinliklerine uygun görülmektedirler. Genellikle desteklenmiş tekil kazıklı temelerin homojen olmayan zeminlerde kullanılması daha uygun olmaktadır.



**Şekil 4.** (a) 2018 yılı sonu itibariyle elektrik şebekesine bağlanmış (operasyonel) olan DRT'lerinde kullanılan temel tiplerinin paylaşımı (Kaynak: WindEurope Offshore Wind in Europe), (b) Bir tekil kazık ve geçiş parçası

### 2.1.2. GRUP KAZIKLI TEMELLER

Grup kazıklı temeller genellikle üç (tripod) veya dört ayaklıdır, ve 25 ve 50 m arası su derinliklerinde tercih edilmektedirler. Bu günlerde üç ayaklı kazıklı temeller kullanılmaktadır. Üç ayaklı kazıklı temeller tekil çelik boru, destekler ve çelik ayaklardan oluşmaktadır (Şekil 3). Jacket ve tekil kazıklı temellerin avantajlarından faydalanmak için bu tip temeller kullanılmaktadır. Türbin kulesinden gelen yük tekil çelik borudan transfer edilerek temel ayaklarına aktarılır. Üç ayaklı kazıklı temelleri kullanmanın en önemli avantajlarının biri bu tip temellerin ekstrem dalga durumlarındaki deniz geçiş bölgelerinde (transitional water regions) iyi bir opsiyon olmasıdır [15]. En büyük dezavantajları ise yerleştirilmesinin pahalı ve buz akımına karşı düşük dayanıklı olmasıdır (ince temel elemanları kullanılırsa) [16].

## 2.2. JACKET (KAFESLİ SİSTEMLİ KAZIKLI TEMELLER)

Kafes sistemli temeller yapının stabilitesi için deniz tabanına çakılarak yerleştirilen kazıklar üzerinde kurulmaktadır (Şekil 3). Kafes sistemli kazıklı temeller genellikle 25-50 m su derinliklerinde kullanılmaktadır. Bu temelleri çelik kazıklar, kafes sistemi ve geçiş elemanları oluşturur [13]. Kafes sistemli temellerin rijit olması sayesinde ekstrem koşullarda kullanılması uygun bulunmaktadır [16]. Tekil kazık (monopile) sistemindeki kazıklara kıyasla, kafes sisteminde kullanılan kazıklar daha ince-uzun ve daha küçük çaplıdır. Bunun yanı sıra bu tip temellerin en önemli avantajlarından biri ise tekil kazıklı temele göre zemin şartlarına daha az hassas olmasıdır. Bu temellerin kompleks yapımından dolayı üretiminin daha pahalı olması kafes sistemli temellerin dezavantajı olarak sayılabilir [13, 16].

## 2.3. AĞIRLIK TEMELLER

Ağırlık temeller betonarme veya balast malzemeyle doldurulmuş çelik keson kullanılarak yapılmaktadır. Bu temellerin şekli genelde dairesel (Şekil 3) olmasına rağmen inşa edilmesini kolaylaştırmak için kare kesitli de yapılmaktadır [16]. Rüzgar ve dalga yüklerine karşı kendi öz ağırlığıyla dayanıklılık gösterebilmektedir. Ağırlık temeller genellikle oturma ve taşıma gücü dağılımından dolayı homojen zemin için uygun görülmesine rağmen neredeyse 0'dan 25 m'ye kadar su derinliklerinde bulunan bütün zeminlerde kullanılmaktadır. Bu tip temellerde çekme yükünden kaçınılması gerektiğinden dolayı yeterli öz ağırlık sağlayarak tasarımı yapılmaktadır [16]. Ağırlık temellerin inşa edilmesi (üretimi) tekil kazıklı temellere göre daha ucuz olabilmektedir. Fakat ağır yük taşıma teknelerinin kullanılması ve deniz tabanı hazırlıklarının yapılması gerekliliğinden dolayı bu tip temellerin yerleştirilmesi daha yüksek maliyetli olduğu görülmektedir. Bu temellerin önemli avantajlarından biri tamamen veya kısmen tamamlanmış olarak kolayca taşınabilmesidir [16].

## 2.4. VAKUMLU KOVA KESON TİP TEMELLER

Kova keson temeller (Şekil 3) ağırlık temeller ile şekil ve boyut olarak aynıdır. Ancak yerleştirilme metodu diğer temellerden ayıran özelliğidir. Yüksek su derinlikleri için kova keson çapları 12 – 15 m'ye kadar olabilmektedir. Kova kesonlar üç ayaklı temellerde kazıklar yerine de kullanılabilir. Bu tip temellerin tasarımında tekil kova keson temellerde devrilme momenti kritik olarak görülmektedir. Çoklu kova keson temellerde ise çekme yüküne karşı dayanımına göre tasarlanmaktadır [16]. Kova keson tip temellerin özel bir yerleştirme yöntemi vardır. Kovanın açık olan alt ucu deniz tabanı zemin hizasına getirilir, kova içindeki su pompalanarak çıkarılır, ve bunun sayesinde bastırıcı güç veya emiş gücü oluşturularak kova deniz zemini içine bastırılır [7]. Killi zeminlerde keson içiyle dışı arasında oluşan basınç farklılığından dolayı kova keson deniz dibine oturmaktadır. Kumlu zeminlerde ise kovanın çevresindeki zeminlerde hidrolik eğim (gradyan) oluşmasından dolayı kova ucundaki zemin mukavemeti azalır, ve kovanın kolayca deniz dibine oturmasını sağlar. Bu durum sıkı kumlu zeminlerde bile görülmektedir [13]. Bu tip temellerin en önemli avantajları: yüksek su derinliklerinde de kullanılabilmesi, basit üretimi ve kolay taşınabilir olması, ucuz kurulumu olması, düşük maliyetli olması ve kova yanları (etek, skirt) sayesinde yanal dayanımının yüksek olmasıdır. Dünyadaki örneklerinden birkaçı: 2014 yılında Almanya'da, Borkum Riffgrund 1 DRT sahasında, 25 m su derinliğinde, kova çapı 8 m, kova etek yüksekliği 8 m olan, kum zeminde yapılan, 3,6 MW türbinler, ve 2013 yılında Birleşik Krallık'taki Dogger Bank DRT sahasında, 18 m su derinliğinde, kova çapı 14 m, kova etek yüksekliği 8 m olan türbinlerdir.

## 2.5. YÜZER TİP TEMELLER

Su derinliği yükseldikçe (> 50 m) çelik tekil kazık vb diğer temeller ekonomik açıdan fizibil olmaktan çıkmakta ve yüzer tip temellerin daha fizibil olduğu görülmektedir [13]. Yüzer tip temellerin kurulmasının kolay olması, ve kurulum sırasında deniz tabanına, çevreye çok zarar

vermemesi bu tip temellerin önemli avantajlarından sayılabilir [17]. Yüzer tip temeller, statik dengenin sağlanması için kullanılan yöntemlere göre üçe bölünmektedir: (1) Balast yüklerin türbin kulesinin altına bağlanarak türbinin dengesinin sağlandığı “Balast ile stabilize edilenler (Spar-Buoy)”, (2) Çelik halatlar kullanılarak türbin platformunun dengede tutulduğu “Mooring Line Stabilised (Tension Leg Platform)”, (3) Dağıtılmış kaldırma kuvveti vasıtasıyla dengede tutulan “Buoyancy Stabilised” olanlar [17, 13].

### 3. DENİZ ÜSTÜ RÜZGAR TÜRBİNLERİ İÇİN DENİZ TABANI ZEMİN ÇALIŞMALARI

DRT ile ilgili dünyada mevcut olan tasarım şartnameleri: Norveç DNV şartnameleri başta olmak üzere; International Electrotechnical Commission (IEC)’nin IEC 61400-1 “Design Requirements” (2005) ve IEC 61400-3 “Offshore wind turbines” (2009); Almanya Germanischer Lloyd (GL)’nin “Guideline for the Certification of Offshore Wind Turbines” (2005); Almanya Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH)’nin “Standard: Design of Offshore Wind Turbine Structures (2015)”, ve “Standard for Geotechnical Site and Route Surveys (2014)”; A.B.D.’nin American Bureau of Shipping, ABS #176 “Bottom-fixed wind turbines (Deniz tabanına sabitlenmiş temeli olan DRT)” ve ABS #195 “Floating wind turbines (Yüzer temelli DRT)”; Japonya Nippon Kokan Koji (NKK)’nin “Floating wind turbine structures (Yüzer DRT’ler)”; Danimarka’nın Danimarka Enerji Ajansı (Danish Energy Agency, DEA)’nin “Recommendation for technical approval of offshore wind turbines (2001)”dır. Dünya çapında DRT proje süreçlerinde yürütülen deniz tabanı saha araştırmaları için hazırlanmış şartnameler ise Tablo 1’de verilmiştir. Bu çalışmada dünyada en yaygın olarak tercih edilen şartname olan DNVGL-RP-C212 standardı ile bu standardın detaylar için referans gösterdiği ISSMGE (2005) ele alınacaktır [18, 19].

**Tablo 1.** Deniz tabanı zemin etüdü şartnameleri

Şartname Adı	Ülke	Yıl
ISO 19905-1: Petroleum and natural gas industries - Site specific assessment of mobile offshore units - Part 1: Jack-ups	İsviçre	2012
API 2000: Recommended Practice for Planning, Designing and Constructing Fixed Offshore Platforms - Working Stress Design	-	2000
DNVGL-RP-C212: Offshore soil mechanics and geotechnical engineering	Norveç	2017
DNVGL-ST-0126: Support structures for wind turbines	Norveç	2018
DNV-OS-J101: Design of Offshore Wind Turbine Structures	Norveç	2014
BSH No-7004: Standard Ground Investigations - Minimum requirements for geotechnical surveys and investigations into offshore wind energy structures, offshore stations and power cables	Almanya	2014
ISSMGE TC1: Geotechnical and Geophysical Investigations for Offshore and Nearshore Developments	Birleşik Krallık	2005
DS 472: Forudsætninger for vindmøllekonstruktioner I Danmark	Danimarka	2007

#### 3.1. DNVGL-RP-C212’YE GÖRE ZEMİN ETÜDÜ

##### 3.1.1. AMAÇ, KAPSAM VE PLANLAMA

Zemin etüdü, detaylı geoteknik tasarımı yapılacak olan temel için gerekli bütün zemin bilgilerini sağlamalıdır. Zemin etüdü süreci jeolojik çalışmalar, jeofizik incelemeler ve geoteknik araştırmalar olmak üzere üçe bölünebilir. Jeolojik çalışmalar, geoteknik araştırmalarda kullanılacak yöntemlerin seçiminde faydalı olabilir. Jeofizik incelemeler ise

geoteknik araştırmalar esnasında açılacak sondajların sayısı ve konumlarını belirlerken faydalı olacaktır. Geoteknik araştırmalar hem saha deneylerini hem de laboratuvar çalışmaları için gereken zemin örneklerinin alınmasını içerir.

Zemin etüdünün kapsamı ve yöntemi; inşa edilecek olan yapının tipi, büyüklüğü ve önemi ile zemin ve deniz tabanı koşulları dikkate alınarak belirlenmelidir. Sondajlar arasındaki mesafe ve sondaj derinliği, temel tasarımı ve imalatı için önemli olabilecek bütün katmanların yanal ve düşey değişimlerini belirleyecek şekilde seçilmelidir. DRT çiftliklerinde olduğu gibi birden fazla temel gerektiren durumlarda, zemin katmanları ve zemin taşıma gerilmeleri her bir temel veya temel grubu için uygun olarak belirlenmelidir. Zemin etüdü, olası zayıf oluşumların yapı ve temelin güvenliği ve performansını etkilemeyeceği bir derinliğe kadar gerekli bilgileri sağlamalıdır. Zemin etüdü, yapı ve temelin etkileyebilecek doğal afet (örneğin deniz tabanı heyelanları, deprem fay hatları ve çamur volkanları) risklerinin araştırılması için de gereklidir.

Zemin etüdünün erken aşamalarında, toplanan bilgiler planlanan yapının fizibilitesini göstermeli ve aynı zamanda proje için en uygun bölgenin belirlenmesine olanak sağlamalıdır. Son aşamalarda ise, detaylı bir temel tasarımı için gerekli olan tüm bilgiler kapsamlı şekilde sağlanmalıdır. Yapılacak işlemlerin sıralaması aşağıdaki gibi olmalıdır.

- Varsa, bölgesel mevcut jeolojik, jeofizik ve geoteknik bilgiler ile mevcut temellerin performans bilgilerinin toplanması
- Jeofizik incelemelerin deniz tabanı batimetrisi ve incelemeleri ile deniz tabanı altı profillerini içerecek şekilde yapılması
- Geoteknik saha araştırmalarının ön tasarımlara göre yapılması
- Yapı ve temelin yeri ve tipi belirlendikten sonra, belirlenen yerde, detaylı geoteknik araştırmalar ile topoğrafik haritalama ve deniz tabanı zemin araştırmalarının yapılması

### 3.1.2. JEOFİZİK ZEMİN İNCELEMELERİ VE GEOTEKNİK ARAŞTIRMALAR

Geoteknik araştırmaların optimize edilmesi için, jeofizik incelemeler geoteknik araştırmalardan önce yapılmalıdır. Jeofizik incelemeler, temeli etkileyebilecek deniz tabanı özelliklerini içerecek şekilde batimetrisinin belirlenmesi için gereklidir. Jeolojik riskler araştırılmalı ve haritalanmalıdır. Jeofizik zemin incelemeleri deniz tabanı altı katmanları içermelidir. Erozyon kanalları gibi deniz tabanı altı oluşumlar da haritalanmalıdır.

Geoteknik araştırmaların kapsamı (örneğin sondaj derinliği ve sayısı, arazi deneyleri ile laboratuvarda yapılacak deneylerin çeşidi ve sayısı) seçilen temel tipinin tasarımı için gerekli bütün bilgileri sağlayacak şekilde olmalıdır. Araştırmalar, yapının neden olduğu yükmeden etkilenen bütün zemin hacmini kapsamak zorundadır. Bu hacim, yükler ile temel boyutları ve tipine göre değişir. Geoteknik araştırmaların planlanması ve uygulanması ile ilgili daha detaylı bilgi ISSMGE (2005)'de verilmiştir. Sondaj sayısı ve saha deneylerinin uygulanacağı lokasyonlar, zemin şartlarının değişkenliği hesaba katılarak belirlenmelidir. Zemin katmanlarının kalınlıklarının ve derinliklerinin büyük farklılıklar gösterdiği veya yüksek değişkenlik göstere zemin özellikleri bulunduğu durumlarda, daha fazla sondaj ve deney uygulanması gerekebilir. Bütün sondajlarda, sürekli numune elde edilmesi hedeflenmelidir.

### 3.1.3. ZEMİN ÖZELLİKLERİ İLE İLGİLİ BİLGİ

Deniz tabanı zeminleri ile ilgili bilgi, doğrudan ölçülerek veya fiziksel ya da deneysel ilişkiler kullanılarak bulunabilir ve en az şunlardan oluşur: zemin tanımlamaları, zeminin doğal birim hacim ağırlığı, zemin danelerinin özgül ağırlığı, doğal su içeriği, boşluk oranı, dane büyüklüğü



dağılımı (granülometri eğrisi), karbonatlı ve organik içerik yüzdesi, plastik ve likit limitler ile plastisite ve likidite indeksleri, Kumlu zeminlerde minimum ve maksimum boşluk oranları ile görelî sıklık (tercihen piezokoni penetrasyon deneyi (PCPT) korelasyonları ile), ilave boşluk suyu basıncı, ön konsolidasyon basıncı ve ön konsolidasyon oranı, geçirgenlik (permeabilite), kayma dalga hızı. Temel tasarımı için gerekli olan zemin kesme mukavemeti parametreleri şunları içermelidir:

- Kum katmanları için, üç eksenli basınç veya basit kesme deneyi gibi testler sonucunda elde edilen içsel sürtünme açısı (testlerde saha koşullarındaki görelî yoğunluk ve tasarımın yaratacağı gerilme büyüklükleri esas alınmalıdır.)
- Kil katmanları için, konsolidasyonsuz drenajsız (UU), izotropik veya anizotropik olarak konsolide edilmiş konsolidasyonlu drenajsız (CU) üç eksenli basınç deneyleri, konsolidasyonlu basit kesme deneyi (DSS) gibi testlerle elde edilen drenajsız kesme mukavemeti (hem örselenmemiş (pik), hem de yoğrulmuş mukavemet değerleri elde edilmelidir).

Zeminin yapıyla olan statik ve dinamik etkileşiminin analizi ile temeldeki oturma ve deplasmanların hesaplanabilmesi için deformasyon parametreleri gereklidir. Bu parametreler şunları içerir:

- Kayma dalga hızı kullanılarak hesaplanan küçük gerinimlerde kayma modülü,  $G_{max}$
- Kayma modülünün gerinime bağlı azalış fonksiyonu
- Zeminin sönümlenme oranının gerinime bağlı fonksiyonu
- Konsolidasyon parametreleri, örneğin sıkışma indisi, konsolidasyon katsayısı

PCPT, T-bar veya top penetrasyon deneyleri gibi saha deneyleri, belirli sayıda numune alınarak yapılan laboratuvar deneylerine kıyasla, derinlik boyunca daha sürekli zemin profilleri elde edilmesini sağlayabilir. Bu yüzden, zemin etütlerinde saha deneylerinin kullanılması önerilir. Kumlarda, görelî sıklık (relative density) tahminlerinin güvenilir şekilde yapılabilmesi için PCPT yapılması gereklidir. Killerde, PCPT ve T-bar testleri dolaylı olarak drenajsız kesme mukavemeti-derinlik profilleri sağlar ve kimi zaman belirli sayıda numune alınması ve laboratuvar deneyleri ile tespit edilemeyecek lokal zayıf tabakaların belirlenmesine yardımcı olabilir. Saha deneyleri kullanılarak mukavemet değerleri laboratuvar deneyleri ile ilişkisi baz alınarak tahmin edilir. Bu ilişki, laboratuvar deneyleri ile elde edilen sonuçlar ile kalibre edilmelidir. Özellikle sığ derinliklerdeki zemin-boru-kablo etkileşimi için sığ derinliklerdeki zeminde T-bar deneyi tercih edilebilmektedir. Presiyometre ve dilatometre deneyleri tekil kazıklı temellerde yanal zemin dayanımları açısından faydalı veriler sağlarlar.

Laboratuvar test programı, detaylı temel tasarımı için yeterli verileri sağlayacak şekilde, zeminin mukavemet ve deformasyon özelliklerini belirlemek üzere değişik deney çeşitleri ve yeterli sayıda numune içermelidir. Kum ve kil gibi zeminlerde, basit kesme (DSS) ve üç eksenli basınç deneyleri mukavemet parametrelerini belirlemek için uygun test çeşitleridir. Tasarımları dalga yükü tarafından kontrol edilen temellerin stabilite analizi, kapasite tahmini ve rijitlik değerlendirmeleri için, tekrarlı yükler altında drenajsız deneyler (çevrimsel DSS, çevrimsel üç eksenli basınç deneyleri) yapılmalıdır.

### 3.1.4. KAZIKLI TEMELLERDE ZEMİN ETÜDÜ

DNVGL-RP-C212 şartnamesinde bütün farklı temel çeşitleri için gereken zemin etüdü şartları belirtilmiş olmasına rağmen, bu bildirimizde en çok tercih edilen temel çeşidi olduğu için yalnızca tekil kazıklı temellerle ilgili zemin etüdlerine yer verilecektir.

Kazıklı temellerde, öngörülen kazık penetrasyon derinliğinin altına uzanan derin sondajlar yapılmalı, PCPT uygulanmalı ve zemin örnekleri alınmalıdır. Tekil kazık aksel yük taşıma kapasitesi, kazık uzunluğu boyunca (özellikle kazığın alt yarısında, derinlerde yer alan) bütün zemin tabakalarının kayma mukavemetinden etkilenir. Eğer tasarımda kazık alt ucunun girdiği (örneğin sıkı kum gibi) bir tabakadan yüksek uç direnci sağlanacağı öngörülüyorsa, özellikle bu tabakanın dayanım özellikleri ve tabaka üst sınırı (üst kotu), tabakanın kalınlığı ve bunların yanal devamlılığı doğru bir şekilde belirlenmelidir. Kumlu zeminlerdeki saha araştırmalarında, özellikle derinlikle yüksek devamlılık oranı olacak şekilde PCPT deneylerinin sağlıklı bir şekilde yapılmasına önem ve öncelik verilmelidir. PCPT deneyinde çok sıkı kumların yüksek dayanımını ölçebilecek şekilde, en az 100 MPa uç direnci ölçebilen, PCPT sistemi kullanılmalıdır. Killi zeminlerde yapılan saha araştırmalarında ise, numune alımı ve laboratuvar deneyleri daha önemli olup, olabildiğince fazla sayıda laboratuvar deneyi yapılabilecek şekilde numuneler alınmasına önem ve öncelik verilmelidir.

Jacket türü temellerde kullanılan uzun-ince kazıklarda, kazık yanal yük taşıma kapasitesine deniz tabanından itibaren  $10 \times$  kazık çapı derinliğe kadar olan yüzeye yakın zeminler etki edeceğinden, bu sığ zemin birimlerinden örnekler alınması ve laboratuvar deneyleri yapılması önem arz etmektedir. Bu numuneler bir kaç adet derin sondajda elde edilebileceği gibi, derin ve sığ sondajlar birbirini komplemente edecek şekilde birkaç adet sığ sondaj yapılarak numune alınması da düşünülebilir. Kazıklı temellerin yanal yüklere karşı tasarımında, hem PCPT gibi arazi deneyleri hem de numune alınarak laboratuvar deneyleri, birlikte, yeterli derinliğe kadar yapılmalıdır. Jacket'lardaki uzun-ince kazıklardan farklı olarak, büyük çaplı tekil kazık temellerin tasarımı için, gereken araştırma derinliğinin, öngörülen maksimum kazık penetrasyon derinliğinden kazık yarıçapı kadar daha derin olması yeterlidir.

Eksenel yüklere karşı kazıklı temel tasarımı için, en az bir CPT ve yakınında numune almak için bir sondaj uygulanmalıdır. Ancak, bu 1 CPT ve 1 numune alınan sondaj önerisi, deniz üstü petrol ve gaz endüstrisi uygulamalarındaki jacket temeller ile DRT çiftliklerinde deniz tabanındaki ara istasyon (trafo) içindir; DRT jacket temeller için genelde her ikisi yapılmaz. Araştırma derinliği, öngörülen kazık penetrasyon derinliğine ek olarak bir etki derinliğini içermelidir. Etki derinliği zemindeki tabakalara bağlıdır ve olası bir zımbalama göçmesi (punch through) ihtimalini saf dışı bırakacak bir derinliğe kadar ulaşmalıdır. Eğer zımbalama göçmesi ile ilgili daha detaylı hesaplamalar yapılmamış ise, bu derinlik, kazığın ucundan üç-dört kazık çapı kadar aşağıya kadar alınmalıdır. Belirli bir zemin tabakasından kazık uç direnci açısından yararlanılabileceği durumlarda, bu tabakanın özellikleri ve tabakanın üst sınırının (kotunun) yatay düzlemdeki değişkenliğine karar verebilmek için daha geniş bir kapsam gerekebilir.

Tipik bir jacket temel için yapılacak olan zemin araştırmalarında, jacket'in her bir ayağının bulunacağı yerde bir derin sondaj yapılır (bu sondajlar, ayakların birinin bulunduğu yerde PCPT, diğer ayağın bulunduğu yerde ise numune alınarak sondaj yapılacak şekilde planlanabilir). Çok sayıda türbin bulunan DRT çiftliklerinde, her bir jacket'in yapılacağı lokasyonda, jacket'ın ayaklarının orta noktasında tek bir derin sondaj da yapılabilir. Eğer alanda önceden yapılmış jeoteknik çalışma ve sondaj bilgileri mevcut ise, veya güvenilir jeofizik çalışmalar yapılmış ise ve sahanın jeolojisi ile ilgili bilgiler bu sahada üniform zemin koşulları bulunacağını öngörebiliyorsa, daha az sayıda sondaj da yeterli görülebilir.

## 3.2. ISSMGE (2005)'YE GÖRE ZEMİN ETÜDÜ

### 3.2.1. GİRİŞ, PLANLAMA ve BÜRO ÇALIŞMALARI

DRT projelerinde doğru temel tipi seçimi ve seçilen temelin doğru tasarlanmasını ve boyutlandırılmasını sağlayacak şekilde, elde edilmesi gereken bilgiler aşağıdaki bilgileri içerir:

- Deniz tabanı topoğrafyası ve morfolojisi (örneğin kaya mostraları vb)
- Zemin ve kaya birimlerinin tanımlanması, kalınlıkları, tabakalanmaları ve yatay ve düşey yönlerde devamlılığı/değişkenliği
- Dinamik (tekrarlı) yükler, yükleme hızı, zeminin hassasiyeti gibi faktörlerin etkileri
- Deniz dibinde oyulma ihtimali
- Deniz tabanı şev stabilitesi
- Sahadaki deprem tehlike değerlendirmesi
- Sığ gazlar ve hidratlar

Gerekli bilgilerin niceliği verilen şu faktörlere bağlıdır:

- Planlanan yapının türü
- Öngörülen inşaat/kurulum yöntemi
- Su derinliği
- Hali hazırda var olan bölgesel bilgiler
- Proje aşamaları (fizibilite çalışması veya nihai tasarım gibi)
- Temele binen yük çeşitleri
- İnsan ve çevreye olan kabul edilebilir risk

ISSMGE planlama aşamalarını büro çalışmaları, topoğrafik ve jeofizik incelemeler ve geoteknik araştırmalar ve laboratuvar çalışmaları olarak üç aşamada inceler. Geoteknik tasarım ve bununla ilgili gereken saha araştırmaları yapının fonksiyonuna ve genel tasarım konseptine, çevresel yüklerle (dalga yüklerinin büyüklüğü ve periyodu, dalga yükleri kompozisyonu, bölgedeki akımlar, buz kütlelerinin yol açacağı yükler, sahada olası deprem yükleri) bağlıdır. Bu aşamada projenin hem tasarımı hem imalatını, pratik ve lojistik olarak etkileyebilecek bütün konular düşünülmelidir.

Büro çalışmaları esnasında uygun bilgiler içeren bütün kaynakların taranması, toplanması ve elde edilen bilgilerin değerlendirilmesi gerekmektedir. Bu bilgilere örnek olarak şunlar verilebilir:

- Deniz tabanı batimetri
- Deniz tabanı jeolojisi
- Sismik aktivite kayıtları
- Var olan geoteknik bilgiler
- Bölgede varsa geçmişte yapılmış temeller ile ilgili bilgiler
- Dalga, akım ve rüzgâr verilerini içeren meteorolojik ve oşinografik (metocean) bilgiler

Deniz tabanı kablo güzergahları, deniz tabanından çıkarılacak kum kaynak alanları gibi bazı çalışmalar, teknik olmayan ekstra bilgiler toplanmasını da içerebilir (örneğin gemi trafiği yoğunluğu, çevre koruma bölgeleri, balıkçılık, askeri faaliyetler, batık gemi-arkeolojik kalıntı, izinler vb).

### 3.2.4. JEOFİZİK ZEMİN İNCELEMELERİ

Şartnamenin bu kısmındaki esaslar DNVGL-RP-C212 ile aynı olmakla beraber, ISSMGE (2005) şartnamesi araştırma yöntemleri ile ilgili daha detaylı bilgi sunmaktadır.

- Deniz tabanı batimetri ve topoğrafyası için: echosounding, swath echosounding
- Deniz tabanı özellikleri ve engeller için: sidescan sonar, deniz tabanındaki mevcut boru, kablo, metalik atık, askeri cihaz-mühimmat vb metalik objeleri tespit etmek için magnetometre,
- Deniz tabanı jeolojik bilgiler için: sismik yansıma yöntemi (akustik enerjinin, sesin, deniz tabanından veya jeolojik oluşumlardan yansıması esası kullanılır, deniz tabanından 50 m derinlikler ile ilgili bilgi verebilir, bu yöntem ile jeolojik oluşumlar arasındaki sınırlar belirlenmesine rağmen daha çok nitel sonuçların elde edileceği ve sondaj ve numuneler kullanılarak bu sonuçları bütünleyici geoteknik değerlendirmeler yapılması gerekir), yüksek çözünürlüklü sismik kırılma yöntemi (özellikle deniz tabanından ilk 3 m derinlikle ilgili detaylı bilgi edinmek için uygulanır), elektrik özdirenç/rezistivite yöntemi (kil-kum gibi farklı tabakaların birbirinden ayırd edilmesini sağlamaz, ancak genel olarak ciddi oranda rijitlik-sertlik farkı olan tabaka sınırlarını (örneğin zemin-kaya) tespit etmede tercih edilir. Elektrik enerjisi kullanılarak deniz tabanı yakınındaki zeminin özdirençinin ölçülmesi esasına dayanır. Bunun için çok elektrotlu akım kablosunun çekildiği bir çekme kızak kullanılır. Bu yöntemde sonuçlar su derinliği ve tuzluluk oranına bağlı olduğundan sistemin kalibrasyonu dikkatli yapılmalı ve operasyon prosedürlerinde detaylara önem verilmelidir).

### 3.2.5. GEOTEKNİK ARAŞTIRMALARDA KULLANILAN ARAZİ DENEYLERİ

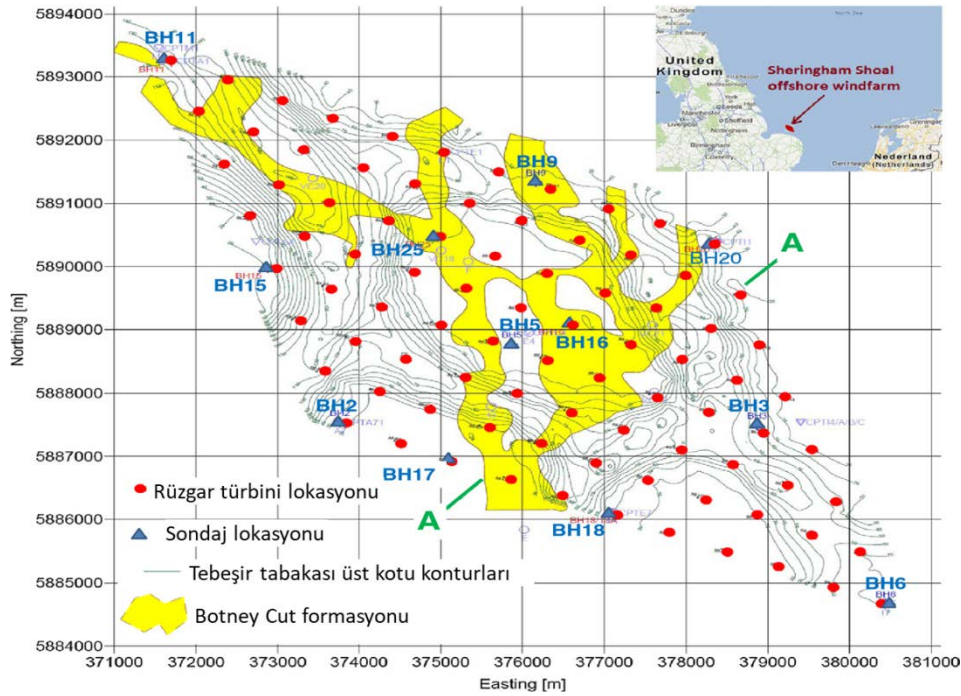
Geoteknik araştırmalar esnasında deniz tabanında sondajlar yapılır, laboratuvar deneylerinde kullanılmak üzere zemin numuneleri alınır ve arazi deneyleri yapılır. Numune alma yöntemleri ve kullanılması gereken numune alma tüpleri ile ilgili bilgiler ISSMGE (2005) şartnamesinde verilmiştir. Örneğin killi birimlerde numune almak için piston numune alıcı, veya bu mümkün değilse ince cidarlı itki-numune alıcı kullanılması gerekmektedir. Rutin deniz tabanı geoteknik çalışmalarında yapılan saha testlerinin en başında, ilave boşluk suyu basıncı ölçümleri de alınan PCPT koni penetrasyon deneyi gelmektedir. Bunun yanı sıra killi zeminler için arazi vane (kanatlı) kesme deneyi ve T-bar deneyleri de yapılmaktadır. Burada sadece PCPT'ye kısaca değinilecektir.

#### 3.2.5.1. KONİ PENETRASYON TESTİ (CPT) VE PİEZOKONİ PENETRASYON TESTİ (PCPT)

Deniz üstü geoteknik mühendisliğinde en yaygın olarak kullanılan test türleri CPT ve PCPT'dir. Bu test ile, zemin türleri ve tabakalarının kalınlıkları ile birlikte temel tasarımında gerekli olan bazı geoteknik parametreler (örneğin killi birimlerde drenajsız kayma mukavemeti, kumlarda göreceli sıkılık ve içsel sürtünme açısı vb) elde edilebilir. CPT testi sırasında, deniz tabanına, koni şeklinde ucu olan ve sensörler ile basınç ve sürtünme ölçümleri yapabilen bir prop (ölçüm cihazı), belli bir hızda (genellikle 2 cm/sn) deniz tabanına derinlikle devamlı olarak itilir. Zeminin koni şeklindeki ucun girişine gösterdiği direnç koni ucundaki sensörler ve prop ile zemin arasındaki yanıl sürtünme kaydedilir. PCPT testlerinde ise ekstra olarak zeminin içinde bu koninin girmesi nedeniyle oluşan ilave boşluk suyu basınçları, koni ucundaki gözenekli bir bölgede ölçülür. Bu ölçüm de zemin tabakalarının özelliklerinin belirlenmesinde, geçirgenlik, konsolidasyon durumu gibi önemli bilgiler elde edilmesini sağlar. Sensörler ile ölçülen veriler anında deniz yüzeyindeki gemideki veri toplayıcı sistemden görülebilir.

### 3.3. ÖRNEK ZEMİN ETÜDÜ ÇALIŞMASI

Bu kısımda Birleşik Krallık'ta şu anda işletmede olan Sheringham Shoal çiftliğinde yapılan zemin etüdü çalışmalarına yer verilen bir çalışma özetlenecektir [20]. Bu çiftlikte 317 MW üretim kapasitesine sahip 88 rüzgar türbini bulunmaktadır. Çiftlik, Kuzey Denizi'nde kıyından 20 km açıklıkta yer almaktadır ve ortalama su derinliği 20 metredir. Projede kullanılan temel tipi tekil kazıklar olup bu kazıkların çapı 4,7 – 5,7 m, penetrasyon derinlikleri ise 27 – 37 m'dir. 2005-2006 yıllarında ön saha araştırmaları yapılmış, 2008 yılında ise kapsamlı araştırmalar yapılmıştır. Benzer sahalardan elde edilen önceki tecrübelerden faydalanılmış, ve DNV No 30.4 (1992) ve DNV-OS-J101 (2011) şartnamelerine uygun olarak saha araştırmaları planlanmıştır. Önerilen minimum sondaj sayısı, rüzgar türbini sayısının %10'u olsa da [21], bölgede 9 yerine 5'i ön araştırmalar sırasında, 7'si de ana araştırmalar sırasında olmak üzere toplam 12 deniz tabanı sondajı uygulanmıştır. Bunun sebebi, bölgedeki zemin koşullarının görece karmaşık olduğunun düşünülmesidir. Sondajların yerleri belirlenirken, yapılmış olan sismik araştırmalar ve jeolojik bilgileri tamamlayıcı nitelikte, zeminden yeterli noktadan numuneler alınması planlanmış, ayrıca tüm DRT çiftlik sahasının köşelerinde birer adet ve ortasında olmak üzere sondaj yerleri belirlenmiştir. Uygulanan sondaj derinlikleri deniz tabanından itibaren 26 – 70 m'dir. Bu sondajlar arasında 4-5 km mesafe bulunmaktadır. Uygulanan sondajların ve planlanan rüzgar türbinlerinin konumları Şekil 5'te gösterilmiştir. Sahada aşırı konsolide olmuş kil birimleri ve sıkı kum birimleri mevcut olup, bunların altında farklı ayrışma derecelerinde tebeşir kaya tabakası bulunmaktadır. Sondaj konumlarının ve derinliklerinin öngörülen bütün katmanlar ile ilgili bilgi verecek şekilde seçilmesine özen gösterilmiştir. Yapılan geoteknik araştırmalar, sahip olunan önbilgiler kullanılarak tahmin edilen zemin koşulları ile örtüşmüştür.



Şekil 5. Sheringham Shoal DRT çiftliğindeki sondaj yerleri ve rüzgar türbini konumları [20]

### 4. SONUÇ

Türkiye için deniz üstü rüzgar enerjisi projelerinin geliştirilmesi açısından öncelikli olarak yapılması gereken çalışmalar şu şekilde aklı gelmektedir:

- (1) denizlerdeki yerel rüzgar kaynağı (potansiyeli) yüksek hassasiyetle ve detaylı bir şekilde ölçülerek belirlenmelidir;
- (2) belirlenecek potansiyel yerlerde metocean istasyonları kurularak

uzun süreli ölçümler alınmalıdır; (3) deniz üstü rüzgar potansiyeli atlası hazırlanmalı, ve deniz üstü rüzgar türbinlerini uzun yıllardır kullanmakta olan diğer ülkelerde olduğu gibi, “Deniz Mekansal Planlama (Marine Spatial planning)” çalışması ile en uygun sahalar belirlenmelidir; (4) ayrıca özellikle bir deprem ülkesi olan Türkiye için, dünya çapında uygulanmakta olan deniz tabanı saha araştırması şartnameleri göz önüne alınarak, Türkçe ve İngilizce olarak deniz tabanı saha araştırmaları şartnameleri (daha sonra da DRT tasarım şartnameleri) hazırlanmalıdır.

## KAYNAKLAR

- [1] U.S. Department of Energy, Office of Energy Efficiency and Renewable Energy, 2018 Offshore Wind Technologies Market Report, 94 pp. <https://www.energy.gov/eere/wind/downloads/2018-offshore-wind-market-report>.
- [2] <https://www.energy.gov/eere/wind/articles/top-trends-offshore-wind>
- [3] Wagner, Andres (2019), German Offshore Wind Energy Foundation, "Overview of the Development of offshore wind energy in Germany", Türk-Alman Enerji Forumu, 2-3 Temmuz 2019, T.C. Enerji Bakanlığı
- [4] <https://grow-offshorewind.nl/project/gentle-driving-of-piles>
- [5] Wind Energy – The Facts (2009) European Wind Energy Association (EWEA) <https://www.wind-energy-the-facts.org/development-and-investment-costs-of-offshore-wind-power.html>
- [6] Randolph, M.F. (2011). *Offshore geotechnical engineering*. London, New York: Spon Press,
- [7] Byrne, B.W., Houlsby, G.T., (2003). Foundations for Offshore Wind Turbines, Phil. Trans. Royal Society of London, Vol. 361, pp.2909-2930.
- [8] International Electrotechnical Committee. *Wind turbines - Part 3: Design requirements for offshore wind turbines*. IEC 61400-3:2009
- [9] International Organization for Standardization. *Petroleum and natural gas industries -- General requirements for offshore structures*. ISO 19900:2019. İsviçre.
- [10] <https://www.windpowerengineering.com/projects/offshore-wind/foundations-that-float/>
- [11] Moulas, D., Shafiee, M., Mehmanparast, A. (2017), Damage Analysis of Ship Collisions with Offshore Wind Turbine Foundations, *Ocean Engineering*, 143, p.149-162
- [12] WindEurope (2019) Offshore Wind in Europe: Key Trends and Statistics 2018, 40 p. <https://windeurope.org/about-wind/statistics/offshore/european-offshore-wind-industry-key-trends-statistics-2018/>
- [13] Singh, B., Mistri, B., & Patel, R. (n.d.). Comparison of Foundation Systems for Offshore Wind Turbine Installation.
- [14] Bakmar, C. L. (2009). Design of Offshore Wind Turbine Support Structures: Selected topics in the field of geotechnical engineering. Aalborg: Department of Civil Engineering, Aalborg University. (DCE Thesis; No. 18).
- [15] Plodpradit, P., Dinh, V. N., & Kim, K. (2019). Tripod-Supported Offshore Wind Turbines: Modal and Coupled Analysis and a Parametric Study Using X-SEA and FAST. *Journal of Marine Science and Engineering*, 7(6), 181. doi:10.3390/jmse7060181
- [16] Westgate, Z.J., DeJong, J.T. (2005). Geotechnical Considerations for Offshore Wind Turbines
- [17] IRENA (2016), Floating Foundations: A Game Changer for Offshore Wind Power, International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi
- [18] DNV GL AS. *Offshore soil mechanics and geotechnical engineering*. DNVGL-RP-C212 (2017)
- [19] International Society for Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (2005). *Geotechnical and Geophysical Investigations for Offshore and Nearshore Developments*.
- [20] Le, T.M.H., Eiksund, G.R., Strøm & Saue, M. (2014). Geological and geotechnical characterisation for offshore wind turbine foundations: A case study of the Sheringham Shoal wind farm. *Engineering Geology*, 177, p.40-53
- [21] DNV GL AS. *Design of Offshore Wind Turbine Structures*. DNVGL-OS-J101 (2014).