



**Deniz-üstü Rüzgâr
Enerji Santrali
Bilgilendirme Notu**

Ekim 2024

TSKB

Hazırlayanlar

Azize Türkan – Kurumsal Bankacılık Pazarlama

Esra Ertemel – Kredi Portföy Yönetimi ve Analitiği

Özgücan Cengiz – Kurumsal Uyum

Tuğçe Çingay Ataş – Mühendislik

Yunus Akşin Pınar – Hukuk İşleri

Zümray Şentürk – Finansal Analiz

İÇİNDEKİLER

Şekiller	4
Grafikler	4
Tablolar	4
Kısaltmalar	5
1. Giriş	6
1.1. Yönetici Özeti	6
2. Deniz-üstü Rüzgâr Enerjisi Tarihsel Gelişimi	7
2.1. Dünya’da DRES Gelişimi	7
2.2. Türkiye’de DRES Gelişimi	8
3. Teknolojik Bileşenler ve Çalışma Prensipleri	10
3.1. Meteorolojik ve Oşinografik Parametreler	11
3.2. Rüzgâr Hızı ölçüm İstasyonları	12
3.3. Türbin Dizilimi ve Elektrik Üretim Potansiyeli	13
3.4. Türbin Teknolojisi	14
3.5. Kurulum Gemileri	14
3.6. Şebeke Bağlantısı	15
3.7. Rüzgâr Hızları ve Üretim Analizi (Karşılaştırmalı)	16
3.8. DRES Teknolojisinin Gelişimi - Teknolojik Yenilikler ve Gelecek Trendler	17
4. DRES Potansiyeli ve Gelişimindeki Engeller	18
4.1. Küresel Avantajlar ve Engeller	18
4.2. Türkiye’deki Avantajlar ve Engeller	18
4.2.1. Türkiye’de DRES Potansiyeli ve Önemi	18
4.2.2. Türkiye’deki DRES Avantajları	19
4.2.3. Türkiye’deki DRES Engelleri	20
5. Ekonomik Analiz	22
5.1. Maliyet Bileşenleri	22
5.2. Finansman Yapısı ve Teşvikler	22
5.3. Yatırım Getirisi ve Ekonomik Fayda Analizi	23
6. Çevresel ve Sosyal Etkiler	24
6.1. Çevresel ve Sosyal Etki Değerlendirmesi	24
6.2. Karbon Ayak İzi ve İklim Değişikliği ile Mücadele	25
7. Hukuki ve Düzenleyici Çerçeve	26
8. Gelecek Perspektifleri	28

Şekiller

Şekil 1: YEKA Alanları	9
Şekil 2: DRES'lerde Kullanılan Temel Tipleri	11
Şekil 3: DRES'lerde Meydana Gelen İzbölgesi.....	13
Şekil 4: DRES Türbini Kurulum Gemisi Örneği.....	14
Şekil 5: DRES'in Şebekeye Bağlanması (Üstten Görünüm)	15
Şekil 6: Türkiye DRES Potansiyeli Haritası.....	18
Şekil 7: DRES Yol Haritası	28

Grafikler

Grafik 1: 2014-2023 yılları DRES Kapasiteleri (MW).....	7
Grafik 2: DRES Kapasitelerinin Ülke Bazında Kırılımı (2023, GW).....	8

Tablolar

Tablo 1: DRES'lerde Kullanılan Temel Tipleri.....	12
Tablo 2: Maliyet Bileşenleri	22

Kısaltmalar

ABD	Amerika Birleşik Devletleri
APAC	Asya Pacific Accrediation Cooperation
BMDHS	Birleşmiş Milletler Deniz Hukuku Sözleşmesi
CNY	Çin Yuanı
ÇED	Çevresel Etki Değerlendirme
DRES	Deniz-üstü Rüzgâr Enerjisi Santrali
DÜRED	Denizüstü Rüzgâr Enerjisi Derneği
DMP	Deniz Mekânsal Planlaması
EÇG	Enerji Çalışma Grubu
EPDK	Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu
ETKB	Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı
FIT	Tarife Garantisi (Feed-in-Tariff)
GES	Güneş Enerjisi Santrali
GW	Gigavat
GWEC	Küresel Rüzgâr Enerjisi Konseyi (Global Wind Energy Council)
GWh	Gigavatsaat
IBRD	Uluslararası İmar ve Kalkınma Bankası
IEA	Uluslararası Enerji Ajansı
IPA	Avrupa Birliği Katılım Öncesi Yardım Aracı
kWh	Kilovatsaat
LCOE	Birime İndirgenmiş Elektrik Maliyeti
MSP	Maritime Spatial Planning (Deniz Mekânsal Planlaması)
MW	Megavat
MWh	Megavatsaat
PPA	Power Purchase Agreement (Satın Alma Sözleşmeleri)
REPA	Rüzgâr Enerjisi Potansiyeli Atlası
RES	Rüzgâr Enerjisi Santrali
TEİAŞ	Türkiye Elektrik İletim Anonim Şirketi
TSKB	Türkiye Sınai Kalkınma Bankası
TÜREB	Türkiye Rüzgâr Enerjisi Birliği
TWh	Teravatsaat
YEKA	Yenilenebilir Enerji Kaynak Alanı
YEKDEM	Yenilenebilir Enerji Kaynakları Destekleme Mekanizması

1. Giriş

1.1. Yönetici Özeti

Türkiye’de henüz deniz-üstü rüzgâr enerjisi santrali (DRES) yatırımı bulunmamaktadır. Türkiye’nin yenilenebilir enerji hedefleri doğrultusunda, DRES projeleri ülkenin enerji dönüşümünde önemli bir rol oynayacaktır. DRES’ler açık denizlerde rüzgâr türbinleri kullanarak elektrik üretimini gerçekleştiren temiz ve sürdürülebilir enerji tesisleri olup bu sayede sera gazı emisyonlarını azaltmada önemli bir rol oynarlar. Ayrıca, kıyı bölgelerine kıyasla daha fazla rüzgâr yakalayarak yüksek verimlilikle elektrik üretebilirler.

DRES projelerinin kurulacakları bölgeler için rüzgâr enerji potansiyeli, deniz derinliği ve taban yapısı, kıyıya uzaklığı, çevresel ve sosyal faktörler önem arz etmektedir. Bunlarla birlikte kurulacak DRES projesi alanının askeri yasak bölge ve eğitim-atış sahası içerisinde bulunmaması, deniz trafiğini engellememesi ve kıta sahanlığı açısından sorun teşkil etmemesi gerekmektedir. Ülkemizdeki denizlerin derinlikleri, topografik özellikleri, kıta sahanlığı mevzusu, finansal yapı ve yerel mevzuatlar çerçevesinde DRES gelişimi için gerekli izinlerin belirlenmesi, bu teknolojinin geliştirilmesinde rol oynamaktadır.

Mevcut durumda DRES’lerle ilgili bir mevzuatın bulunmaması, yüksek yatırım maliyetleri, DRES’lerin karasal RES projelerine göre daha uzun yatırım dönemi gerektirmesi, yüksek finansman maliyetleri, ileri teknoloji ihtiyacı gibi konular yatırımcının üstleneceği riskleri artırmaktadır. Bütün bu faktörlerin, potansiyel yatırımlar için finansman temininde çeşitli engeller doğurması güçlü ihtimal olarak değerlendirilmektedir.

DRES, genel olarak karbon ayak izini azaltma ve iklim değişikliğiyle mücadele konusunda önemli avantajlar sağlamaktadır. Fosil yakıtlı elektrik santrallerine alternatif olarak sera gazı emisyonlarını düşürmektedirler. Ancak, bu santrallerin ekosisteme etkileri de göz önünde bulundurulmalı ve dikkatlice yönetilmelidir.

Türkiye’de DRES’lerin kurulumu için yerel özelliklere dikkat edilerek gerekli ölçüm verilerinin toplanmasına, finansman yapısının ve mevzuatların belirlenmesine ihtiyaç bulunmaktadır.

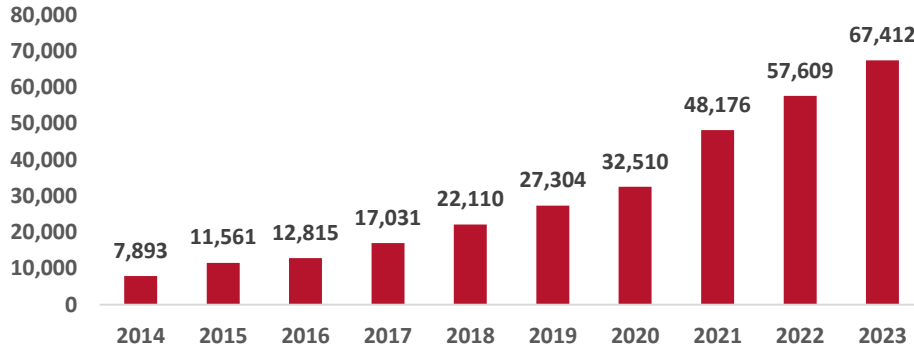
2. Deniz-üstü Rüzgâr Enerjisi Tarihsel Gelişimi

2.1. Dünya’da DRES Gelişimi

Dünyada ilk DRES 1991 yılında Danimarka’da 5 megavat (MW) kapasite ile işletmeye alınmış olup öncesinde pek çok kişi rüzgâr türbinlerini denizde çalıştırmanın pratik olmadığına inanmaktaydı. Başlangıçta Vindeby Santrali çoğunlukla rüzgâr enerjisi endüstrisini ve büyüyen ihracatı desteklemek için bir tanıtım projesi olarak görülmüştü. Vindeby endüstriyel ölçekte olmasa da ilk açık deniz rüzgâr enerjisi konseptinin uygulanabilirliğini kanıtlamıştır.¹

Küresel Rüzgâr Enerjisi Konseyi (GWEC) raporuna göre; 2022 yılı içerisinde 8,8 gigavat (GW) kapasitede DRES kurulumunun gerçekleşmesiyle birlikte DRES kapasitesi 64,3 GW’a ulaşmıştır. 2023 yılında DRES, 9,8 GW yeni kapasite ile toplam 67,4 GW’a ulaşmıştır. Bu kapasitenin yaklaşık yarısı 31,5 GW ile Çin’dedir. Rapora göre, 2023-2027 döneminde dünyada 130 GW kapasiteli DRES daha kurulması öngörülmektedir.² 2023 yılında sektörde tedarik zincirindeki ciddi fiyat artışları bazı projelerin fizibilitelelerinin tekrar değerlendirilmesine yol açmıştır. 2024 yılsonu ile birlikte toplamda 70 GW kapasitenin ihalesinin tamamlanması beklenmektedir.

Aşağıda 2014-2023 yılları arasındaki kümülatif kapasitelere bakıldığında gittikçe artış gösteren bir trendin olduğu görülmektedir.



Grafik 1: 2014-2023 yılları DRES Kapasiteleri (MW)

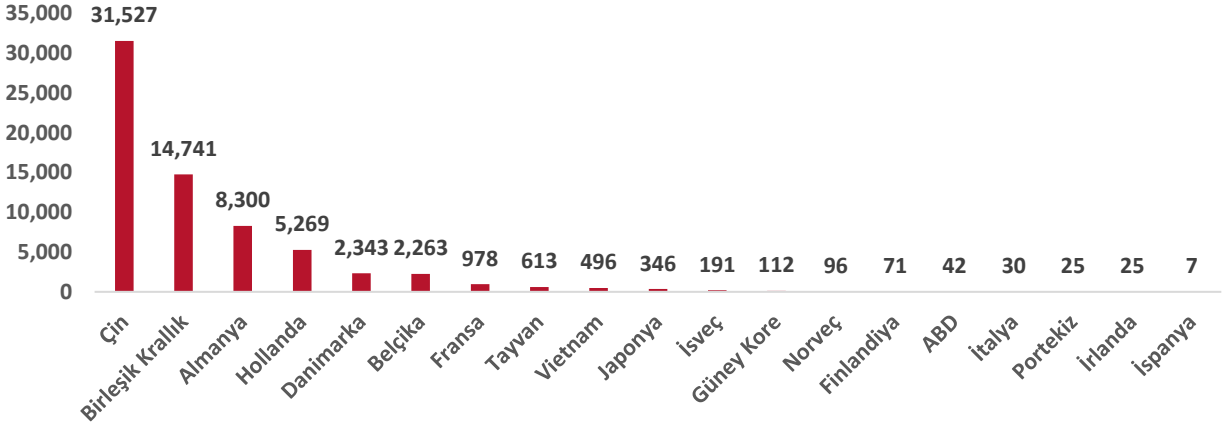
Kaynak: GWEC, TSKB

Aşağıdaki grafikte DRES’lerin 2023 yılı kapasitelerinin ülke bazlı kırılımı görülmektedir. DRES’lerde Avrupa ülkeleri, Birleşik Krallık, ABD ve Çin gibi büyük enerji oyuncuları, 2030 yılına kadar kapasitelerini sırasıyla 160 GW, 30 GW, 70 GW ve 100 GW seviyelerine çıkarmayı hedeflemektedir.³

¹ Orsted, 2019. <https://orsted.com/-/media/WWW/Docs/Corp/COM/explore/Making-green-energy-affordable-June-2019.pdf>

² Dünya Gazetesi. [https://www.dunya.com/sectorler/enerji/deniz-ustu-ruzgar-enerjisi-icin-bolgeler-belli-oldu-haberi-701015#:~:text=Bakan%C4%B1ktan%20a%C4%B1nan%20bilgiye%20g%C3%B6re%2C%20deniz,\(YEKA\)%20olarak%20tahsis%20edildi.](https://www.dunya.com/sectorler/enerji/deniz-ustu-ruzgar-enerjisi-icin-bolgeler-belli-oldu-haberi-701015#:~:text=Bakan%C4%B1ktan%20a%C4%B1nan%20bilgiye%20g%C3%B6re%2C%20deniz,(YEKA)%20olarak%20tahsis%20edildi.)

³ Yeşil Haber. <https://yesilhaber.net/deniz-ustu-resler-turkiyenin-elektrik-ve-yesil-hidrojen-gelecegi/>



Grafik 2: DRES Kapasitelerinin Ülke Bazında Kırılımı (2023, GW)

Kaynak: Küresel Rüzgâr Enerjisi Konseyi, Dünya Deniz-üstü Rüzgâr Enerjisi Forumu, TSKB

2.2. Türkiye’de DRES Gelişimi

Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı (ETKB) tarafından Saros, Gelibolu-Şarköy ve Kıyıköy’ün aday Yenilenebilir Enerji Kaynak Alanı (YEKA) olarak belirlenmesi⁴ ve 21.06.2018 tarihli 30455 sayılı Resmî Gazete’de yayımlanan toplam 1.200 MW gücündeki YEKA yarışması ilanı⁵ DRES ile ilgili ilk düzenlemelerdendir. Yarışmaya son tarih olan 23.10.2018 tarihine kadar başvuru olmamıştır.

2018 sonrasında mevzuat, teknik ve finansmana yönelik uluslararası işbirlikleri yürütülmüştür. 2018 yılında Danimarka Krallığı Enerji, Kamu Hizmetleri ve İklim Bakanlığı ile imzalanan mutabakat zaptına istinaden “Deniz-üstü Rüzgâr Enerjisi” çalışmaları⁶ ve 2019 yılı itibarıyla Avrupa Birliği Katılım Öncesi Yardım Aracı (IPA) Programı kapsamında Dünya Bankası ile yürütülen “Deniz-üstü Rüzgâr Enerjisi Saha Araştırmaları Projesi”⁷ kapsamında gerçekleştirilen çalışmalar ile ülkemizin DRES yol haritasının belirlenmesine katkı sağlanması amaçlanmıştır.

Türkiye’nin 2053 "Net Sıfır Emisyon" hedefleri doğrultusunda 2022 yılında yayımlanan Türkiye Ulusal Enerji Planı’nda 2035 yılına kadar DRES’lerde 5 GW kapasiteye ulaşılması hedeflenmektedir. Bu kapsamda 2023 yılında, Uluslararası İmar ve Kalkınma Bankası (IBRD) ile DRES üretimine yönelik yatırım potansiyelinin geliştirilmesi amacıyla teknik, çevresel, ekonomik ve yasal alanları içeren 7,98 milyon Euro tutarında Deniz Üstü Rüzgâr Enerjisini Destekleme Projesine İlişkin Hibe Anlaşması imzalanmıştır.⁸

⁴ ETKB, https://enerji.gov.tr//Media/Dizin/SGB/tr/Faaliyet_Raporlari/2018/691837-etkb_2018_yili_i%CC%87dare_faaliyet_raporu.pdf

⁵ Resmî Gazete, 2018, <https://www.resmigazete.gov.tr/ilanlar/eskiilanlar/2018/06/20180621-4.htm#%C3%8702>

⁶ ETKB, 2020.

https://enerji.gov.tr//Media/Dizin/SGB/tr/Faaliyet_Raporlari/2020/ETKB2020Y%C4%B1%C4%B1%C4%B0dareFaaliyetRaporu.pdf

⁷ ETKB, 2019.

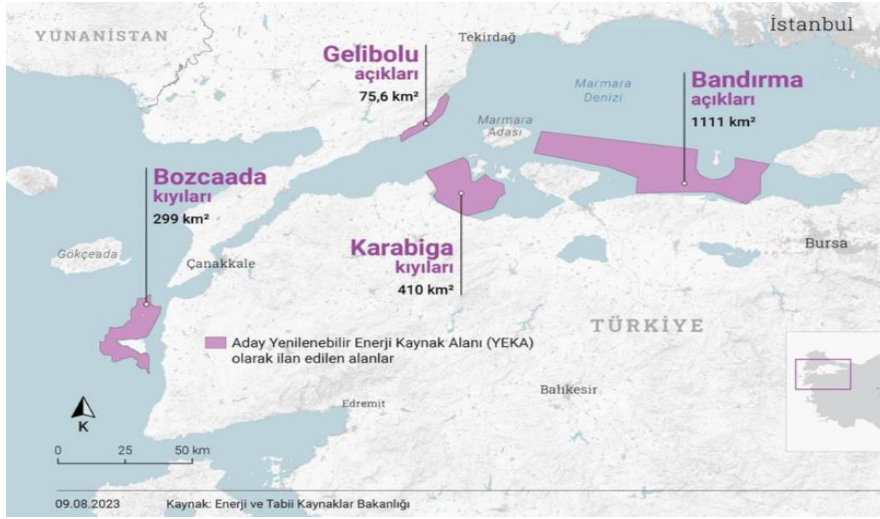
https://enerji.gov.tr//Media/Dizin/SGB/tr/Faaliyet_Raporlari/2019/ETKB2019Y%C4%B1%C4%B1FaaliyetRaporu.pdf

⁸ Resmî Gazete, 2023, <https://www.resmigazete.gov.tr/eskiler/2023/10/20231026-1.pdf>

2023 yılı Ağustos ayında ise DRES için aday YEKA belirlenmiştir.⁹ ETKB tarafından Bandırma açıklarında 1.111 km², Bozcaada açıklarında 299 km², Gelibolu açıklarında 75,6 km² ve Karabiga kıyılarındaki 410 km² alan DRES için aday YEKA olarak tahsis edilmiştir.¹⁰

12. Kalkınma Planı'nda (2024-2028) yerli aksam yükümlülüğü olan yeni YEKA ihalelerinin yapılması ve DRES YEKA projeleri geliştirilmesine yönelik çalışmaların yürütülmesi hedefler arasında belirtilmiştir.¹¹

2024 yılı Eylül ayında yayınlanan Orta Vadeli Program'da (2025-2027) da yenilenebilir enerji kaynaklarından elektrik üretiminin artırılarak enerjide ithal kaynaklara bağımlılığın azaltılacağı, yerli ürün kullanım şartı içerecek şekilde YEKA projelerinin geliştirileceği ve deniz üstü rüzgâr enerjisi potansiyelinin değerlendirilmesine yönelik çalışmaların yürütüleceği belirtilmiştir.



Şekil 1: YEKA Alanları

Kaynak: Dünya Gazetesi (9 Ağustos 2023)

Ayrıca Denizüstü Rüzgâr Enerjisi Yol Haritası ve Sanayi Envanteri kapsamında Çandarlı Limanı'nın "Deniz üstü Rüzgâr Enerjisi Üretim Bölgesi" olarak ilan edilmesi için hazırlıklar yapılmaktadır. Tüm bu gelişmeler ışığında Denizüstü Rüzgâr Enerjisi Derneği (DÜRED) Başkanı Murat Durak, Türkiye'nin 2040 yılına kadar 10 GW, 2050 yılına kadar ise 30 GW DRES kapasitesi hedefi koymasını gerektiğini belirtmektedir.¹²

⁹ Temiz Enerji, 2024. <https://temizenerji.org/2024/01/16/turkiyede-deniz-ustu-ruzgar-enerjisinde-en-son-teknolojiyi-kullanacagiz/>

¹⁰ Dünya Gazetesi. [https://www.dunya.com/sectorler/enerji/deniz-ustu-ruzgar-enerjisi-icin-bolgeler-belli-oldu-haberi-701015#:~:text=Bakanl%C4%B1ktan%20al%C4%B1nan%20bilgiye%20g%C3%B6re%2C%20deniz,\(YEKA\)%20olarak%20tahsis%20edildi.](https://www.dunya.com/sectorler/enerji/deniz-ustu-ruzgar-enerjisi-icin-bolgeler-belli-oldu-haberi-701015#:~:text=Bakanl%C4%B1ktan%20al%C4%B1nan%20bilgiye%20g%C3%B6re%2C%20deniz,(YEKA)%20olarak%20tahsis%20edildi.)

¹¹ T.C. Cumhurbaşkanlığı Strateji ve Bütçe Başkanlığı, 2023. https://www.sbb.gov.tr/wp-content/uploads/2023/12/On-ikinci-Kalkinma-Plani_2024-2028_11122023.pdf

¹² Temiz Enerji, 2024. <https://temizenerji.org/2024/01/16/turkiyede-deniz-ustu-ruzgar-enerjisinde-en-son-teknolojiyi-kullanacagiz/>

3. Teknolojik Bileşenler ve Çalışma Prensipleri

Deniz-üstü ve karasal rüzgâr enerjisi sistemleri arasında belirgin farklar bulunmaktadır. **Kurulum yerleri ve koşullar** açısından, deniz-üstü sistemler denizlerde veya okyanuslarda, kıydan birkaç kilometre uzaklıkta kurulur. Bu sistemler, genellikle daha güçlü ve sürekli rüzgâr sağlar, ancak tuzlu su ve zorlu hava koşulları ekipmanların ömrünü kısaltabilir. Karasal rüzgâr enerjisi sistemleri ise karasal alanlarda, genellikle açık arazilerde veya dağlık bölgelerde kurulmaktadır. Bu tür sistemler, deniz-üstü sistemlere göre daha düşük rüzgâr hızlarına ve daha değişken rüzgâr koşullarına maruz kalır. **Maliyet** açısından, deniz-üstü sistemlerin kurulum ve bakım maliyetleri genellikle daha yüksektir. Denizde kurulum yapmak, özel gemiler ve ekipman gerektirir ve zorlu hava koşulları nedeniyle bakım süreçleri daha karmaşıktır. Karasal rüzgâr enerjisi sistemleri ise daha düşük maliyetlerle kurulabilir ve bakım yapılabilir çünkü erişim daha kolaydır ve çevresel koşullar daha az zordur. **Enerji üretimi ve verimlilik açısından**, deniz-üstü sistemler genellikle daha yüksek ve sürekli rüzgâr hızları sayesinde kara sistemlerine göre daha fazla enerji üretir ve bu da verimliliği artırır. Karasal rüzgâr enerjisi sistemlerinde ise rüzgâr hızlarının daha düşük ve değişken olması enerji üretimini ve verimliliği sınırlayabilir. **Çevresel ve görsel etkiler** bakımından, deniz-üstü sistemler genellikle kara sistemlerinden daha az görünür, çünkü uzak mesafelerde kurulur. Ancak, deniz ekosistemleri üzerinde potansiyel etkileri göz önünde bulundurulmalıdır. Karasal rüzgâr sistemleri ise görsel etkiler ve gürültü gibi faktörler nedeniyle yerel topluluklardan direnç görebilir ve yaban hayatı üzerinde olumsuz etkileri olabilir. **Bakım ve erişim** konularında, deniz-üstü sistemlerin bakımı daha karmaşıktır ve deniz koşulları nedeniyle daha zor olabilir. Karasal sistemlerde ise bakım işlemleri genellikle daha kolay ve ucuzdur çünkü türbinlere erişim daha basittir.

Her iki sistem de yenilenebilir enerji kaynakları olarak önemli avantajlar sunar ve hangi sistemin daha uygun olduğu, projenin konumuna ve hedeflerine bağlıdır. Örneğin, geniş kıyı şeritlerine ve yüksek rüzgâr potansiyeline sahip ülkeler deniz-üstü rüzgâr enerjisi sistemlerini tercih edebilirken, rüzgârlı karasal alanları olan bölgeler karasal rüzgâr enerjisi sistemlerini daha uygun bulabilir.

Karasal RES'lerin kurulumundan DRES'lere geçişi destekleyen çeşitli teknik ve sosyal faktörler bulunmaktadır. Teknik açıdan en önemli faktörler arasında ortalama rüzgâr hızlarının deniz üstünde daha yüksek ve türbinlerin maruz kaldığı türbülansların daha düşük olması sayılabilir.¹³ Üretilen enerji, rüzgâr hızıyla doğrudan ilintili olduğu için, denizlerde daha yüksek bir enerji potansiyeli bulunmaktadır. DRES'lerin yerleşik alanlardan uzak olması nedeniyle görsel etkinin ve gürültü kirliliğinin azalmasında etkisi olmakla birlikte deniz yaşamı üzerinde potansiyel etkisi bulunmaktadır. Ayrıca santrallerin kurulumu ve işletmesi sırasında limanların kullanımında artışa ve istihdam yaratımına katkı sağlanmaktadır.

RES projelerinin yaşam döngüsü genel olarak 5 ana başlıkta toplanabilir.¹⁴ Bu başlıklar; projenin fizibilitesi, proje geliştirme, inşaat, işletme ve devreden çıkarma (decommissioning) olarak özetlenebilir.

¹³ Serri, L. ve diğerleri, "Floating offshore wind farms in Italy beyond 2030 and beyond 2060: Preliminary results of a techno-economic assessment", Applied Sciences (2020), **10**, 8899

¹⁴ AWS Truepower (2015), Metocean data needs assessment for U.S. offshore wind energy, Prepared for US Department of Energy, Contract DE-EE0005372: National Offshore Wind Energy Resource and Design Data Campaign – Analysis and Collaboration

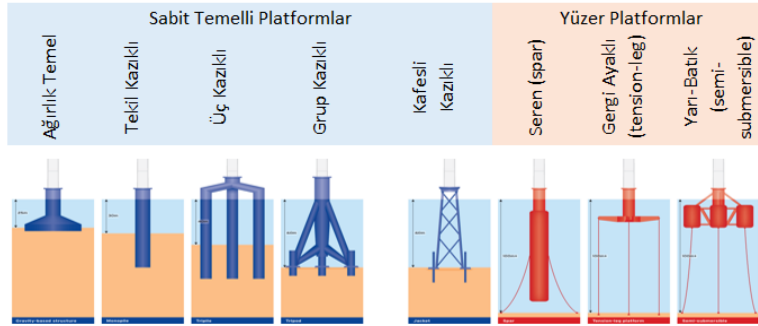
3.1. Meteorolojik ve Oşinografik Parametreler

RES'lerin sağlıklı bir şekilde tasarlanması ve geliştirilmesi için özellikle projenin fizibilite döneminde çeşitli teknik değerler düşük belirsizliklerle ölçülmüş olmalıdır. DRES'lerin geliştirilmesi için yapılacak ölçümler hem meteorolojik (ortalama rüzgâr hızları, yönleri, sıcaklık, nem oranı vb.) hem de oşinografik (dalga boyu, ortalama dalga hızı, akım vb.) parametreleri içermelidir.¹⁴

Meteorolojik faktörler santralin nereye kurulması gerektiği, sahaya uygun türbin tipinin belirlenmesi, santraldeki türbinlerin dizilimi ve üretilecek potansiyel enerjinin hesaplanmasında girdi sağlamaktadır. İlgili meteorolojik parametrelerin ölçülmesinde kullanılan rüzgâr ölçüm istasyonlarında, en az 1 (bir) sene süre ile ortalama rüzgâr hızları, rüzgâr yönü hava yoğunluğu, bağıl nem, sıcaklık ve basınç gibi parametreler kaydedilmektedir. Böylelikle kurulması planlanan RES'in yerel rüzgâr koşulları belirlenerek rüzgâr akış modellerine girdi sağlanmaktadır. Bu nümerik modeller ile, rüzgâr türbinlerinin olası konumu ve güç eğrileri kullanılarak bölgenin potansiyel elektrik üretim değerleri hesaplanmaktadır. İlgili rüzgâr ölçümlerinin, oluşacak belirsizlikleri azaltmak için farklı yüksekliklerde gerçekleştirilmesi ve düşünülen türbin göbek yüksekliğine ekstrapole edilmesi önem taşımaktadır.

Bölgenin oşinografik özellikleri ise suyun fiziksel özellikleri (sıcaklık, yoğunluk, tuzluluk vb.), dalga, akıntı, su seviyesi gibi parametreleri içermektedir. Bu özellikler incelenerek kurulacak deniz üstü türbinlerinin yapısal yükleme hesaplamaları ve korozyon tahminleri yapılmakta, şantiye erişimi ve inşaat planlaması gibi konular için de girdi sağlanmaktadır.^{14,14}

Meteorolojik ve oşinografik parametrelerin yanı sıra, DRES'lerin kurulacağı denizlerdeki su derinlikleri ve deniz tabanı topografyası (batimetri) da kurulacak DRES'in temel tipi seçimi için oldukça önemli bir unsurdur. Temel tipleri sabit temelli ve yüzer platformlar olarak 2 kategoriye ayrılmaktadır.



Şekil 2: DRES'lerde Kullanılan Temel Tipleri

Kaynak: <https://www.windpowermonthly.com/article/1210054/foundations-types-depth-limits-alternative-solutions>

Çelik ve beton temellerden oluşan sabit temelli kurulumlar DRES pazarında hâlâ hâkim konumdadır; tekil kazıklı ve kafesli kazıklı temeller, 2022 sonu itibarıyla toplam kurulumun sırasıyla %70 ve %17'sini oluşturmaktadır.¹⁵

¹⁵ Küresel Rüzgâr Enerjisi Konseyi, "Global Offshore Wind Report", 2024. <https://gwec.net/global-offshore-wind-report-2024/>

Aşağıdaki tabloda ilgili temellerin kurulabileceği derinlikler ve özellikleri özetlenmektedir:¹⁶

Tablo 1: DRES'lerde Kullanılan Temel Tipleri¹⁶

Temel Tipi	Derinlik (m)	Özellikler
Ağırlık temeller	<25	<ul style="list-style-type: none"> • Sığ sular için tercih edilen bir temel tipidir. • Betonarme veya balast malzemeyle doldurulmuş çelik kesonları kullanılarak hazırlanırlar. • Bu temeller için deniz tabanında hazırlık yapılması gerekmektedir. • Rüzgâr ve dalga kaynaklı yüklere öz ağırlığı ile karşılık vermektedir.
Kazıklı temeller	Tekil kazıklı (monopile) <30; Üç kazıklı (tripile) <40; Grup kazıklı (tripod) <60; Kafesli (jacket) <60	<ul style="list-style-type: none"> • Tekil kazıklı temeller diğer kazıklı temellere oranla inşası daha kolay ve kurulumu daha ekonomiktir. Sınırlı zemin alanı gereklidir ve inşaatı için deniz tabanında asgari hazırlık gerekmektedir. • Grup kazıklı temeller tekil kazıklılara oranla daha derin sularda kullanılır, fakat bu temelin yerleştirilmesi daha pahalıdır. • Kafesli kazıklı (jacket) temeller, yapının stabilitesi için deniz tabanına çakılan temeller üzerine oturtulmaktadır. Zemin şartlarına tekil kazıklı temellere oranla daha az hassastırlar. Bu temellerin kompleks yapısından dolayı üretimi daha pahalıdır.
Yüzer	> 50	<ul style="list-style-type: none"> • Deniz derinliklerinin yüksek olduğu noktalarda bahsedilen diğer temel tipleri ekonomik olmaktan çıktıkları için yüzer tipte temeller kullanılmaktadır. • Bu tipteki temeller statik yükün dengelenmesi için kullanılan yöntemlere göre farklılık göstermektedir.

3.2. Rüzgâr Hızı Ölçüm İstasyonları

Bir önceki bölümde bahsedilmiş meteorolojik parametreler farklı platformlar üzerine monte edilecek sensörler ile ölçülebilmektedir. Uygulamada en yaygın olarak kullanılan platformlar, denizde kurulan sabit temelli ölçüm direkleri ve yüzer ölçüm istasyonlarıdır.

Sabit temelli ölçüm direkleri, ortalama olarak azami 60 metreye kadar derinlikteki denizlerde kurulan ve deniz tabanına temeli bulunan platformlardır. Bu tipteki ölçüm platformlarına karasal rüzgâr ölçüm direklerindeki gibi direkler dikilmekte, çeşitli yüksekliklerde anemometre ve rüzgâr yön sensörleri gibi sensörler konumlandırılarak meteorolojik ölçümler yapılmaktadır. Sabit temelli ölçüm direklerinin ekonomik bir şekilde kurulumu deniz derinliği arttıkça azalmaktadır. Fakat yüzer sistemlerle karşılaştırıldığında, oşinografik parametrelerin de ölçülmesine olanak sağladıklarından, özellikle uzun dönemli ölçümler için sabit temelli direkler idealdir. Sabit tabanlı ölçüm platformu ile ölçülebilecek oşinografik parametreler kapsamında dalga yüksekliği, deniz suyu sıcaklığı, basınç, iletkenlik değerleri sayılabilir.¹⁷ Sabit tabanlı ölçüm direklerinin bir diğer avantajı ise kurulu oldukları alandaki denizaltı ekolojisi ile ilgili veri toplanmasına olanak sağlamalarıdır. Fakat bu platformların kurulumu genellikle oldukça pahalıdır ve bozulan sensörlerin değiştirilmesi, bakım-onarım faaliyetleri gibi konular oldukça masraflı ve zordur. Teknik açıdan düşünüldüğünde, sabit temelli ölçüm direklerinin kurulması ile santralin kurulacağı alanda sadece tek bir ölçüm yapılmış olması, santraldeki tüm türbin noktalarının temsil edilememesine neden olmaktadır.

Yüzer ölçüm istasyonlarının kurulumu sabit tabanlı ölçüm direklerine oranla çok daha kolay ve daha az maliyetlidir. Daha da önemlisi, düşünülen santral sınırları içinde belirli sürelerde ölçümler tamamlandıktan sonra istasyonların farklı noktalara taşınması ve böylece birden fazla noktada rüzgâr ölçümleri yapılarak

¹⁶ Hujav, N., Caceoğlu, E., ve Baidol, Y., "Deniz üstü rüzgâr türbinleri: temel tipi seçimi ve deniz tabanı zemin araştırmaları, 5. İzmir Rüzgâr Sempozyumu (2019), syf: 197-210.

¹⁷ Durak, M. (2019), Denizüstü rüzgâr elektrik santral (DRES) projeleri için rüzgâr ölçümleri, 5. İzmir Rüzgâr Sempozyumu, İzmir

yerel rüzgâr koşullarının daha iyi anlaşılması mümkün olabilmektedir. Yüzer ölçüm istasyonlarına entegre edilmiş bir uzaktan algılama (remote sensing) cihazı ile (örneğin lidar) deniz seviyesinden belirli yüksekliklerde, belli açılarda çoklu lazer ölçümleri toplanarak üç boyutlu rüzgâr hızı bileşenleri çözümlenmektedir.¹⁸ Yüzer ölçüm istasyonlarının kurulum ve kullanım masrafları sabit temelli ölçüm direklerine oranla yaklaşık olarak 10 kat daha az maliyetlidir.¹⁹

Yapılacak ölçümlerin en az 1 sene ve yüksek emre amadeliklerle toplanması, mümkünse daha uzun yıllar ölçümlere devam edilmesi gerekmektedir. Böylelikle bölgesel rüzgâr ve deniz koşulları daha yüksek doğruluk payı ile değerlendirilebilmektedir.

3.3. Türbin Dizilimi ve Elektrik Üretim Potansiyeli

Bir RES'te farklı türbin noktalarında ve belli bir türbin göbek yüksekliğinde rüzgâr hızı tahminleri yapılabilmesi için çeşitli nümerik modeller kullanılmaktadır. Önceki bölümlerde anlatılmış olan meteorolojik parametrelerin ölçülmesinde kullanılmış enstrümantasyon, ölçüm süresi, miktarı ve kalitesi, kullanılacak nümerik model sonuçlarının doğruluğunu birebir etkilemektedir. Hazırlanan nümerik model sonuçları daha sonrasında seçili türbin özellikleri (örneğin türbin güç eğrileri) de hesaba katılarak santralin potansiyel elektrik üretim analizi çalışmalarında kullanılmaktadır.

Santralde üretilecek elektrik miktarını etkileyen bir diğer husus da türbinlerin birbirlerine karşı olan konumlandırmalarıdır. Türbinden geçen rüzgârın enerjisinin bir kısmı türbin tarafından alınmaktadır ve türbin arkasındaki rüzgârın hızında bir düşüş, türbülans enerjisinde ise bir artış meydana gelmekte, bu da momentum kaybına neden olmaktadır. Türbinin arkasında kalan bu türbülanslı alan izbölgesi (wake) alanı olarak tanımlanmaktadır.

Türbinlerin birbirleriyle olan mesafeleri arttıkça türbülans kaynaklı enerji kayıpları meydana geldiği için santralin elektrik üretim potansiyeli düşmektedir. Büyük çapta kurulan DRES'lerde birden fazla türbin sırası bulunması durumunda türbülans kaynaklı enerji kayıpları %15-20 seviyelerinde olabilmektedir. Enerji kaybı haricinde, mesafe kaynaklı artan türbülans nedeniyle türbinlerin üzerindeki yapısal yükler de artmakta ve ekonomik ömürleri azalmaktadır.²⁰



Şekil 3: DRES'lerde Meydana Gelen İzbölgesi

Kaynak: Önel, H., C. (2019)

¹⁸ AWS Truepower (2015), Metocean data needs assessment for U.S. offshore wind energy, Prepared for US Department of Energy, Contract DE-EE0005372: National Offshore Wind Energy Resource and Design Data Campaign – Analysis and Collaboration

¹⁹ Bingöl, F. (2019), Ege Denizi rüzgâr atlası ve deniz üstü rüzgâr ölçümleri, 5. İzmir Rüzgâr Sempozyumu, İzmir

²⁰ Önel, H., C. (2019), Numerical simulations of wind turbine wake interactions using actuator line and LES models, Thesis, Middle East Technical University

3.4. Türbin Teknolojisi

DRES türbinlerinin karasal rüzgâr türbinlerine göre göbek yüksekliği (hub) ve rotor çapı daha büyüktür, böylece daha güçlü rüzgarlara erişim sağlanmakta ve daha fazla rüzgâr enerjisinden faydalanılmaktadır. Bu yüksek rüzgâr, dalga ve akımlara dayanabilmesi için de daha dayanıklı malzemelerden yapılmakta ve bu sebeple yatırım maliyetleri de artmaktadır. Ancak tüm bunlara rağmen, daha güçlü ve sürekli rüzgâr hızlarında çalıştığından, birim kurulu kapasite başına elektrik üretim potansiyeli daha yüksektir.

Günümüzde 8-10 MW kapasiteli türbinler giderek yaygınlaşmaktadır. Kapasiteleri 15-16 MW'a ulaşan daha büyük türbinlere doğru da büyüyen bir eğilim vardır. Hatta günümüzde 20 MW kapasitelere sahip prototipler tanıtılmaktadır (örneğin Çin merkezli Mingyang Smart Energy - MySE 18.X-20 MW). 12 MW kapasiteye ve 107 metre uzunluğunda kanatlara sahip GE Haliade-X, 15 MW kapasite ve 222 metre rotor çapına sahip Siemens Gamesa SG 14-222DD, 16 MW kapasite ve 252 metre rotor çapına sahip Goldwind GW252 gibi daha büyük türbinler, yatırımlarda daha az sayıda ancak daha büyük türbinlere doğru olan eğilimin bir örneğidir.²¹

3.5. Kurulum Gemileri

DRES'lerin kurulumları için gerekli gemilerin (içindeki kaldırma ekipmanları dahil) seçimi, inşaat öncesi dönemde izlenmiş meteorolojik (örneğin rüzgâr hızı) ve oşinografik parametreler (örneğin dalga yüksekliği) çerçevesinde yapılmaktadır.¹⁴ DRES kurulum gemileri arasında kablo döşeme, kaldırma (jack-up), taşıma, vinç, işçilerin konaklama gemileri sayılabilir. Kaldırma ve kablo döşeme gemileri, kurulacak platformların dengesini sağlamak amacıyla deniz tabanına sabitlenecek ayaklar bulundurmaktadırlar.

DRES kurulum gemilerinin tasarımının iyileştirilmesi ile daha zorlu meteorolojik ve deniz koşulları altında çalışmaları sağlanabilirse, gemilerin operasyonel çalışma saatleri artarak inşaat kalemine ait maliyetler azalabilmektedir.²² Kurulum gemisi piyasası, deniz-üstü rüzgâr türbinlerinin boyutlarının artmasından etkilenmektedir. Üreticiler santralin daha fazla rüzgâr enerjisi yakalaması için daha büyük türbinler üretmekte; bu da daha yüksek kaldırma kapasitesine ve gelişmiş stabilite özelliklerine sahip gemiler gerektirmektedir. Bu trend, şirketlerin bu devasa bileşenleri taşıyabilecek yeni gemiler geliştirmesiyle gemi tasarımında yeniliği teşvik etmektedir.



Şekil 4: DRES Türbini Kurulum Gemisi Örneği

Kaynak: <https://www.dnv.com/expert-story/maritime-impact/Fresh-breeze-for-offshore-wind-farms.html>, erişim: 21.03.2021

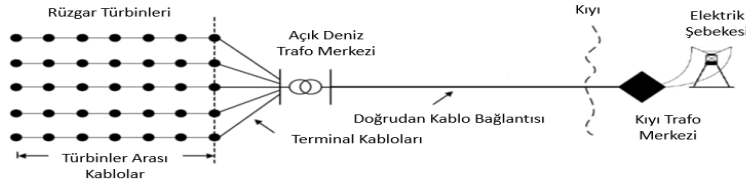
²¹ Blackridge Research, 2024. <https://www.blackridgeresearch.com/blog/list-of-global-top-biggest-largest-offshore-wind-turbine-power-oems-manufacturers-companies-suppliers-in-the-world#global-top-10-offshore-wind-turbine-manufacturers-2024> erişim:15.08.2024

²² LeanWind (2017), Driving cost reductions in offshore wind, The LeanWind Project Final Publication

DRES türbini kurulum gemisi pazarı büyüyen açık deniz rüzgâr enerjisi sektörü nedeniyle oldukça rekabetçidir. A-2-Sea Solutions Limited, Cadeler, Olsen Windcarrier, Jan De Nul Group, MPI Offshore, Seafox, Swire Pacific Limited., Van Es Group, Van Oord, DEME piyasanın önde gelen oyuncularından bazılarıdır.²³ GWEC tarafından yayımlanan “Küresel Deniz-üstü Rüzgâr Enerjisi 2024” raporuna göre, 2023 yılında toplamda faal çalışmakta olan 198 adet kurulum gemisi bulunmaktadır ve 2026 yılına kadar küresel talebi karşılamak üzere herhangi bir darboğaz öngörülmemektedir. 12 MW'ın üzerinde güç değerlerine ve 150 metreden fazla göbek yüksekliğine sahip büyük açık deniz rüzgâr türbinlerini idare edebilen gemilere yönelik artan talebi karşılamak için Avrupalı gemi operatörleri, son birkaç yılda mevcut gemileri iyileştirmeye ve yeni nesil gemiler için de sipariş vermeye başlamıştır. Ancak, GWEC'in en son pazar büyüme projeksiyonuna dayanarak, yeni gemilere yatırım 2026/2027'den önce yapılmadığı takdirde, yeni bir geminin teslim edilmesi için üç yıllık bir hazırlık süresi varsayılarak, Avrupa'da bu on yılın sonuna doğru olası bir kıtlık öngörülmekte ve bu beklenen darboğaz aynı zamanda büyük ölçüde Avrupa gemilerine bağımlı olan Asya-Pasifik bölgesinde açık deniz rüzgâr pazarlarının gelecek için bir çözüm bulması gerektiği anlamına da gelmektedir.²⁴

3.6. Şebeke Bağlantısı

DRES'lerin ulusal şebekeye bağlantısının sağlanması hem teknik hem de mevzuat açısından çeşitli zorlukları beraberinde getirmektedir. Şekil 7'de DRES'ten üretilen elektriğin şebekeye ulaştırılması gösterilmektedir.



Şekil 5: DRES'in Şebekeye Bağlanması (Üstten Görünüm)

Kaynak: Rentschler, M., U., T., ve diğerleri (2020)

Türbinlerin birbirleri ile bağlanmasıyla bir şebeke hattı oluşmaktadır. Oluşan şebekenin nihai bağlantı noktası bir açık deniz trafo merkezinde sona ermektedir, böylelikle türbinlerden üretilen elektrik buradaki trafo merkezinde toplanmaktadır. Açık deniz trafo merkezinde toplanan elektrik deniz altı kablolarıyla kıyıdaki trafo merkezine aktarılmaktadır.²⁵

Teknik açıdan bakıldığında santralin kıyıya olan mesafesi ve bağlantı noktasındaki şebekenin emre amadeliği karşılaşılan en önemli iki kısıtlayıcı faktördür.²⁶ DRES projelerinin kıydan uzaklığı, santralin karada bulunan iletim sistemine bağlanması için gerekli yer altı kablolama uzunluklarının ve kablo kaynaklı enerji kayıplarının hesaplanmasında kullanılmaktadır. Santral kıydan uzaklaştıkça gerekli yer altı kablo

²³ Kings Research, 2024. <https://www.kingsresearch.com/wind-turbine-installation-vessel-market-936>

²⁴ Küresel Rüzgâr Enerjisi Konseyi, “Global Offshore Wind Report 2024”, 2024. <https://gwec.net/global-offshore-wind-report-2024/>

²⁵ Rentschler, M., U., T., ve diğerleri (2020), Parametric study of dynamic inter-array cable systems for floating offshore wind turbines, *Marine Systems and Ocean Technology*, 15, syf:16-25.

²⁶ WindEurope (2018), *Floating offshore wind energy – A policy blueprint for Europe*

miktarı artacağı için proje yatırım maliyetleri artmaktadır.²⁷ Kablolama haricinde, deniz-üstü trafo merkezinin kurulumu için gerekli izinlerin alınması, kurulumu ve/veya işletimini üstlenecek partinin belirlenmesi gibi konular da tespit edilmelidir.²⁸

3.7. Rüzgâr Hızları ve Üretim Analizi (Karşılaştırmalı)

DRES'ler genellikle karasal rüzgâr santrallerinden daha fazla elektrik üretir, yani kapasite faktörü daha yüksektir. Bunun başlıca 2 ana nedeninden biri; türbin teknolojileri bölümünde de bahsedilen türbin boyutu, bir diğeri ise karadakilere göre yüksek olan rüzgâr hızı ve rüzgâr dağılımını bozabilecek arazi, binalar ve bitki örtüsü gibi engeller olmaması sebebi ile rüzgâr sürekliliğidir.

Kabaca bir karasal rüzgâr türbini 1 MW başına yılda yaklaşık 1.500 ila 3.000 megavatsaat (MWh) elektrik üretebilmektedir. Bu miktar açık deniz rüzgâr türbininde ise 1 MW başına yılda 3.000 ila 4.000 MWh'tır. Bunlar kaba tahminler olup gerçek üretim, coğrafi konum, kullanılan türbin teknolojisi, bakım ve operasyonları, hava koşulları gibi faktörlere bağlı olarak büyük ölçüde değişebilir.²⁹

Santralin bir yıl içerisinde üretmiş olduğu elektriğin, santralin bir yıl boyunca nominal güçte çalışarak üretebileceği elektriğe oranı kapasite faktörü olarak adlandırılır. Kapasite faktörleri lokasyona, teknolojiye ve diğer faktörlere bağlı olarak değişebilse de modern açık deniz rüzgâr çiftlikleri genellikle %42-55 aralığında kapasite faktörlerine ulaşmaktadır.³⁰

WindEurope'un raporuna göre Avrupa'da 2023 yılında inşa edilen yeni kara rüzgâr santrallerinin beklenen ortalama kapasite faktörleri %30-45'tir. DRES'ler için ise bu değer yaklaşık %50'dir. 2022'de 4,1 MW olan yeni kara türbinlerinin ortalama güç değeri 2023'te 4,5 MW'a yükselmiştir. DRES'ler için bu rakam 2022'de 8,0 MW'tan 2023'te 9,7 MW'a yükselmiştir. Genel olarak, yüzer platformlu rüzgâr santralleri sabit temelli rüzgâr santrallerinden daha fazla elektrik üretme potansiyeline sahiptir.

Aşağıda günümüzde kurulu olan bazı DRES örnekleri paylaşılmıştır;

- Hywind Tampen Mart 2024 itibarıyla dünyanın en büyük yüzer açık deniz rüzgâr santrali projesidir. Equinor firmasının Kuzey Denizi bölgesindeki Petrol ve Gaz operasyonlarına güç sağlamaktadır.
- Hywind projesi, Saipem'in, İskoçya kıyılarının 30 km açıklarında bulunan dünyanın ilk yüzer rüzgâr santralidir.
- Seagreen, en derin temeli deniz seviyesinin 58,7 metre altında kurulmuş olmasıyla şu anda İskoçya'nın en büyük DRES'i ve aynı zamanda dünyanın en derin sabit temelli DRES'idir.
- Hollandse Kust Zuid Dünya'nın sübvansiyonsuz inşa edilen ilk açık deniz rüzgâr santralidir. Siemens Gamesa 11 MW rüzgâr türbini, dünyadaki herhangi bir DRES'e kurulacak en büyük ve en güçlü ticari rüzgâr türbinlerinden biri olacaktır.

²⁷ Schwartz, M. ve diğerleri (2010), *Assessment of offshore wind energy resources for the United States*, National Renewable Energy Laboratory, Technical Report NREL/TP-500-45889

²⁸ WindEurope (2019), *Industry position on how offshore grids should develop*

²⁹ <https://www.ewea.org/library/erisim:15.08.2024>

³⁰ [WindEurope, Wind Energy in Europe 2023 Statistics and the Outlook for 2024-2030](#)

3.8. DRES Teknolojisinin Gelişimi - Teknolojik Yenilikler ve Gelecek Trendler

Son on yılda açık deniz rüzgâr türbini teknolojisinde önemli gelişmeler yaşanmaktadır.

- Türbin ve Proje Boyutları: Açık deniz rüzgâr enerjisi projelerinde, su derinliği ve kıyıya uzaklığın artmasıyla birlikte proje boyutu da artış göstermektedir.³¹ Rotor kanatlarının büyümesi ile türbinlerin daha fazla rüzgâr enerjisi yakalayarak daha fazla elektrik üretebilmesi ve DRES maliyetinin düşürülmesi sağlanmaktadır. Haziran 2023'te Çinli CTG, Fujian'da dünyanın en büyük açık deniz rüzgâr türbini olan 16 MW kapasiteli 252 metre rotor çapına sahip Goldwind'in GW252-16 MW türbinini kullanmıştır.
- Yüzer platformlu DRES ve yenilikçi temel tasarımları: Daha derin sulara ulaşmak için yüzer platformlu DRES'ler, sabit temelli DRES'lerin sınırlamalarını aştıklarından ilgi görmektedir. Maliyetleri azaltmak ve kurulum verimliliğini artırmak için yarı-batık ve gergi-ayaklı platformlar gibi yeni temel tasarımları geliştirilmektedir. Ancak, teknolojinin yeterince olgunlaşmamış olması, temel imalatı ve montajını yapabilecek liman altyapısı eksikliği gibi engeller sebebiyle bu on yılın sonuna kadar tam ticarileşmeye ulaşmaları beklenmemektedir.³²
- Dijitalleşme ve Akıllı Teknoloji: Veri analitiği, yapay zekâ ve dijital ikiz teknolojisi türbin performansını ve işletme maliyetlerini, bakımı ve şebeke entegrasyonunu optimize etmektedir.
- Enerji Depolama Entegrasyonu: Enerji depolama sistemlerini DRES'ler ile entegre etmek, şebeke istikrarı ve yenilenebilir enerji kullanımını en üst düzeye çıkarmak için önem taşımaktadır.

DRES'ler için gelecek trendler ise aşağıdaki gibi öngörülmektedir.

- Enerji Adaları Olarak DRES'ler: Entegre enerji depolama ve hidrojen üretimine sahip büyük ölçekli DRES'ler enerji merkezleri olarak ortaya çıkmaktadır.
- Artan Coğrafi Genişleme: Sektör, ABD Doğu Sahili, Asya ve Güney Yarımküre gibi daha yüksek rüzgâr kaynaklarına sahip yeni bölgelere doğru genişlemektedir.
- Maliyet Azaltma: Teknolojik gelişmeler ve ölçek ekonomileri yoluyla Birime İndirgenmiş Elektrik Maliyetini (LCOE) azaltmaya odaklanmaya devam edilmektedir.
- Tedarik Zinciri Geliştirme: DRES endüstrisinin büyümesi için sağlam yerel tedarik zincirleri oluşturmak önem arz etmektedir.
- Çevresel Hususlar: Sektör, çevresel etki değerlendirme ve azaltma stratejileri daha fazla ön plana çıkmaktadır.

³¹ ABD Enerji Bakanlığı, 2023. <https://www.energy.gov/sites/default/files/2023-09/doe-offshore-wind-market-report-2023-edition.pdf>

³² Küresel Rüzgâr Enerjisi Konseyi, "Global Offshore Wind Report 2024", 2024. <https://gwec.net/global-offshore-wind-report-2024/>

4. DRES Potansiyeli ve Gelişimindeki Engeller

4.1. Küresel Avantajlar ve Engeller

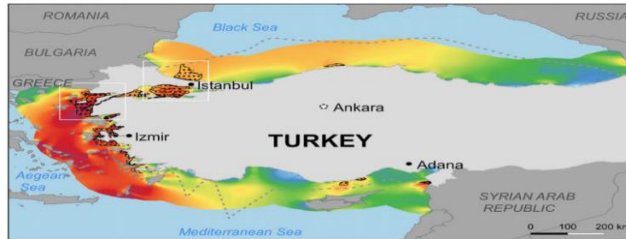
Dünyada 2022 yılı itibariyle küresel DRES kapasitesi, son dört yılda yaklaşık üç kat artarak 64 GW'a ulaşmıştır. Toplam kapasitenin yaklaşık yarısı Asya'da, diğer yarısı Avrupa'da bulunmakta olup Asya'daki kapasitenin büyük kısmının yer aldığı Çin lider durumdadır. 2022 yılı itibariyle küresel RES kapasitesinin %7'si DRES'lerden oluşmaktadır. Her yıl yeni kurulan RES kapasitesinde DRES'lerin payı %11'e kadar yükselmiştir. Arazi ihtiyacının olmaması, denizlerde daha büyük türbinlerin kullanılabilmesi ve karasal RES'lere kıyasla bir birim kapasiteyle daha yüksek miktarda üretim yapılabilmesi, DRES'lerin başlıca avantajları arasında bulunmaktadır. Yüksek kapasite faktörü sayesinde, Uluslararası Enerji Ajansı (IEA) DRES'i "değişken baz yük" santrali olarak tanımlamaktadır. Açık denizlerde rüzgâr hızı artış gösterdiği için yüzer DRES'ler daha yüksek kapasite faktörleri ile çalışabilmektedir. Bu nedenle gelecekte elektrik üretiminde DRES'lerin önemli bir rol oynaması beklenmektedir.³³

Son yıllarda küresel ölçekteki deniz-üstü rüzgâr projelerinde ilk yatırım maliyetlerinde maliyet enflasyonu, tedarik zinciri ve emtia fiyat dengesizliği nedenleriyle %10-%30 oranında artış yaşanmıştır. Artan yatırım maliyetleri, yatırımcıların inşaata başlamasını ve projenin hayata geçirilmesini geciktirmektedir. Maliyetlerdeki artışın elektrik satın alma garantisine yansıtılması, projelerin zamanında devreye alınması için önem taşımaktadır.³⁴

4.2. Türkiye'deki Avantajlar ve Engeller

4.2.1. Türkiye'de DRES Potansiyeli ve Önemi

Türkiye'deki DRES potansiyeli, ülkemizin yenilenebilir enerji sektöründeki gelişimini önemli ölçüde etkileme potansiyeline sahiptir. Dünya Bankası verilerine göre Türkiye'nin DRES potansiyeli 75 GW gibi önemli bir büyüklüktedir.³⁵ Error! Reference source not found.11'de ihale alanlarını da içeren Türkiye'nin DRES potansiyeli gösterilmektedir (renk göstergesinde maviden kırmızıya gidildikçe artan rüzgâr hızı potansiyeli gösterilmektedir).



Şekil 6: Türkiye DRES Potansiyeli Haritası

Kaynak: Dünya Bankası

2023 yılı Ekim ayında, SHURA Enerji Dönüşümü Merkezi ve Türkiye Rüzgâr Enerjisi Birliği (TÜREB) iş birliğiyle hazırlanan "Deniz Üstü Rüzgâr Enerjisi İhaleleri: Küresel Eğilimler ve Türkiye İçin Öneriler" raporu

³³ Milliyet. <https://www.milliyet.com.tr/ekonomi/milliyet-enerji/gecmis-deneyimlerin-isiginda-denizustu-res-planlari-6997938>

³⁴ İklim Haber. <https://www.iklimhaber.org/turkiyede-deniz-ustu-ruzgar-enerjisinin-gelismesi-icin-yeka-yarismalari-kritik/>

³⁵ Yeşil Haber. <https://yesilhaber.net/deniz-ustu-resler-turkiyenin-elektrik-ve-yesil-hidrojen-gelecegi/>

yayımlanmıştır. Raporda, Türkiye'nin Akdeniz ve Ege Denizi'ndeki stratejik konumunun sürdürülebilir enerji kaynaklarına ulaşmakta önemli fırsat sunduğu ifade edilmektedir.³⁶

DÜRED Başkanı Murat Durak, DRES potansiyelinin en fazla olduğu bölgenin Ege Bölgesi'nin kuzeybatısında kalan alanlar olduğunu (6 GW sabit, 19 GW yüzer olmak üzere toplam 25 GW potansiyel) ve Ege Bölgesi'ni Marmara ve Karadeniz bölgelerinin takip ettiğini, batı ve güney kısımlardaki tüm potansiyel sahalarla birlikte Türkiye'nin toplam DRES potansiyelinin 50 metreden daha az derinlikte 18 GW sabit, 50-1.000 metre derinlikte ise 57 GW olmak üzere toplamda yaklaşık 75 GW'a ulaştığını belirtmektedir. DRES'lerle sera gazı emisyonu olmadan "yeşil hidrojen" üretilebilmektedir. Bu sebeple bu projeler talebi karşılamak için gelecekte yeşil hidrojen üretim merkezleri olma potansiyeli ile karşımıza çıkmaktadır.³⁷

TEKSİS İleri Teknolojiler Genel Müdürü Hüseyin Devrim, Türkiye'nin DRES ve yeşil hidrojen entegrasyonunun hem ulusal enerji güvenliğimiz ve karbon emisyonlarının azaltılmasına katkısı hem de küresel enerji pazarında Türkiye'nin konumunu açısından önem arz ettiğini belirtmektedir. ETKB'nın 2035 yılına kadar DRES'ler için belirlediği 5 GW'lık hedef, yeşil hidrojen üretimiyle entegre edildiğinde, Türkiye'nin enerji sektöründe daha etkili olacağı öngörülmektedir.³⁸

DRES geliştirilmesi kapsamında ihale prosedürlerinin belirlenmesi, finansal çerçevenin hazırlanması, liman altyapısının oluşturulması için 2019 yılının Mart ayında Türkiye ile Danimarka arasında 3 yıl geçerli olacak bir işbirliği anlaşması imzalanmıştır.³⁹ Danimarka'da hem karasal hem de deniz üstü rüzgâr potansiyelinin yüksek olması ve ülkenin yaklaşık 7.300 km uzunluğunda bir sığ bir kıyı şeridinde sahip olması rüzgâr teknolojisinin çok hızlı bir şekilde gelişmesinde rol oynamıştır.⁴⁰

4.2.2. Türkiye'deki DRES Avantajları

DRES'ler açık denizlerde rüzgâr türbinleri kullanarak elektrik üretimini gerçekleştiren temiz ve sürdürülebilir enerji tesisleri olup bu sayede sera gazı emisyonlarını azaltmada önemli bir rol oynarlar. Ayrıca, kıyı bölgelerine kıyasla daha fazla rüzgâr yakalayarak yüksek verimlilikle elektrik üretebilirler. Türkiye'nin yenilenebilir enerji hedefleri doğrultusunda, DRES projelerinin ülkenin enerji dönüşümünde önemli bir rol oynayacağı düşünülmektedir. DÜRED Başkanı Murat Durak'a göre; "Ülkemizin son yıllarda denizcilik sektöründe kayda değer ilerlemesi ve karasal rüzgâr enerjisinde edindiği deneyim deniz üstü rüzgâr teknolojisi kullanımının en önemli avantajlarından. Elektromekanik ekipman tedarikinde yerli üretim olanakları karasal türbinler için mevcut olduğundan dolayı bu teknoloji deniz üstü teknolojisine çevrilebilir. DRES'ler kara üstü türbinlerine göre, ilk kurulum maliyeti açısından dezavantajlı olmasına rağmen, denizde rüzgâr şiddetinin karaya oranla çok daha fazla ve sürekli olabilmesi açısından, uzun vadede daha fazla kâr getiren bir yatırım olma özelliğini taşır. DRES'lerin avantajları; denizde rüzgârın daha yüksek şiddette olması nedeniyle artan enerji üretimi, rüzgâr sürekliliğinin daha fazla olması ve pürüzsüzlüğün düşük olması, daha düşük türbülans, deniz üstünde kamulaştırma bedellerinin olmaması,

³⁶ İklim Haber. <https://www.iklimhaber.org/turkiyede-deniz-ustu-ruzgar-enerjisinin-gelismesi-icin-yeka-yarismalari-kritik/>

³⁷ Dünya Gazetesi. <https://www.dunya.com/sectorler/enerji/2035-yilinda-hedef-5-gigavatlik-deniz-ustu-res-haberi-700972>

³⁸ Yeşil Haber. <https://yesilhaber.net/deniz-ustu-resler-turkiyenin-elektrik-ve-yesil-hidrojen-gelecegi/>

³⁹ Rekabet ve Regülasyon, 2021. <http://www.rekabetregulasyon.com/mavi-vatanda-yeni-firsatlar-deniz-ustu-offshore-ruzgar-santralleri/>, erişim: 23.03.2021

⁴⁰ Şahin, M., E., (2020), Açık deniz rüzgâr sistemleri üzerine bir inceleme ve Danimarka modeli, R.T. Erdoğan Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi, 1, (1), sayfa:54-67

yaşam alanlarından uzak olduğu için görüntü ve gürültü kirliliğine neden olmaması, deniz ulaşımının kara ulaşımına kıyasla daha kolay ve ucuz olması nedeniyle ulaştırma maliyetindeki tasarruflar, bölgesel gelişim ve iş olanağı sağlama şeklinde sıralanabilir.”⁴¹

4.2.3. Türkiye’deki DRES Engelleri

DRES projelerinin kurulacakları bölgelerde çeşitli kısıtlara bakılmalıdır. Bunlardan en önemlileri arasında bölgenin rüzgâr enerjisi potansiyeli, deniz derinliği ve taban yapısı, kıyıya uzaklığı, çevresel ve sosyal faktörler bulunmaktadır. Bunlarla birlikte kurulacak DRES projesi alanının askeri yasak bölge ve eğitim-atış sahası içerisinde bulunmaması, deniz trafiğini engellememesi ve kıta sahanlığı açısından sorun teşkil etmemesi gerekmektedir.⁴²

Ülkemizdeki denizlerin derinlikleri, topografik özellikleri, kıta sahanlığı mevzuu, finansal yapı ve yerel mevzuatlar çerçevesinde DRES gelişimi için gerekli izinlerin belirlenmesi, bu teknolojinin geliştirilmesinde önem teşkil etmektedir.

Bunun yanı sıra, tipik karasal rüzgâr enerjisi projeleriyle uyumlu olmayan, arazi hakları, kamulaştırma gibi muhtelif mevzuat hükümleri, özel girişimle deniz-üstü rüzgâr enerjisine müsait hale getirilmemiş olması önemli bir engeldir. Bu konuya hukuki ve düzenleyici çerçevede detaylı olarak değindik.

Projenin Konumu ve Yerel Özellikler

DRES projelerinin kurulacakları yerlerin belirlenmesindeki en önemli teknik parametreler arasında bölgenin rüzgâr potansiyeli ve deniz tabanı topografyası (batimetrik özellikleri) yer almaktadır. DRES kurulum aşamasında en büyük maliyet parametrelerinin başında türbinlerin temel inşası ve deniz altından en yakın kara parçasına çekilen iletim hatları gelmektedir. İlgili parametreler de santralin karaya olan uzaklığı ve deniz tabanı derinliği ile belirlenmektedir. DRES türbinlerinin kurulmasında, planlanan derinlik arttıkça yapım maliyetleri oldukça yükselmektedir. DRES’lerdeki yatırım maliyetlerinin ortalama %33’ünü türbin, %24’lük kısmını ise temel inşası oluşturmaktadır. DRES’lerin montaj maliyeti de yüksek olduğundan, daha çok 50 MW ve üzeri olan projeler tercih edilmektedir. Bu nedenle, DRES’lerin toplam yatırım maliyetleri kara üstü sistemlere göre daha yüksektir. DRES projeleri, uzun dönemli planlama gerektirmektedir. DRES’lerde uygun deniz tabanı sahasının tahsisi kritik öneme sahiptir. Bunun için Deniz Mekânsal Planlaması-DMP (Maritime Spatial Planning-MSP) gereklidir. DMP sonrası, deniz tabanının tahsisi yapılabilir ve DRES ihalelerinin önü açılabilir. İyi düzenlenmiş bir deniz tabanı tahsis mekanizması yatırımcı çekmenin en önemli unsurlarındandır.⁴³

Kıta Sahanlığı Mevzuu

Türkiye’deki en iyi DRES potansiyeli Ege Bölgesi’nde, sonra da Marmara Denizi’nde bulunmaktadır. Fakat her iki bölgede de deniz derinliklerinin hızlı bir şekilde artması, sabit temelli türbinlerden daha çok yüzer temelli türbinlerin kurulumu için uygun alanların varlığını göstermektedir. Rüzgâr potansiyeli ve deniz derinliğinin yanı sıra, özellikle Ege Bölgesi’nde kıta sahanlığı dikkate alınarak santrallerin

⁴¹ Mühendis ve Makine güncel, 2021. https://ww1.mmo.org.tr/sites/default/files/016_0.pdf

⁴² Durak, M. (2018), *Denizüstü Rüzgâr Elektrik Santral (DRES) projeleri için rüzgâr ölçümleri*, 5. İzmir Rüzgâr Sempozyumu, İzmir

⁴³ <https://www.ruzgarenerjisi.com.tr/denizustu-ruzgar-enerjisi-turkiye-yol-haritasi/>

konumlandırılması gerekmektedir. Yunanistan, “Kıta Sahanelığı Sözleşmesi” ve sonrasında bu sözleşmenin yerini almış Birleşmiş Milletler Deniz Hukuku Sözleşmesi’ni (BMDHS) imzalamıştır. Fakat Türkiye bu sözleşmelerde taraf olmadığı için, Yunan adaları çevresindeki kıta sahanlığını ve Münhasır Ekonomik Bölge alanını tanımamaktadır.⁴⁴ İki ülke, Ege Denizi’ndeki hava ve deniz yetki alanlarının sınırlandırılması ile ilgili sorunlar yaşamaktadır. Buradaki başlıca nedenlerden biri her iki ülkenin Ege’ye paralel olarak neredeyse eşit uzunlukta anakara kıyı şeridinde sahip olmasına karşın, Ege’de bulunan adaların çoğunluğunun Yunanistan’a ait olması nedeniyle BMDHS’ye göre Yunanistan’ın deniz yetki alanlarının adil olmayan bir biçimde genişlemesidir. Mevcut durumda, Türkiye ve Yunanistan Ege Denizi’nde 6 deniz mili (11 km) genişliğinde karasularını tanımaktadırlar. Bu durumda, Yunanistan’ın sahip olduğu adalar da düşünüldüğünde Yunanistan’ın karasuları Ege Denizi’nin yaklaşık %40’ını kapsamaktadır.

Yasal Mevzuat ve İzin Durumları

Türkiye’de DRES gelişimiyle ilgili kanuni bir düzenleme henüz bulunmamaktadır. DRES projelerinde planlanmada yaşanan gecikmeler projenin yatırım maliyetlerinde ciddi artışlara neden olduğu için, ilgili yasal mevzuatın gerekli tüm izin ve lisansları içerecek şekilde belirlenmesi gerekmektedir.⁴⁵ Planlanan DRES projelerinin çevreye olan etkisinin incelendiği çevresel etki değerlendirme (ÇED) raporuna ek olarak denizaltı faunası da dikkate alınmalıdır. DRES projelerinin izin ve lisans süreçlerinde Seyir Hidrografi ve Oşinografi Dairesi Başkanlığından ve Kıyı Emniyeti Genel Müdürlüğü gibi farklı kuruluşlardan da görüş ve izinlerin alınması gerekmektedir.⁴⁶

Finansman Konusu

Türkiye’de henüz DRES yatırımı bulunmamaktadır. Mevcut durumda DRES’lerle ilgili bir mevzuatın bulunmaması, yüksek yatırım maliyetleri, DRES’lerin karasal RES projelerine göre daha uzun yatırım dönemi gerektirmesi, yüksek finansman maliyetleri, döviz kurundaki oynaklıklar, ileri teknoloji ihtiyacı gibi konular yatırımcının üstleneceği riskleri artırmaktadır. Bütün bu faktörlerin, potansiyel yatırımlar için finansman temininde çeşitli engeller doğurması güçlü ihtimal olarak değerlendirilmektedir. Türkiye özelinde yerel endüstrilerini desteklemek amacıyla yerli aksam gereksinimlerinin belirlenebileceği ancak bunun finansman maliyetini artıracığından yatırım tutarını yukarıya çekebileceği belirtilmektedir. Farklı teknoloji gereksinimleri ve yabancı yatırımcının Türkiye’ye çekilmesi önem arz etmektedir.⁴⁷ Deniz-üstü rüzgâr enerjisinin gelişimi için ülkemizde liman eksikliği bulunduğunu belirten Murat Durak; DRES’ler için mutlaka ayrı limanlar planlanıp bir an önce inşasına başlanması gerektiğini ifade etmektedir.⁴⁸

⁴⁴ Wikipedia, https://tr.wikipedia.org/wiki/Ege_sorunu, erişim: 23.03.2021

⁴⁵ EWEA (2013), Deep water - the next step for offshore wind energy, A report by the European Wind Energy Association

⁴⁶ Deniz-üstü Rüzgâr Enerji Santralleri: Çanakkale Örneği, Mustafa Özgür Köroğlu, Koray Ülgen

⁴⁷ İklim Haber. <https://www.iklimhaber.org/turkiyede-deniz-ustu-ruzgar-enerjisinin-gelismesi-icin-yeka-yarismalari-kritik/>

⁴⁸ Temiz Enerji. <https://temizenerji.org/2024/01/16/turkiyede-deniz-ustu-ruzgar-enerjisinde-en-son-teknolojiyi-kullanacagiz/>

5. Ekonomik Analiz

5.1. Maliyet Bileşenleri

Rüzgâr türbinlerinin maliyeti, teknolojinin gelişimi, üretim materyallerinin fiyatları ve kurulum bölgelerinin coğrafi özellikleri gibi pek çok değişkene bağlı olarak değişkenlik göstermektedir. Bu maliyetlerin analizi, rüzgâr enerjisinin ekonomik etkinliği ve rekabetçiliği açısından büyük önem taşırken, aynı zamanda yenilenebilir enerji politikalarının şekillenmesinde de kritik bir role sahiptir. Aşağıdaki tablo yüzen bir açık deniz rüzgâr santralının yaşam boyu maliyet unsurlarını göstermektedir. Buna göre DRES'lerde en büyük paya sahip maliyet işletme ve bakım giderleri iken, bunu yüzer altyapı giderleri ve türbin giderleri takip etmektedir.

Tablo 2: Maliyet Bileşenleri

Bileşen Adı	Pav
İşletme ve Bakım	36,6%
Yüzer Alt Yapı	16,6%
Türbin Naceli	13,1%
Türbin Rotoru	6,3%
Kablolar	5,4%
Türbin Kulesi	3,6%
Bağlama Sistemleri	3,1%
Açık Deniz Trafo Merkezi	2,6%
Geliştirme ve Proje Yönetimi	2,5%
Hizmetten Çıkarma	2,5%
Kablo Montajı	2,5%
Kıyı Trafo Merkezi	1,4%
Bağlama ve Çapa Ön Montajı	1,2%
Yüzer Alt Yapı- Türbin Montajı	1,2%
Yüzer Alt Yapı- Türbin Kurulumu	0,9%
Açık Deniz Trafo Merkezi Kurulumu	0,4%
Diğer Montajlar	0,2%

Kaynak: <https://guidetofloatingoffshorewind.com/wind-farm-costs/>, TSKB

5.2. Finansman Yapısı ve Teşvikler

DRES'ler, dünya genelinde yenilenebilir enerji kaynaklarının artan önemine paralel olarak gelişimini sürdürmektedir. Bu santraller, rüzgâr enerjisinin deniz üzerinde elde edilmesini sağlayarak daha yüksek verimlilik ve istikrarlı enerji üretimi sunar. Ancak, DRES projeleri, yüksek maliyetler ve karmaşık finansman yapıları ile tanınır.

DRE'lerin inşası, kara rüzgâr santrallerine göre daha pahalıdır. Bu yüksek maliyetler, rüzgâr türbinlerinin denize kurulumu, altyapı, bakım ve operasyon gibi çeşitli faktörlerden kaynaklanır. DRES projeleri genellikle karmaşık finansman yapıları içerir. İlk aşamada, proje geliştirme süreci için öz sermaye ve borç finansmanı kullanılır. Öz sermaye, genellikle proje geliştirme şirketlerinden veya yatırımcılardan sağlanır. Borç finansmanı ise bankalardan veya özel yatırımcılardan elde edilir. Özel sermaye ortaklıkları ve/veya kamu-özel ortaklıkları ile yürütülen DRES projelerinde yaygın olarak kullanılan finansman modelleri arasında proje finansmanı modeli bulunmaktadır. Proje finansmanı modelinde, proje gelirleri borçların geri ödenmesinde kullanılır ve finansman, proje varlıklarından teminat alır.

Birçok ülke, DRES projelerini teşvik etmek amacıyla çeşitli devlet destekleri ve teşvikler sunar. Bu teşvikler arasında vergi indirimleri, sübvansiyonlar ve devlet destekli kredi programları yer alır. Bu ülkeler, yenilenebilir enerji üreticilerine enerji üretim sertifikaları sağlar. Bu sertifikalar, üreticilerin enerji piyasasında daha rekabetçi olmasını ve ek gelir elde etmesini sağlar. Ayrıca, DRES projeleri genellikle uzun vadeli satın alma sözleşmeleri (PPA) ile desteklenir. Bu sözleşmeler, üreticilere sabit bir gelir akışı sağlar ve finansman sağlamak için önemli bir araçtır. Devletler ve özel kuruluşlar, rüzgâr enerjisi teknolojilerini geliştirmek ve maliyetleri düşürmek amacıyla AR-GE destekleri de sunmaktadır. Bu destekler, teknolojik yenilikleri teşvik eder ve santrallerin verimliliğini artırır.

5.3. Yatırım Getirisi ve Ekonomik Fayda Analizi

DRES projelerinin yüksek başlangıç maliyetleri, türbinlerin kurulumu, deniz altı altyapısı, bakım ve operasyon gibi maliyetlerden oluşur. Yatırım getirisinin hesaplanmasında bu maliyetlerin doğru bir şekilde öngörülmesi gerekir. Diğer yandan, DRES'ler, karasal rüzgâr enerjisi santrallerine göre daha yüksek rüzgâr hızları ve devamlı rüzgâr koşulları sayesinde genellikle daha yüksek enerji üretim kapasitesine sahiptir. Bu durum, yatırımların geri dönüş süresini kısaltabilir ve ekonomik faydaları artırabilir. Projelerin finansmanı genellikle öz sermaye ve borç kombinasyonu ile sağlanır. Finansman maliyetleri, faiz oranları ve geri ödeme şartları, yatırım getirisini doğrudan etkileyen faktörlerdir. Son olarak, DRES'lerin operasyon ve bakım maliyetleri, kara santrallerine göre daha yüksek olduğundan, bu maliyetler yatırım getirisini etkileyen önemli faktörlerdendir.

DRES'lerin ekonomik faydaları oldukça fazladır. Yüksek ve sürekli rüzgâr koşulları sunarak enerji üretiminde istikrar sağlar, enerji arz güvenliğini artırır. İnşaat, bakım ve operasyon alanlarında doğrudan ve dolaylı olarak sağlanan istihdam inşa süreçlerinde yüksek bir teknik bilgi gerektirdiğinden DRES'lerin yerel ekonomilere katkısı sınırlıdır. Giderek gelişen DRES teknolojileri sayesinde gelecekte uzun vadeli maliyetler düşürülebilir ve yeni teknolojik gelişmeleri destekleyebilmek için ek kaynak yaratma fırsatları doğabilir. DRES'ler ayrıca enerji üretiminde çeşitliliği artırarak enerji bağımsızlığını destekler ve enerji ithalatına olan bağımlılığı azaltır. Bu, ulusal ekonomi açısından oldukça önemli bir faydadır.

6. Çevresel ve Sosyal Etkiler

6.1. Çevresel ve Sosyal Etki Değerlendirmesi

DRES'ler, enerji dönüşümünde önemli bir rol oynayarak temiz enerji üretimini artırmakta ve fosil yakıt bağımlılığını azaltmaktadır. DRES teknolojisinin geliştirilmesiyle çevresel ve sosyal etkilerinin değerlendirilme gerekliliği daha da artmaktadır.

DRES'in kurulumu ve işletilmesi, deniz ekosistemleri üzerinde önemli etkiler yaratabilmektedir. İnşaat ve bakım aşamalarında deniz biyolojik çeşitliliği üzerinde belirgin etkiler görülmektedir. Özellikle inşaat sırasında oluşan gürültü ve fiziksel etkiler, deniz canlılarının yaşam alanlarını bozabilmektedir. Mevsimsel kısıtlamalar ve ses azaltma teknolojileri kullanılarak bu etkiler azaltılmaya çalışılmakta, ancak bu süreçler hala dikkatli bir izleme ve düzenleme gerektirmektedir. Rüzgâr türbinlerinin hem mekanik hem de aerodinamik gürültüleri, özellikle kıyı bölgelerinde yaşayan insanlar ve deniz hayvanları için rahatsızlık yaratmaktadır. Mekanik gürültü, dişli kutusu ve jeneratörlerden kaynaklanırken, aerodinamik gürültü pervanelerin hava ile etkileşiminden ortaya çıkmaktadır. Gürültü azaltma teknolojileri, akustik kılıflar ve özel dişiler kullanarak bu sorunu minimize etme amacını taşımaktadır. Estetik kirlilik ise, deniz manzarası üzerinde görsel etkiler yaratabilmektedir. Rüzgâr türbinleri, özellikle kuş göç yolları üzerinde tehlike oluşturabilmektedir. Kuşlar ve yarasalar, türbinlere çarpabilmekte ve bu durum ekosistem dengelerini bozabilmektedir. Kuşların çarpmasını önlemek için dikkat çekici ışıklar ve sesler kullanılmakta, ancak bu yöntemlerin etkinliği konusunda daha fazla araştırma yapılması gerekmektedir. Son olarak, DRES projeleri sırasında hafriyat, toz ve inşaat atıkları gibi çevresel etkilerle karşılaşmaktadır. Bu atıkların yönetimi, çevreye olan olumsuz etkileri azaltmak için önemlidir. Deniz ekosistemine zarar vermemek için gerekli önlemler alınmalı ve atık yönetim sistemleri etkin bir şekilde uygulanmalıdır.

DRES projeleri, yerel ekonomik gelişime ve istihdama katkıda bulunabilir. DRES'ler, bölgesel gelişimi destekleyebilir ve denizsel endüstri ile teknolojilere katkıda bulunabilir. Ancak, deniz trafiği ve deniz ulaşımındaki değişiklikler yerel balıkçılık ve diğer deniz tabanlı aktiviteler üzerinde etkili olabilir. DRES'ler, kıyı bölgelerinde yaşayan topluluklar için estetik ve gürültü kirliliği gibi sosyal kabul sorunları yaratabilir. Bu santrallerin görünürlüğü ve gürültü seviyesi, kıyı yerleşimlerinin yaşam kalitesini etkileyebilir. Proje planlamasında, yerel toplulukların görüş ve endişeleri dikkate alınmalı ve etkiler minimize edilmelidir. Ek olarak, rüzgâr türbinlerinin etrafında belirli bir sağlık koruma bandının oluşturulması gerekmektedir. Türbinlerin çevresindeki alanların güvenlik önlemleriyle korunması, tehlikeleri azaltacaktır.

DRES'lerin yapımında kullanılan nadir toprak elementleri ve metaller, insan hakları ve çevresel etkiler açısından endişelere neden olabilir. Bu malzemelerin madenciliği, ESG (Çevresel, Sosyal ve Yönetişim) endişelerini artırmaktadır ve bu durum yatırımcıların ve kamuoyunun tepkilerine yol açabilir. Bu risklerin yönetilmesi, temiz enerjinin sürdürülebilirliğini desteklemek için kritik öneme sahiptir. Ayrıca, DRES'lerin geliştirilmesi yüksek maliyetler ve teknik zorluklar içermektedir. Deniz derinliği ve aşındırıcı ortam, altyapı ve bakım süreçlerini zorlaştırabilir. Ayrıca, kablolama ve enerji iletim sistemlerinin deniz içinde kurulumu, ek önlemler ve yüksek maliyetler gerektirir. Sonuç olarak, DRES'ler, temiz enerji üretimi açısından büyük fırsatlar sunarken, çevresel ve sosyal etkileri de göz önünde bulundurulmalıdır. Bu etkilerin minimize edilmesi ve sürdürülebilir bir enerji üretimi sağlanması için dikkatli bir planlama ve düzenleme süreci gerekmektedir.

6.2. Karbon Ayak İzi ve İklim Değişikliği ile Mücadele

DRES'ler, karbon ayak izi ve iklim değişikliği açısından önemli avantajlar sunar, ancak bu santrallerin çevresel etkilerini de dikkate almak gereklidir.

DRES'lerin karbon ayak izi üzerindeki en büyük olumlu etkilerinden ilki sağladığı düşük karbon emisyonudur. DRES'ler, elektrik üretiminde fosil yakıt kullanmadığı için doğrudan karbon emisyonu yapmaz. Bu, sera gazı emisyonlarının azalmasına katkıda bulunur. Ayrıca, DRES türbinleri genellikle karasal türbinlere göre daha yüksek verimlilik göstererek enerji verimliliğine katkıda bulunur. Çünkü deniz üzerindeki rüzgarlar genellikle daha sabit ve güçlüdür. Bu da daha fazla enerji üretimi anlamına gelir. DRES'lerin karbon ayak izine ve iklim değişikliği üzerindeki olumlu etkilerine nazaran içerdiği tehlikeler de bulunmaktadır. İlk olarak, kurulum aşamalarındaki emisyon riskinden bahsedilebilir. Türbinlerin üretimi, taşınması ve kurulumu, yüksek enerji tüketimi ve emisyonlar gerektirir. Bu süreçler, karbon ayak izini artırabilir. Bir diğer olumsuz etki ise DRES'lerden doğan atıklardır. Türbinlerin kullanım ömrü sona erdiğinde, malzeme atıkları çevresel sorunlar yaratabilir. Özellikle kompozit atıkların geri dönüşümü hâlâ zorluk teşkil etmektedir.

DRES'lerin artan küresel ısınma ve iklim değişikliği üzerindeki etkileri de oldukça fazladır. Başlıca etkilerinden biri sera gazı azaltımına yardımcı olmalarıdır. Rüzgâr enerjisi, kömür, petrol veya doğal gaz gibi fosil yakıtlara dayalı enerji kaynaklarına göre çok daha düşük sera gazı emisyonlarına sahiptir. Bu, genel sera gazı konsantrasyonlarını azaltmaya yardımcı olur. Rüzgâr enerjisi, yenilenebilir bir kaynak olduğu için sürdürülebilir bir enerji sağlayarak fosil yakıtların yerine geçebilir. Ancak DRES'lerden bahsederken değinilmesi gereken bazı çevresel riskler de bulunmaktadır. Bunlardan en önemlisi yerel iklim üzerindeki etkileridir. Büyük ölçekli deniz üstü rüzgâr santralleri, deniz yüzeyinin üzerinde değişikliklere neden olabilir. Bu değişiklikler, yerel hava koşullarını etkileyebilir. Ancak bu etkiler genellikle küçük ve lokaldir. Deniz üstü rüzgâr enerjisi santralleri şüphesiz ekosistem üzerinde de etkilidir. Türbinler, deniz ekosistemlerini etkileyebilir, deniz canlıları ve kuşlar üzerinde potansiyel olumsuz etkileri olabilir. Bununla birlikte, bu etkilerin çoğu iyi planlanan ve yönetilen projelerde minimize edilebilir.

Sonuç olarak, DRES'ler, genel olarak karbon ayak izini azaltma ve iklim değişikliğiyle mücadele konusunda önemli avantajlar sağlar. Fosil yakıtların yerini alarak sera gazı emisyonlarını düşürürler. Ancak, bu santrallerin çevresel etkileri de göz önünde bulundurulmalı ve dikkatlice yönetilmelidir.

7. Hukuki ve Düzenleyici Çerçeve

Ülkemizde, DRES'leri doğrudan ele alan bir düzenleme bulunmamaktadır. Buna karşın DRES'lere yönelik süreç öncelikle YEKA uygulaması kapsamında 2018 yılından itibaren kamu otoritesi gündeminde yer almış, uluslararası işbirliği ve finansman çalışmaları ile desteklenerek Türkiye Ulusal Enerji Planı'ndaki hedefler arasına girmiştir.⁴⁹

DRES projelerinin çevre, deniz ve hava trafiği, koruma alanları, kıyı yapıları gibi alanlara da etkisi nedeniyle farklı alanlarda yasal düzenleme ihtiyaçları da bulunmaktadır. Bu kapsamda, 3621 sayılı Kıyı Kanunda 10.12.2018 tarihinde gerçekleştirilen değişiklikle⁵⁰ kıyıda imar planı kararı ile enerji iletim hatları⁵¹ yapılabilmeye; 11.05.2024 tarihinde gerçekleştirilen değişiklikle⁵² denizlerin YEKA olarak ilan edilen alanlarında imar planı yapılmaksızın yenilenebilir enerji üretim santrallerinin kurulmasına imkân sağlanmıştır.

Mevzuat yönünden önemli bir açık ve serbest özel sektör yatırımının özellikle önünü kapayacak önemde bir konu, deniz üstü sahalarının kullanım haklarıdır. Karasal rüzgâr enerjisi projelerinde, enerji projesinin geliştirileceği sahanın saptanması ve kullanım haklarının acil kamulaştırma yoluyla istimlak edilerek proje sahibine tahsis edilmesi biçiminde, detaylı bir mevzuat ve oturmuş bir uygulama bulunmaktadır. Hatırlanacağı üzere, özel mülkiyete açık alanlarda Danıştay'ın 2004 yılında oturttuğu emsallerle beraber, her bir enerji projesi için kamu yararı kararı ve acele kamulaştırma kararı hususi ve tahdidi olarak çıkarılmakta, proje sahaları kamulaştırıldıktan sonra proje sahibine bedel karşılığı kullandırılıyordu.⁵³ Buna mukabil, DRES projelerinde bu yöntem söz konusu değildir, zira karasuları özel mülkiyete müsait olmadığı gibi teknik anlamıyla eşya hukuku gereği taşınmaz niteliğinde değildir. Dolayısıyla, yalnızca YEKA projesi gibi projeden projeye alan tahsisiyle değil, özel sektörün kendi girişimiyle deniz üstü rüzgâr enerjisi projeleri geliştirilecekse, bu sahalarda üzerindeki haklar, ileride tesisin finansman amaçlı rehnedilmesine de müsait biçimde yasal düzenlemeye kavuşmalıdır. Örneğin; kamu-özel işbirliği yöntemiyle yapılacak şehir hastanelerinin bazılarının özel mülkiyete konu olamayan orman arazisinde bulunması sebebiyle, orman kullanım izinleriyle yapılan tesisler finansman sürecinde rehnedilemediklerinden, bu tesislerin üst hakkı tesisi yoluyla taşınmaz statüsüne kavuşmasının yolu Orman Kanunu'na getirilen Ek 11. Maddeyle açılmıştır; buna benzer bir düzenlemeyle mevzuatın belirlilik kazanması gerekmektedir.

01.05.2023 tarihli 32177 sayılı Resmî Gazete'de yayınlanan 7189 Karar Sayılı Cumhurbaşkanı Kararına istinaden 01.07.2021 tarihinden 31.12.2030 tarihine kadar işletmeye girecek YEK belgeli deniz-üstü rüzgâr enerjisine dayalı üretim tesisleri için destekleme taban fiyatı 67,5 dolar/MWh, tavan fiyatı ise 82,5 dolar/MWh olarak belirlenmiştir. Söz konusu tesisler için yerli katkı fiyatı ise 87,5 TL/MWh'tır. YEKDEM uygulama süresi 10 yıl, yerli katkı fiyatı uygulama süresi ise 5 yıl olarak düzenlenmiştir.⁵⁴

⁴⁹ ETKB. https://enerji.gov.tr/Media/Dizin/EIGM/tr/Raporlar/TUEP/T%C3%BCrkiye_Ulusal_Enerji_Plan%C4%B1.pdf

⁵⁰ Resmî Gazete, 2018. <https://www.resmigazete.gov.tr/eskiler/2018/12/20181210-4.htm>

⁵¹ Resmî Gazete, 2020. <https://www.resmigazete.gov.tr/eskiler/2020/10/20201024-2.htm>

⁵² Resmî Gazete, 2024. <https://www.resmigazete.gov.tr/eskiler/2024/05/20240511-1.htm>

⁵³ Benzer bir model TEİAŞ'ın bağlantı anlaşması için elektrik iletim hattı geçirilmesi maksadıyla mecra hakkı tesisi yoluyla kamulaştırmalarında da uygulanmaktadır; ancak bu durumda iletim hattı doğrudan proje sahibine tahsis edilmemekte, TEİAŞ yalnızca kamulaştırma bedellerini proje sahibine rücu etmektedir.

⁵⁴ Resmî Gazete, 2023. <https://www.resmigazete.gov.tr/eskiler/2023/05/20230501-7.pdf>

Avrupa Birliği (AB) müktesebatında da DRES projelerinin düzenlenmesi epeyce erken evrededir. Henüz belirgin kurallar ve teşvikler ortaya koyan bir enstrüman bulunmamakla beraber, DRES'lerin potansiyeline ulaşma maksadıyla ilk defa 2020'de AB stratejisi açıklanmıştır, buna göre 2030, 2040 ve 2050 için ayrı ayrı hedefler belirlenmiştir. Bu strateji hedeflerine ulaşılması ve birden fazla AB ülkesinin kıta sahanlığına dahil sularda proje geliştirilmesi maksadıyla bölgesel işbirliği anlaşmaları ve teşviklerin ana hatları ortaya konmuştur; ancak detaylı hukuki düzenlemeler halen beklenmektedir.

8. Gelecek Perspektifleri

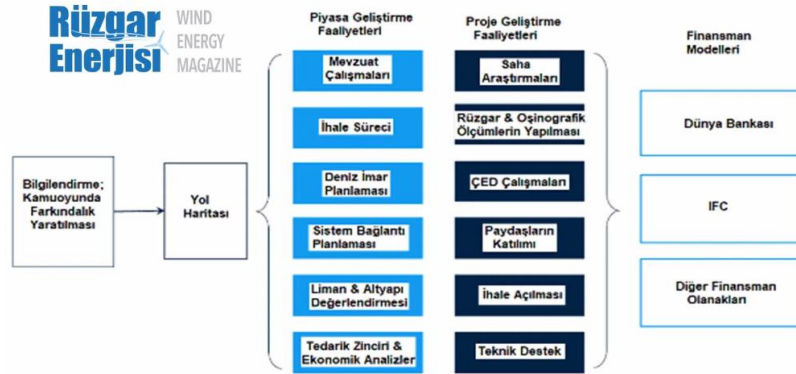
GWEC tarafından yapılan güncel bir çalışmaya göre 2024–2028 dönemindeki küresel rüzgâr enerjisi toplam kapasitesinin 2023 projeksiyonuna göre %10 oranında artması tahmin edilmektedir. Yeni kurulumların 2029 yılında 40 GW, 2032 yılında ise 60 GW seviyelerini geçmesi beklenmektedir. Yine aynı çalışma önümüzdeki on yılda (2024–2033) DRES kapasitesinin 410 GW'tan fazla artması öngörülmektedir ve 2033 yılı sonunda 486 GW'a ulaşacağı tahmin edilmektedir. Yıllık DRES kurulumlarının 2023'teki 10,8 GW'tan 2028'de üç katına çıkarak 66 GW'a ulaşması beklenmektedir. 2033 yılına kadar rüzgâr enerjisi içindeki toplam DRES kapasitesinin payı %9'dan en az %25'e çıkması öngörülmektedir.

Çin'deki güçlü büyüme ve gelişen yeni Asya pazarları, Rus petrolü ve doğal gazından enerji bağımsızlığı hedefi ile iklim değişikliği taahhütlerinin yerine getirilmesi, kıtanın yıllık kurulumlarının 2028'de 10 GW ve 2030'da 20 GW'ı aşmasını muhtemel kılmaktadır.

ABD için 2030 yılına kadar DRES kurulum tahmininin 15 GW olacağı öngörülmektedir, Kuzey Amerika 2033'te üçüncü en büyük DRES pazarı olmaya devam edecek ve bunu Latin Amerika takip edecektir. Afrika ve Orta Doğu'da tahmin döneminde offshore rüzgâr kurulumlarının yapılması beklenmemektedir.

2023 yılı sonunda dünya genelindeki toplam DRES kurulumlarının %95'i Çin ve Avrupa tarafından gerçekleştirilmiştir. Bu iki pazar, gelecekte de DRES büyümesinde baskın olmaya devam edecek olsa da toplam küresel pazar paylarının 2028'de %88 ve 2033'te %80'e düşmesi beklenmektedir. Bu düşüş, diğer APAC pazarlarındaki ve ABD'deki büyümeler nedeniyle yaşanacaktır. Brezilya'da 180 GW'tan fazla proje bulunmakta ve Kolombiya'da bazı ilerlemeler sağlanmış durumdadır. Bu nedenle Latin Amerika'da ilk büyük ölçekli DRES projesinin 2030'ların başında devreye alınması öngörülmektedir.

Ülkemizde 2035 yılına kadar 5 GW hedef konulmuştur. Ülkemiz için önerilen hedefler; 2040 yılına kadar 10 GW, 2050 yılına kadar ise 30 GW şeklindedir.⁵⁵



Şekil 7: DRES Yol Haritası

Kaynak: www.ruzgarenerjisi.com.tr

Türkiye'de 2018 yılında 1.200 MW kapasiteli 80 dolar/MWh taban fiyatlı ve profesyonelce tasarlanmış bir DRES ihalesi düzenlenmiştir. Ancak şartnameyi alan çok sayıda firma olmasına rağmen, ihaleye katılım

⁵⁵ <https://www.ruzgarenerjisi.com.tr/denizustu-ruzgar-enerjisi-turkiye-yol-haritasi/>

olmamıştır. 2023 yılında ise ETKB, Bandırma, Bozcaada, Gelibolu ve Karabiga'yı DRES için yeni aday YEKA olarak tahsis etmiştir. Ayrıca Çandarlı Limanı'nın da "Deniz-üstü Rüzgâr Enerjisi Üretim Bölgesi" olarak ilan edilmesi istenmektedir.⁵⁶

TEKSİS İleri Teknolojiler Genel Müdürü Hüseyin Devrim, Türkiye'nin ilk DRES ve yeşil hidrojen üretimi entegrasyonu girişimlerinden biri olan "Güney Marmara Hidrojen Kıyısı" projesinin de sektörde önemli bir gelişme olduğunu belirtmektedir. Özellikle Marmara Denizi'nde Karabiga açıklarının ve Bandırma-Biga hattının, "Güney Marmara Yeşil Endüstri Bölgesi"ne dönüştürülmesi planlanmaktadır. Bu bölgenin, DRES ve yeşil hidrojen entegrasyonunu artırarak, Türkiye'nin yeşil enerji üretiminde önemli bir merkez haline gelebileceği değerlendirilmektedir.⁵⁷

Türkiye'de DRES gelişimiyle ilgili kanuni bir düzenleme henüz bulunmamaktadır. DRES projelerinde planlanmada yaşanan gecikmeler projenin yatırım maliyetlerinde ciddi artışlara neden olduğu için, ilgili yasal mevzuatın gerekli tüm izin ve lisansları içerecek şekilde belirlenmesi gerekmektedir.

⁵⁶ Dünya Gazetesi. <https://www.dunya.com/is-dunyasi/candarli-limani-denizustu-res-limani-olmali-haberi-715831>

⁵⁷ Yeşil Haber. <https://yesilhaber.net/deniz-ustu-resler-turkiyenin-elektrik-ve-yesil-hidrojen-gelecegi/>



MECLİSİ MEBUSAN CAD.
NO:81 FINDIKLI İSTANBUL 34427, TÜRKİYE
T: +90 (212) 334 50 50 F: +90 (212) 334 52 34

Bu rapor, Türkiye Sınai Kalkınma Bankası (TSKB) A.Ş.'nin uzman kadrosunca güvenilir olarak kabul edilen kaynaklardan elde edilen veriler kullanılarak hazırlanmıştır. Raporunda yer alan görüşler ve öngörüler, teknik ve akademik bilgiler ile sektör temsilcileriyle yapılan görüşmelerden elde edilen sonuçları yansıtmakta olup bu verilerin tamlığı ve doğruluğu konusunda TSKB'nin herhangi bir sorumluluğu bulunmamaktadır. Raporunda yer verilen değerlendirme, görüş, düşünce ve öngörüler, TSKB nezdinde açık ya da gizli bir garanti ve beklenti oluşturmaz. Diğer bir ifadeyle; bu raporda yer alan tüm bilgi ve verileri kullanma ve uygulama sorumluluğu, doğrudan veya dolaylı olarak, bu rapora dayanarak yatırım kararı veren ya da finansman sağlayan kişilere aittir ve ortaya çıkan sonuçtan dolayı üçüncü kişilerin doğrudan ya da dolaylı olarak zarara uğramaları durumunda TSKB hiçbir şekilde sorumlu tutulamaz.

©2024 Bu raporun tüm hakları saklıdır. TSKB'nin izni olmadan raporun içeriği herhangi bir şekilde basılamaz, çoğaltılamaz, fotokopi veya teksir edilemez, dağıtılamaz.