ENERJİ VE SÜRDÜRÜLEBİLİRLİK

Enerji Kaynakları, Çevresel Etkiler ve Enerji Okuryazarlığı

Özgün Eser Editörü

Prof: Dr. Hülya KARA SUBAŞAT

Türkçe Çeviri ve Çeviri Editörlüğü

Doç. Dr. Gürcan ÇETİN ve Özay EROĞLU

All Sciences Academy

Temmuz 2026

ENERJİ VE SÜRDÜRÜLEBİLİRLİK: Enerji Kaynakları, Çevresel Etkiler ve Enerji Okuryazarlığı

İngilizce özgün baskıdan Türkçeye çevrilmiştir.

Özgün Eser Editörü
Prof. Dr. Hülya KARA SUBAŞAT

Türkçe Çeviri ve Çeviri Editörlüğü
Doç. Dr. Gürcan ÇETİN
Özay EROĞLU

Prof. Dr. Hülya Kara Subaşat – Muğla Sıtkı Koçman Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Enerji ABD, Moleküler Nano-Malzeme Laboratuvarı, Muğla, Türkiye, hulyasubasat@mu.edu.tr, orcid.org/0000-0002-2032-8930

Doç. Dr. Gürcan Çetin – Muğla Sıtkı Koçman Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Bilişim Sistemleri Mühendisliği Bölümü, Muğla, Türkiye
gcetin@mu.edu.tr, orcid.org/0000-0003-3186-2781

Özay Eroğlu – Muğla Sıtkı Koçman Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Enerji ABD, Moleküler Nano-Malzeme Laboratuvarı, Muğla, Türkiye
ozayeroglu2@posta.mu.edu.tr, orcid.org/0000-0001-6268-9155

ENERJİ VE SÜRDÜRÜLEBİLİRLİK

Enerji Kaynakları, Çevresel Etkiler ve Enerji Okuryazarlığı

İngilizce özgün baskıdan Türkçeye çevrilmiştir.

Özgün Eser: Energy and Sustainability: Energy Resources, Environmental Impacts, and Energy Literacy

Özgün Eser Editörü: Prof. Dr. Hülya KARA SUBAŞAT

Türkçe Çeviri: Doç. Dr. Gürcan ÇETİN ve Özay EROĞLU
Çeviri Editörlüğü: Doç. Dr. Gürcan ÇETİN ve Özay EROĞLU

Dizayn: All Sciences Academy Design
Basım Tarihi: Temmuz 2026
Yayıncı Sertifika Numarası: 72273
ISBN: 978-625-8839-05-0
Doi: https://doi.org/10.5281/zenodo.21433525

© All Sciences Academy

www.allsciencesacademy.com
allsciencesacademy@gmail.com

Bu kitap, All Sciences Academy tarafından yayımlanan Energy and Sustainability: Energy Resources, Environmental Impacts, and Energy Literacy başlıklı İngilizce özgün eserin Türkçe çevirisi olarak hazırlanmıştır. Türkçe çeviri ve çeviri editörlüğü **Doç. Dr. Gürcan ÇETİN ve Özay EROĞL**U tarafından yürütülmüştür.

Özgün Eser Proje Ekibi ve Bölüm Katkı Sağlayanları

Bu kitap, Prof. Dr. Hülya Kara Subaşat editörlüğünde hazırlanan İngilizce özgün eserin Türkçe çevirisidir. Özgün eserin hazırlanması sürecinde GREENLIGHT proje ekibinin akademik, eğitsel ve proje temelli katkılarından yararlanılmıştır. Türkçe çeviri ve çeviri editörlüğü Doç. Dr. Gürcan Çetin ve Özay Eroğlu tarafından yürütülmüştür.

GREENLIGHT Proje Ortakları

Muğla Sıtkı Koçman Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Enerji ABD, Moleküler Nano-Malzeme Laboratuvarı, Muğla, Türkiye; Muğla Sıtkı Koçman Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Bilişim Sistemleri Mühendisliği Bölümü, Muğla, Türkiye

Eğitim Araştırma Merkezi, Minho Üniversitesi, Braga, Portekiz; Fizik Merkezi, Bilim Fakültesi, Minho Üniversitesi, 4710-057 Braga, Portekiz

Liofyllo Social Cooperative Enterprise, Patras, Yunanistan

Şehit Mehmet Çetin Anadolu İmam Hatip Lisesi, Muğla, Türkiye

AESAS, Agrupamento de Escolas Alberto Sampaio, Braga, Portekiz

DSU-RCSOO Nikola Karev, Strumica, Kuzey Makedonya

TEŞEKKÜR VE PROJE BİLGİSİ

Bu kitap, Erasmus+ Programı kapsamında yürütülen **GREENLIGHT: Generating Renewable Energy Education Network – Leading Initiatives for Green & Harmonious Tomorrows** başlıklı proje kapsamında geliştirilen bilgi, deneyim ve eğitsel çıktılardan yararlanılarak hazırlanmıştır.

Proje numarası: 2023-2-TR01-KA220-SCH-000180691

GREENLIGHT projesi, yenilenebilir enerji eğitimi, enerji okuryazarlığı, sürdürülebilirlik ve çevre bilinci alanlarında öğretmenler ve öğrenciler için yenilikçi öğrenme kaynakları geliştirmeyi amaçlamaktadır. Bu kitap, proje kapsamında oluşan bilgi birikimini ve deneyimi akademik kitap formatında genişletmeyi; enerji eğitimi, sürdürülebilirlik ve çevre bilinci alanlarına katkı sunmayı hedeflemektedir.

Editör, çeviri editörleri ve çevirmenler, GREENLIGHT proje ekibinin ve bölümlere katkı sağlayanların akademik, eğitsel ve proje temelli katkılarını içtenlikle takdir etmektedir. Uzmanlıkları, geri bildirimleri, eğitim deneyimleri, proje etkinlikleri ve ülkelere özgü bakış açıları bu yayının içeriğini, örneklerini ve uluslararası boyutunu zenginleştirmiştir.

Bu yayında ifade edilen görüşler yalnızca editöre, çeviri editörlerine, çevirmenlere ve katkı sağlayanlara aittir; Avrupa Birliği, Avrupa Komisyonu veya Türkiye Ulusal Ajansı'nın görüşlerini yansıtmak zorunda değildir. Avrupa Birliği, Avrupa Komisyonu ve Türkiye Ulusal Ajansı, bu yayının içeriğinden veya burada yer alan bilgilerin kullanımından sorumlu tutulamaz.

ÇEVİRİYE NOT

Bu kitap, Energy and Sustainability: Energy Resources, Environmental Impacts, and Energy Literacy başlıklı İngilizce özgün eserin Türkçe çevirisi olarak hazırlanmıştır. İngilizce özgün eserin editörlüğü Prof. Dr. Hülya Kara Subaşat tarafından yürütülmüş; eser All Sciences Academy tarafından Haziran 2026 tarihinde yayımlanmıştır. Özgün esere ait ISBN ve DOI bilgileri yayın bilgileri sayfasına aktarılmıştır. Türkçe çeviri ve çeviri editörlüğü Doç. Dr. Gürcan Çetin ve Özay Eroğlu tarafından yürütülmüştür.

Türkçe çeviri sürecinde metnin bilimsel içeriği korunmuş; kavramların Türkçe karşılıklarının açık, anlaşılır ve eğitim amaçlı kullanıma uygun olmasına özen gösterilmiştir. Kitabın amacı, enerji kaynakları, çevresel etkiler, sürdürülebilirlik ve enerji okuryazarlığı konularını Türkçe okuyucular için erişilebilir ve bilimsel temelli bir biçimde sunmaktır.

Çeviri sürecinde, özgün metindeki bilimsel kavramların anlam bütünlüğü korunurken Türkçe akademik anlatıma uygun bir dil tercih edilmiştir. Özellikle enerji dönüşümü, yenilenebilir enerji teknolojileri, çevresel etkiler ve enerji okuryazarlığı gibi alanlarda kullanılan terimlerin tutarlı olmasına dikkat edilmiştir.

Bu çeviri baskının, öğrenciler, öğretmenler, akademisyenler, proje ortakları ve enerji ile çevre konularına ilgi duyan tüm okuyucular için yararlı bir kaynak olmasını umuyoruz.

Türkçe Çeviri ve Çeviri Editörlüğü
Doç. Dr. Gürcan ÇETİN
Özay EROĞLU

İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR VE PROJE BİLGİSİ 4
ÖNSÖZ 8
ÖZET 9
GİRİŞ 10
BÖLÜM 1: ENERJİ VE ÇEVRE 13
1.1. Enerjinin Tanımı ve Türleri 13
1.2. Enerji Okuryazarlığı ve Enerjiye İlişkin Kavram Yanılgıları 14
1.3. Enerji Dönüşümleri: Korunum, Verimlilik ve Çevresel Sonuçlar 16
1.4. Enerji Kullanımı ve Çevresel Etkiler 16
1.5. İklim Değişikliği ve Karbon Ayak İzi 18
1.6. Sera Etkisi ve İnsan Kaynaklı Sera Gazları 19
1.7. Enerji Verimliliği ve Sürdürülebilir Tüketim 21
1.8. Sürdürülebilir Bir Gelecek İçin Enerji Eğitimi 23
1.9. Bölüm Özeti ve Tartışma Soruları 24
BÖLÜM 2: ENERJİ KAYNAKLARI 26
2.1. Enerji Kaynaklarının Temel Sınıflandırılması 26
2.2. Birincil Enerji, İkincil Enerji ve Enerji Taşıyıcıları 28
2.3. Yenilenemeyen Enerji Kaynakları: Genel Değerlendirme 29
2.4. Yenilenebilir Enerji Kaynakları: Genel Değerlendirme 30
2.5. Enerji Kaynaklarını Değerlendirme Ölçütleri: Karar Verme Çerçevesi 31
2.6. Enerji Güvenliği, Uygulanabilirlik ve Toplumsal Kabul 32
2.7. Sürdürülebilir Enerji Karması ve Karar Verme 33
2.8. Enerji Okuryazarlığı Açısından Değerlendirme 33
2.9. Bölüm Özeti ve Tartışma Soruları 34
BÖLÜM 3: YENİLENEMEYEN ENERJİ KAYNAKLARI VE ÇEVRESEL ETKİLERİ 36
3.1. Fosil Enerji Kaynakları 37
3.2. Nükleer Enerji 39
3.3. Yenilenemeyen Enerji Kaynaklarının Çevresel Etkileri 40
3.4. Karbon Yakalama, Metan Azaltımı ve Geçiş Teknolojileri 41
3.5. Yenilenemeyen Enerji Kullanımının Küresel ve Avrupa Ölçeklerinde Durumu 42
3.6. Seçilmiş Ülke Örneklerinde Yenilenemeyen Enerji Kullanımı 43
3.7. Enerji Okuryazarlığı Açısından Değerlendirme 44
3.8. Bölüm Özeti ve Tartışma Soruları 45
BÖLÜM 4: YENİLENEBİLİR ENERJİ KAYNAKLARI VE ÇEVRESEL ETKİLERİ 47
4.1. Küresel Yenilenebilir Enerji Kullanımı 48
4.2. Avrupa'da Yenilenebilir Enerji Kullanımı 50
4.3. Yenilenebilir Enerjiye Geçişin Temel Nedenleri 51
4.4. Yenilenebilir Enerjinin Çevresel Yararları 53
4.5. Yenilenebilir Enerjinin Sınırlılıkları ve Planlama Gereklilikleri 53
4.6. Şebeke Entegrasyonu, Depolama ve Enerji Verimliliği 55
4.7. Toplumsal Kabul, Yerel Etkiler ve Adil Geçiş 57
4.8. Enerji Okuryazarlığı Açısından Değerlendirme 58
4.9. Bölüm Özeti ve Tartışma Soruları 60
BÖLÜM 5: GÜNEŞ, RÜZGÂR VE HİDROELEKTRİK ENERJİ 62
5.1. Güneş Enerjisi 63

5.2. Rüzgâr Enerjisi 69
5.3. Hidroelektrik Enerji 75
5.4. Güneş, Rüzgâr ve Hidroelektrik Enerjinin Karşılaştırmalı Değerlendirmesi 81
5.5. Bölüm Özeti ve Tartışma Soruları 82
BÖLÜM 6: JEOTERMAL, DENİZ-OKYANUS VE BİYOENERJİ KAYNAKLARI 83
6.1. Jeotermal Enerji 84
6.2. Deniz ve Okyanus Enerjisi 90
6.3. Biyoenerji Kaynakları: Biyokütle ve Biyoyakıtlar 96
6.4. Jeotermal, Deniz-Okyanus ve Biyoenerji Kaynaklarının Karşılaştırmalı Değerlendirmesi 104
6.5. Bölüm Özeti ve Tartışma Soruları 105
BÖLÜM 7: YENİLENEBİLİR ENERJİ TÜRLERİNİN KARŞILAŞTIRILMASI, YEŞİL HİDROJEN VE BÜTÜNLEŞİK ENERJİ SİSTEMLERİ 107
7.1. Yenilenebilir Enerji Türlerinin Karşılaştırmalı Değerlendirmesi 107
7.2. Kullanım Alanlarına Göre Yenilenebilir Enerji Kaynakları 109
7.3. Bütünleşik Yenilenebilir Enerji Sistemleri 110
7.4. Bütünleşik Enerji Sistemlerinde Yeşil Hidrojenin Rolü 111
7.5. Seçilmiş Ülke Örneklerine Dayalı Genel Değerlendirme 118
7.6. Enerji Okuryazarlığı Açısından Genel Değerlendirme 119
7.7. Bölüm Özeti ve Tartışma Soruları 120
SONUÇ 122
KAYNAKÇA 126

ÖNSÖZ

Sevgili Okuyucular,

Enerji, modern toplumu şekillendiren en temel konulardan biridir. Günlük yaşamı, sanayiyi, ulaşımı, eğitimi, teknolojiyi ve çevre politikalarını etkiler. Teknik boyutunun ötesinde enerji; çevresel, ekonomik, toplumsal ve etik yönlere de sahiptir. Bu nedenle enerji kaynaklarını, enerji dönüşümlerini ve bunların etkilerini anlamak, sürdürülebilir bir gelecek kurmak için gereklidir.

Bu kitap, enerji ve çevre arasındaki ilişkiyi açık, anlaşılır ve bilimsel açıdan güvenilir bir biçimde sunmak amacıyla hazırlanmıştır. Kitapta önce enerji, enerji okuryazarlığı ve enerji kaynaklarını değerlendirmede kullanılan ölçütlere ilişkin temel kavramlar tanıtılmakta; ardından yenilenebilir ve yenilenemeyen enerji kaynakları karşılaştırmalı olarak ele alınmaktadır.

Güneş, rüzgâr, hidroelektrik, jeotermal, deniz ve okyanus enerjisi, biyokütle ve biyoyakıtlar gibi yenilenebilir enerji teknolojileri; çalışma ilkeleri, uygulamaları, avantajları, sınırlılıkları ve çevresel etkileri bakımından incelenmektedir. Yeşil hidrojen de entegre yenilenebilir enerji sistemlerini destekleyebilecek tamamlayıcı bir enerji taşıyıcısı olarak ele alınmaktadır.

Bu kitabın temel amaçlarından biri enerji okuryazarlığını geliştirmektir. Enerji okuryazarlığı yalnızca bilgi edinmeyi değil, enerji kullanımının çevresel ve toplumsal sonuçlarını anlamayı, enerji seçeneklerini karşılaştırmayı, bilinçli kararlar vermeyi ve sürdürülebilirlik için sorumlu eylemleri desteklemeyi de içerir.

Öğrenmeyi ve eleştirel düşünmeyi desteklemek, ayrıca günlük yaşamda sürdürülebilir tercihlere ilişkin farkındalığı artırmak amacıyla kitapta açık bir dil, karşılaştırmalı açıklamalar, bölüm özetleri ve değerlendirme soruları kullanılmıştır. Bu kitabın öğrenciler, öğretmenler, akademisyenler, profesyoneller, politika yapıcılar ve enerji ile çevre konularına ilgi duyan tüm okuyucular için yararlı bir kaynak olmasını umuyorum.

Prof. Dr. Hülya KARA SUBAŞAT

ÖZET

Bu kitap, enerji kaynaklarını ve bunların çevresel etkilerini sürdürülebilirlik ve enerji okuryazarlığı perspektifinden incelemektedir. Enerjinin nasıl üretildiğini, dönüştürüldüğünü, kullanıldığını ve çevresel sorumluluk ile toplumsal karar verme süreçleri bağlamında nasıl değerlendirildiğini anlamaya yönelik açık, karşılaştırmalı ve bilimsel temelli bir çerçeve sunmayı amaçlamaktadır. Enerjiyi yalnızca teknik bir konu olarak ele almak yerine, çevresel, ekonomik, toplumsal ve eğitsel boyutlarını vurgulamaktadır. Kitapta yenilenemeyen ve yenilenebilir enerji kaynakları; iklim değişikliği, hava kirliliği, enerji güvenliği, yaşam döngüsü etkileri, toplumsal kabul, maliyet, süreklilik ve adil geçiş gibi konularla birlikte tartışılmaktadır. Güneş, rüzgâr, hidroelektrik, jeotermal, deniz ve okyanus enerjisi, biyokütle ve biyoyakıtlar dahil olmak üzere yenilenebilir enerji teknolojileri; sundukları olanaklar, sınırlılıkları ve planlama gereksinimleri açısından değerlendirilmektedir. Yeşil hidrojen de entegre yenilenebilir enerji sistemlerini destekleyebilecek tamamlayıcı bir enerji taşıyıcısı olarak konumlandırılmaktadır. Türkiye, Yunanistan, Portekiz ve Kuzey Makedonya'dan seçilmiş örnekler, enerji dönüşümlerinin yerel kaynaklara, altyapıya, politika önceliklerine ve toplumsal farkındalık düzeylerine bağlı olduğunu göstermektedir. Bilimsel bilgiyi sürdürülebilirlik farkındalığıyla birleştiren kitap, enerji okuryazarlığını güçlendirmeyi ve bilinçli, sorumlu ve kanıta dayalı karar vermeyi desteklemeyi amaçlamaktadır. Enerji konularına yalnızca teknik bilgiyle değil; çevresel sorumluluk, bilimsel düşünme, toplumsal katılım ve sorumlu karar verme çerçevesinde yaklaşılması gerektiğini vurgulamaktadır.

Anahtar Kelimeler: Enerji, çevre, yenilenebilir enerji, enerji okuryazarlığı, sürdürülebilirlik, iklim değişikliği, enerji verimliliği, yeşil hidrojen, entegre enerji sistemleri.

GİRİŞ

Enerji, insan yaşamının ve modern toplumların temel bileşenlerinden biridir. Aydınlatma, ısınma, ulaşım, sanayi üretimi, tarım, sağlık hizmetleri, iletişim teknolojileri ve eğitim sistemleri büyük ölçüde enerji kullanımına bağlıdır. Günlük yaşamda sıradan görünen pek çok faaliyet, farklı enerji kaynaklarının kullanılması ve enerjinin bir biçimden başka bir biçime dönüştürülmesi sayesinde mümkün olmaktadır.

Bununla birlikte enerji yalnızca teknik bir konu değildir. Çevresel, ekonomik, toplumsal, politik ve etik yönleri olan çok boyutlu bir alandır. Hangi enerji kaynaklarının kullanıldığı, bu kaynakların nasıl üretildiği, enerjiye kimlerin erişebildiği ve enerji kullanımından ne tür çevresel etkilerin ortaya çıktığı sürdürülebilir kalkınma açısından temel sorulardır. Bu nedenle enerjiyi anlamak yalnızca elektrik üretim teknolojilerini tanımak anlamına gelmez; insan faaliyetleri, doğal çevre, ekonomik gelişme ve toplumsal refah arasındaki ilişkileri anlamayı da gerektirir.

Sanayi Devrimi'nden bu yana dünya ekonomisi büyük ölçüde kömür, petrol ve doğal gaz gibi fosil yakıtlara dayalı olarak gelişmiştir. Bu kaynaklar ekonomik büyüme, kentleşme, ulaşım ve sanayi üretimi için önemli olanaklar sağlamıştır. Ancak yoğun kullanımları iklim değişikliği, hava kirliliği, ekosistem bozulması, enerji ithalatına bağımlılık ve kaynak tükenmesi gibi büyük sorunlara da yol açmıştır (Energy Institute, 2024; Intergovernmental Panel on Climate Change [IPCC], 2023).

Bu sorunlara yanıt olarak yenilenebilir enerji kaynakları giderek daha fazla önem kazanmıştır. Güneş, rüzgâr, hidroelektrik, jeotermal enerji, biyokütle ve deniz-okyanus enerjisi, daha düşük karbonlu ve daha sürdürülebilir enerji sistemleri için önemli fırsatlar sunmaktadır. Yenilenebilir elektrik kullanılarak üretilen yeşil hidrojen de bu sistemleri tamamlayıcı bir enerji taşıyıcısı olarak destekleyebilir (International Renewable Energy Agency [IRENA], 2024). Ancak enerji dönüşümü yalnızca fosil yakıtların yenilenebilir kaynaklarla değiştirilmesi anlamına gelmez. Enerji verimliliği, depolama teknolojileri, akıllı şebekeler, çevresel planlama, toplumsal farkındalık, finansman, teknolojik kapasite ve adil geçiş politikaları da bu dönüşümün ayrılmaz bileşenleridir (International Energy Agency [IEA], 2024; International Labour Organization [ILO], 2016).

Doğru planlandığında yenilenebilir enerji kaynakları fosil yakıtlara bağımlılığı azaltabilir, sera gazı emisyonlarını düşürebilir, enerji güvenliğine katkı sağlayabilir ve yerel kalkınmayı destekleyebilir. Bununla birlikte her kaynağın kendine özgü avantajları ve sınırlılıkları vardır. Güneş ve rüzgâr enerjisi değişken üretim özellikleri nedeniyle depolama ve şebeke planlaması gerektirir. Hidroelektrik enerji su rejimlerini, ekosistem dengesini ve yerel toplulukları etkileyebilir. Jeotermal enerji; kaynak yönetimi, reenjeksiyon ve yerel çevresel etkiler açısından dikkatli planlama gerektirir. Biyokütle ve biyoyakıtların sürdürülebilirliği hammadde kaynaklarına, arazi kullanımına ve yaşam döngüsü emisyonlarına bağlıdır. Hidrojen ise doğrudan bir birincil

enerji kaynağı değildir; üretildiği kaynağa bağlı olarak çevresel etkisi değişen bir enerji taşıyıcısıdır (IEA, 2025; NREL, 2021).

Bu nedenle yenilenebilir enerji kaynakları, enerji ve çevre sorunlarını tek başına çözen teknolojiler olarak görülmemelidir. Sürdürülebilir bir enerji sistemi; farklı enerji kaynaklarının birbirini tamamladığı, enerji verimliliğinin, depolamanın, akıllı şebekelerin, çevresel etki değerlendirmesinin ve toplumsal katılımın birlikte ele alındığı bütüncül bir yaklaşım gerektirir (IEA, 2024; IRENA, 2024).

Bu bağlamda enerji okuryazarlığı özellikle önem kazanmaktadır. Enerji okuryazarlığı, bireylerin enerjiyi, enerji kaynaklarını, enerji dönüşümlerini ve enerji kullanımının çevresel ve toplumsal etkilerini anlama kapasitesi olarak değerlendirilebilir. Bu kavram yalnızca enerji hakkında bilgi edinmekle sınırlı değildir; güncel literatürde bilgi, tutum, davranış, karar verme, sürdürülebilirlik farkındalığı ve sorumlu eylem boyutlarını içeren çok boyutlu bir yeterlilik olarak ele alınmaktadır (DeWaters et al., 2013; Ramachandran et al., 2024; Santillán and Cedano, 2023).

Enerjiyle ilgili kararlar, ev aletlerinin verimliliğinden ulaşım tercihlerine, ısıtma ve soğutma alışkanlıklarından tüketim kalıplarına, atık yönetiminden okul ve iş yerlerinde enerji tasarrufu uygulamalarına kadar günlük yaşamın pek çok alanında karşımıza çıkar. Buna karşın enerji sistemleri çoğu zaman görünmezdir. Elektriğin hangi kaynaktan üretildiğini, belirli bir yakıtın hangi çevresel maliyetleri doğurduğunu, yenilenebilir enerji teknolojilerinin hangi koşullarda daha etkili olduğunu veya enerji verimliliğinin neden önemli olduğunu fark etmek her zaman kolay değildir (DeWaters et al., 2013; Santillán and Cedano, 2023).

Enerji konuları aynı zamanda sosyobilimsel tartışmaların önemli alanlarıdır. İklim değişikliği, enerji güvenliği, enerji yoksulluğu, yenilenebilir enerji yatırımları, nükleer enerji, fosil yakıtların aşamalı olarak azaltılması, hidroelektrik projeleri, rüzgâr türbinlerinin yer seçimi ve biyoyakıtların arazi kullanımı üzerindeki etkileri yalnızca teknik hesaplamalarla açıklanamaz. Bu konular bilimsel bilginin yanı sıra etik değerlendirme, kanıta dayalı akıl yürütme, farklı bakış açılarını karşılaştırma, belirsizlikleri anlama ve kamusal karar verme süreçlerine katılım gerektirir (Sadler, 2004; Zeidler et al., 2005).

Bu kitap, enerji ve çevre ilişkisini çıkış noktası alarak enerji kaynaklarını erişilebilir, karşılaştırmalı ve eleştirel bir bakış açısıyla ele almaktadır. Enerji kaynaklarını yalnızca avantajları bakımından değil; sınırlılıkları, çevresel etkileri, yaşam döngüsü sonuçları ve ekonomik-toplumsal boyutları açısından da değerlendirmektedir. Böylece kitap, enerji okuryazarlığını desteklemeyi ve bilinçli, sorumlu ve kanıta dayalı karar vermeyi teşvik etmeyi amaçlamaktadır.

STEM eğitimi, sorgulamaya dayalı öğrenme, oyunlaştırma, yerel çevre sorunlarına dayalı etkinlikler ve yeşil beceriler gibi eğitim yaklaşımları enerji okuryazarlığını destekleyen önemli araçlar olarak görülmektedir. Güneş panelleri, rüzgâr türbinleri, hidroelektrik sistemler, biyokütle uygulamaları ve

hidrojen teknolojileri öğrenciler için yalnızca teknik konular değildir; aynı zamanda çevre, ekonomi, mühendislik, toplum ve gelecek üzerine düşünmeyi teşvik eden öğrenme fırsatlarıdır (Hiğde, 2022; Mylonas et al., 2021; Vasconcelos et al., 2023).

Türkiye, Yunanistan, Portekiz ve Kuzey Makedonya örnekleri, enerji dönüşümünün yenilenebilir enerji potansiyeli, politika öncelikleri, altyapı kapasitesi ve toplumsal farkındalık düzeyi gibi yerel koşullara göre değiştiğini göstermektedir (IEA, 2024; IRENA, 2024). Bu nedenle bu kitap, enerji kaynaklarını yalnızca genel teknik özellikleri açısından değil, farklı bağlamlarda ortaya çıkan eğitsel ve toplumsal boyutlarıyla da değerlendirmektedir.

Giriş bölümünden sonra birinci bölüm enerji, çevre ve enerji okuryazarlığına ilişkin temel kavramları açıklamaktadır. İkinci bölüm enerji kaynaklarını değerlendirmede kullanılabilecek karar verme ölçütlerini ele almaktadır. Üçüncü bölüm yenilenemeyen enerji kaynaklarını ve çevresel etkilerini incelerken, dördüncü bölüm yenilenebilir enerji dönüşümünün çevresel, toplumsal ve sistemsel boyutlarını analiz etmektedir. Beşinci bölüm güneş, rüzgâr ve hidroelektrik enerjiyi; altıncı bölüm ise jeotermal, deniz ve okyanus enerjisi ile biyoenerji kaynaklarını ayrıntılı biçimde değerlendirmektedir. Yedinci bölümde yenilenebilir enerji türleri karşılaştırılmakta, yeşil hidrojen entegre enerji sistemleri içinde tamamlayıcı bir enerji taşıyıcısı olarak incelenmekte ve seçilmiş ülke örnekleri üzerinden genel bir değerlendirme sunulmaktadır. Sonuç bölümü, kitabın temel bulgularını ve enerji okuryazarlığı açısından çıkarımlarını bütünleşik biçimde ortaya koymaktadır.

Bu kitap, okuyuculara enerji ve çevre konusunda dengeli, erişilebilir ve bilimsel temelli bir kaynak sunmayı amaçlamaktadır. Teknik doğruluk korunurken metin boyunca kullanılan dilin açık olmasına dikkat edilmiştir. Tablolar, karşılaştırmalar, öğrenme hedefleri, bölüm özetleri ve tartışma soruları kitabın eğitim materyali olarak kullanılabilirliğini güçlendirmek amacıyla hazırlanmıştır. Kitap okul öğrencileri, öğretmenler, üniversite öğrencileri, akademisyenler, yerel karar vericiler, enerji ve çevre alanlarında çalışan profesyoneller ve bu konulara ilgi duyan genel okuyucular için hazırlanmıştır.

Enerji dönüşümü yalnızca yeni teknolojilerin geliştirilmesiyle değil; bilinçli toplumlar, sağlıklı politikalar, çevresel duyarlılık, bilimsel düşünme ve sorumlu karar verme kültürüyle mümkündür (IEA, 2024; UNESCO, 2020). Bu kitap, enerji ve çevre konularına ilişkin tartışmalar için bilgiye dayalı, eleştirel ve sorumlu bir temel oluşturmayı amaçlamaktadır.

BÖLÜM 1: ENERJİ VE ÇEVRE

Enerji; günlük yaşamdan ekonomik üretime ve teknolojik gelişmeye kadar pek çok alanı mümkün kılan temel bir girdidir. Aydınlatma, ulaşım, ısınma, sanayi, tarım ve iletişim teknolojilerinin tümü enerji kullanımına bağlıdır. Bu nedenle enerji yalnızca teknik özellikleriyle değil, çevresel ve toplumsal sonuçlarıyla da ele alınması gereken çok boyutlu bir konudur. Enerji üretimi ve tüketimi doğal çevre üzerinde doğrudan ve dolaylı etkiler yaratır. Özellikle fosil yakıtların yoğun kullanımı sera gazı emisyonları, hava kirliliği, su ve toprak kirliliği, ekosistem bozulması ve iklim değişikliği gibi büyük sorunlara yol açmaktadır (IPCC, 2023). Buna karşılık yenilenebilir enerji kaynakları, yaşam döngüsü boyunca genellikle daha düşük sera gazı emisyonları sağlayabildikleri için sürdürülebilir enerji sistemleri açısından önemli seçenekler sunmaktadır (IRENA, 2024; NREL, 2021). Enerji ve çevre ilişkisi yalnızca kullanılan kaynak türüyle açıklanamaz. Üretim teknolojisi, dönüşüm verimliliği, tüketim düzeyi, erişim koşulları ve çevresel maliyetlerin toplum içindeki dağılımı da belirleyicidir. Bu nedenle enerji kararları iklim değişikliği, sürdürülebilirlik, enerji güvenliği ve toplumsal adaletle birlikte değerlendirilmelidir (Schobert, 2002; Zecca and Chiari, 2010).

Bu bölüm, enerji kavramını türleri, dönüşümleri, verimlilik, iklim değişikliği, karbon ayak izi ve enerji eğitimiyle ilişkisi içinde incelemektedir. Amaç, okuyucuların enerjiyi yalnızca fiziksel bir büyüklük olarak değil, günlük yaşam, çevre ve karar verme süreçleriyle bağlantılı bir sistem konusu olarak değerlendirmelerine yardımcı olmaktır (Kutu 1.1).

Kutu 1.1. Bu bölümde neler öğrenilecek?

Öğrenme Hedefi
Enerjiyi iş yapabilme kapasitesi olarak tanımlamak ve günlük yaşamdan örneklerle ilişkilendirmek.
Kimyasal, elektrik, ısı, mekanik, ışık ve nükleer enerjiyi örneklerle karşılaştırmak.
Enerjinin korunumu yasasını ve enerji dönüşümlerindeki verimlilik kayıplarını açıklamak.
Enerjiyle ilgili bilgi, tutum, davranış ve karar verme boyutlarını birlikte değerlendirmek.
Enerji üretimi ve tüketiminin iklim, hava kalitesi, ekosistemler ve toplum üzerindeki etkilerini tartışmak.
Enerji verimliliği, karbon ayak izi, sera gazı emisyonları ve sorumlu tüketim arasında bağlantılar kurmak.

1.1. Enerjinin Tanımı ve Türleri

Enerji, en genel anlamıyla iş yapabilme kapasitesi olarak tanımlanır. Fiziksel sistemlerde enerji farklı biçimlerde bulunabilir ve bir biçimden başka bir biçime dönüştürülebilir. Isıl enerji, ışık enerjisi, kimyasal enerji, mekanik enerji, elektrik enerjisi ve nükleer enerji bu enerji türleri arasındadır (U.S.

Department of Energy and American Association for the Advancement of Science [DOE and AAAS], 2017).

Enerji günlük yaşamda doğrudan görünür değildir; daha çok etkileri aracılığıyla fark edilir. Bir ampulün ışık üretmesi, bir telefonun şarj edilmesi, bir aracın hareket etmesi, bitkilerin fotosentez yapması veya bir rüzgâr türbininin dönmesi farklı enerji türleri ve enerji dönüşümleriyle ilişkilidir. Bu örnekler, enerji kavramının hem doğa hem de teknoloji ile ilişkili olarak anlaşılması gerektiğini göstermektedir (Tsegaw, 2018).

Enerjinin farklı biçimleri vardır. Kimyasal enerji maddelerin bağlarında depolanır; besinler, piller ve yakıtlar bu türe örnektir. Elektrik enerjisi elektrik yüklerinin hareketiyle ilişkilidir ve aydınlatma, iletişim teknolojileri ve ev aletlerinde kullanılır. Isıl enerji sıcaklık ve moleküllerin hareketiyle ilgilidir. Mekanik enerji hareket ve konumla ilişkilidir; bisikletler, akan su ve rüzgâr türbinleri örnek olarak verilebilir. Işık enerjisi elektromanyetik dalgalarla taşınır. Nükleer enerji ise atom çekirdeğinde depolanan enerjidir (DOE and AAAS, 2017).

Tablo 1.1, enerjinin farklı biçimlerde bulunabildiğini ve bu biçimlerin günlük yaşamda çoğu zaman iç içe geçtiğini göstermektedir. Bu ayrım, sonraki bölümlerde enerji kaynaklarının karşılaştırılması için temel oluşturmaktadır.

Tablo 1.1. Enerji türleri ve günlük yaşamdan örnekler

Enerji Türü	Kısa Açıklama	Günlük Yaşamdan Örnek
Kimyasal enerji	Maddelerin bağlarında depolanan enerjidir.	Pil, yakıt, besin
Elektrik enerjisi	Elektrik yüklerinin hareketiyle ilişkili enerjidir.	Aydınlatma, telefon şarjı, ev aletleri
Isı enerjisi	Sıcaklık ve moleküllerin hareketiyle ilişkili enerjidir.	Isıtıcı, soba, güneş ışığı
Mekanik enerji	Hareket ve konumla ilişkili enerjidir.	Bisiklet, rüzgâr türbini, akan su
Işık enerjisi	Elektromanyetik dalgalarla taşınan enerjidir.	Güneş ışığı, lamba
Nükleer enerji	Atom çekirdeğinde depolanan enerjidir.	Nükleer santral, Güneş'teki füzyon tepkimeleri

1.2. Enerji Okuryazarlığı ve Enerjiye İlişkin Kavram Yanılgıları

Enerji günlük dilde sıkça kullanılsa da soyut bir kavramdır ve bu nedenle çeşitli kavram yanılgılarına yol açabilir. Enerjiyi elle tutulur bir madde, tamamen yok olan bir şey ya da yalnızca elektrik ve yakıt olarak görmek; enerji kaynaklarını, verimliliği ve çevresel etkileri doğru değerlendirmeyi zorlaştırır (Wahlund and Palm, 2022). Bu bağlamda enerji okuryazarlığı, enerji kavramlarını ve kaynaklarını anlama ve bu bilgiyi günlük

yaşamda ve toplumsal düzeyde sorumlu kararlar vermek için kullanma yeterliliğini ifade eder. Literatürde bu kavram yalnızca bilgiyi değil; tutum, davranış, eleştirel düşünme ve karar verme boyutlarını da içermektedir (DeWaters and Powers, 2011; DeWaters et al., 2013; DOE and AAAS, 2017).

Enerji eğitimi bu kavram yanılgılarını azaltmalı ve enerjinin farklı sistemlerde dönüşen, aktarılan, depolanan ve çevresel sonuçlar doğuran bir büyüklük olduğunu göstermelidir. En yaygın kavram yanılgıları arasında enerjinin yok olabileceği, elektrik ile enerjinin aynı şey olduğu, yenilenebilir kaynakların hiçbir etkisinin bulunmadığı veya enerji verimliliğinin yalnızca enerji tasarrufu anlamına geldiği düşünceleri yer almaktadır (Lee, 2016; Tatar and Oktay, 2007).

Kutu 1.2, enerji kavramının günlük kullanımı ile bilimsel anlamı arasındaki farkı görünür kılmaktadır. Bu ayrım, sonraki konularda enerji kaynaklarının ve çevresel etkilerin daha doğru değerlendirilmesini kolaylaştırır.

Kutu 1.2. Enerji hakkında yaygın kavram yanılgıları

Yaygın Kavram Yanılgısı	Doğru Açıklama	Eğitsel Vurgu
Enerji yok olur veya kaybolur.	Enerji yok olmaz; bir biçimden başka bir biçime dönüşür. Ancak kullanılabilir enerji azalabilir ve enerji çoğu zaman ısı olarak çevreye dağılır.	Enerjinin korunumu ve enerji dönüşümü birlikte öğretilmelidir.
Enerji elle tutulur bir madde gibidir.	Enerji somut bir madde değil, sistemlerin durumunu ve iş yapabilme kapasitesini tanımlayan fiziksel bir büyüklüktür.	Enerji, yakıt veya elektrikle eş anlamlı olarak ele alınmamalıdır.
Enerji tüketildiğinde tamamen biter.	Günlük dilde "enerji tüketimi" ifadesi kullanılsa da enerji fiziksel olarak yok edilmez; daha az kullanılabilir biçimlere dönüşür.	"Enerji tüketimi" ifadesi, kullanılabilir enerjinin azalması olarak açıklanmalıdır.
Elektrik her zaman temiz enerjidir.	Elektriğin çevresel etkisi nasıl üretildiğine bağlıdır. Kömürden üretilen elektrik ile güneş veya rüzgârdan üretilen elektrik aynı çevresel etkiye sahip değildir.	Enerji taşıyıcısı ile enerji kaynağı ayrımı açıkça yapılmalıdır.
Yenilenebilir enerji kaynakları çevreye hiç zarar vermez.	Yenilenebilir enerji kaynakları genellikle fosil yakıtlardan daha düşük çevresel etkilere sahiptir; ancak arazi kullanımı, malzeme gereksinimleri, ekosistem etkileri ve geri dönüşüm de dikkate alınmalıdır.	"Düşük etkili" ve "etkisiz" kavramları ayırt edilmelidir.
Enerji verimliliği yalnızca daha az enerji kullanmak demektir.	Enerji verimliliği aynı işi yapmak ya da aynı hizmeti sağlamak için daha az enerji kullanılmasıdır. Yaşam kalitesini mutlaka düşürmez.	Verimlilik, tasarruf ve davranış değişikliği birlikte ele alınmalıdır.

Yaygın Kavram Yanılgısı	Doğru Açıklama	Eğitsel Vurgu
Hidrojen doğrudan temiz bir enerji kaynağıdır.	Hidrojen çoğunlukla bir enerji taşıyıcısıdır. Temiz olup olmaması nasıl üretildiğine bağlıdır. Yenilenebilir elektrikle üretilen yeşil hidrojen düşük emisyonlu olabilir.	Birincil enerji kaynakları ile enerji taşıyıcıları arasındaki ayrım vurgulanmalıdır.
Biyokütle ve biyoyakıtlar her zaman karbon nötrdür.	Biyokütle ve biyoyakıtların çevresel etkisi hammaddeye, arazi kullanımına, taşıma mesafesine ve üretim yöntemine bağlıdır.	Yaşam döngüsü yaklaşımı kullanılmalıdır.
Güneş ve rüzgâr değişken oldukları için güvenilir değildir.	Güneş ve rüzgâr değişken kaynaklardır; ancak depolama, şebeke esnekliği, kaynak çeşitliliği ve talep yönetimiyle enerji sistemine güvenilir biçimde entegre edilebilirler.	Enerji sistemleri tek bir kaynak üzerinden değil, enerji karması üzerinden değerlendirilmelidir.
Enerji sorunları yalnızca yeni üretim teknolojileriyle çözülebilir.	Enerji dönüşümü yalnızca üretimle ilgili değildir; enerji verimliliği, tasarruf, depolama, şebeke yönetimi, toplumsal kabul ve bilinçli tüketim de gerektirir.	Enerji okuryazarlığı teknik, çevresel ve toplumsal boyutları birlikte içermelidir.

1.3. Enerji Dönüşümleri: Korunum, Verimlilik ve Çevresel Sonuçlar

Enerjinin en temel özelliklerinden biri, yoktan var edilememesi ve tamamen yok edilememesidir. Enerjinin korunumu yasasına göre enerji yalnızca bir biçimden başka bir biçime dönüşür. Bir ampulde elektrik enerjisi ışık ve ısı enerjisine; bir otomobilde yakıtın kimyasal enerjisi hareket ve ısıya; bir güneş panelinde ise güneş ışığı elektrik enerjisine dönüşür. Günlük yaşam ve enerji teknolojileri bu dönüşümlere dayanır. Rüzgâr türbinlerinde havanın kinetik enerjisi önce mekanik enerjiye, ardından elektrik enerjisine dönüşür. Hidroelektrik santrallerde suyun potansiyel ve kinetik enerjisi türbinler aracılığıyla elektrik enerjisine çevrilir. Jeotermal sistemlerde yer kabuğundan gelen ısı doğrudan ısıtma veya elektrik üretimi için kullanılabilir. Dönüşüm sırasında enerjinin bir bölümü çoğu zaman ısı olarak çevreye dağılır ve daha az kullanılabilir hâle gelir. Bu durum, verimlilik, depolama, şebeke yönetimi ve teknoloji seçiminin çevresel sonuçlarla doğrudan bağlantılı olduğunu göstermektedir (Maka and Alabid, 2022).

1.4. Enerji Kullanımı ve Çevresel Etkiler

Sanayileşme büyük ölçüde fosil yakıtlar sayesinde mümkün olmuş; bu kaynaklar üretim, ulaşım ve kentleşme için önemli avantajlar sağlamıştır. Ancak aynı sistemler sera gazı emisyonları, hava kirliliği ve ekosistemler üzerindeki baskı gibi sorunları da artırmıştır. Kömür, petrol ve doğal gazın çıkarılması, taşınması, işlenmesi ve yakılması; karbondioksit, metan, azot oksitler ve çeşitli kirleticiler yoluyla hem iklimi hem de yerel çevreyi etkiler. Bu nedenle fosil yakıtların etkisi yalnızca kullanım aşamasında değil, tüm

üretim zinciri boyunca değerlendirilmelidir. Bu yaklaşım yenilenebilir teknolojiler için de geçerlidir. Hammadde çıkarımı, santral inşası, iletim hatları, bakım, atık yönetimi ve geri dönüşüm süreçleri enerji sistemlerinin yaşam döngüsü içinde çevresel sonuçlar doğurabilir (IEA, 2024; NREL, 2021).

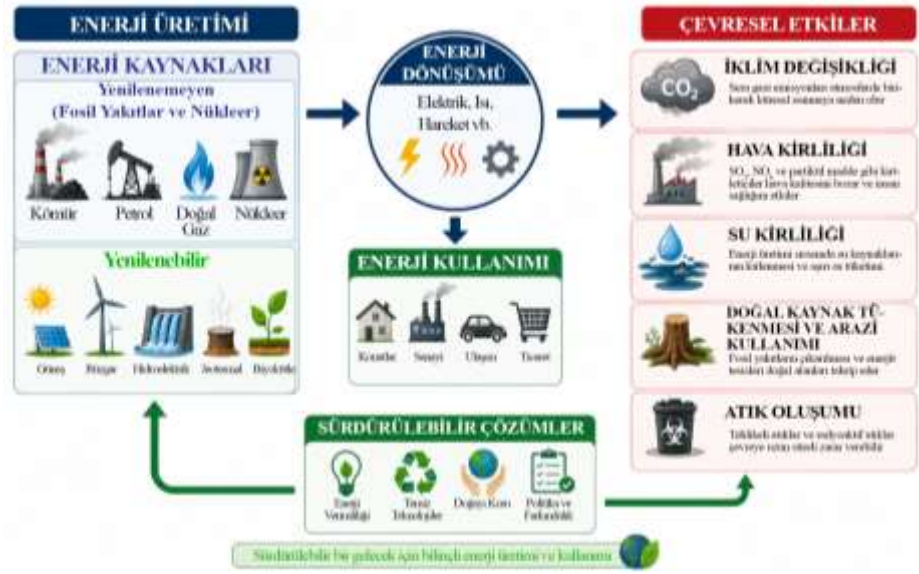
Yenilenebilir enerji kaynakları genellikle fosil yakıtlara göre daha düşük sera gazı emisyonlarına sahiptir ve iklim değişikliğiyle mücadelede önemli bir rol oynar. Bununla birlikte panel üretimi, rüzgâr türbinlerinde kullanılan malzemeler, hidroelektrik projelerde sucul ekosistemler ve biyokütlede arazi kullanımı gibi konular planlama sürecine dahil edilmelidir (Abbasi et al., 2011). Nüfus artışı, kentleşme, sanayileşme, teknolojik gelişme ve yaşam standartlarının yükselmesi enerji talebini artırmaktadır. Bu nedenle enerji politikaları arz güvenliğini sağlarken talep yönetimini ve çevresel etkileri de dikkate almalıdır.

Sürdürülebilirlik açısından temel amaç, bugünün enerji ihtiyaçlarını karşılarken gelecek kuşakların yaşam koşullarını tehlikeye atmayan bir enerji sistemi kurmaktır (World Commission on Environment and Development [WCED], 1987). Bu amaç doğrultusunda üç temel yaklaşım öne çıkmaktadır:

- Enerji tüketimini azaltmak,
- Enerjiyi daha verimli kullanmak,
- Fosil yakıtlar yerine düşük karbonlu ve yenilenebilir enerji kaynaklarını yaygınlaştırmak.

Bu üç yaklaşım birlikte uygulandığında çevresel zarar azaltılabilir ve daha güvenli bir enerji sistemi kurulabilir (IRENA, 2024).

Şekil 1.1, enerji talebi ile üretim yöntemleri arasındaki ilişkinin çevresel sonuçları nasıl şekillendirdiğini özetlemektedir. Bu nedenle sürdürülebilir enerji politikaları yalnızca yeni kaynak seçimine değil, talebin azaltılmasına ve enerjinin verimli kullanılmasına da odaklanmalıdır.



Şekil 1.1. Enerji üretimi ve çevresel etkiler arasındaki temel ilişki

1.5. İklim Değişikliği ve Karbon Ayak İzi

İklim değişikliği, Dünya'nın iklim sistemindeki uzun dönemli değişimleri ifade eder. Bu değişimler sıcaklıkların yükselmesi, yağış düzenlerinin değişmesi, kuraklıklar, seller, deniz seviyesinin yükselmesi, buzulların erimesi, orman yangınları ve aşırı hava olaylarının artması gibi sonuçlara yol açabilir. İklim değişikliği doğal süreçlerden etkilenebilse de günümüzde gözlenen hızlı değişimin temel nedeni insan faaliyetlerinden kaynaklanan sera gazı emisyonlarıdır (IPCC, 2023). İnsan kaynaklı sera gazı emisyonlarının önemli bir bölümü enerji üretimi ve tüketimiyle ilişkilidir. Fosil yakıtların yakılması karbondioksit emisyonlarını artırırken, metan kaçakları, sanayi, ulaşım, tarım ve atık yönetimi de toplam emisyonlara katkıda bulunmaktadır.

İklim değişikliği ile enerji sistemleri arasında iki yönlü bir ilişki vardır. Bir yandan fosil yakıta dayalı enerji üretimi iklim değişikliğini hızlandırır. Diğer yandan iklim değişikliği de enerji sistemlerini etkileyebilir. Kuraklıklar hidroelektrik üretimini azaltabilir; sıcak hava dalgaları soğutma talebini artırabilir; aşırı hava olayları ise elektrik iletim hatlarına, enerji altyapısına ve yakıt tedarik zincirlerine zarar verebilir. Bu nedenle enerji sistemleri hem düşük karbonlu hem de iklim risklerine dayanıklı olacak şekilde planlanmalıdır.

Karbon ayak izi, bir bireyin, kurumun, ürünün, hizmetin veya toplumun faaliyetleri sonucunda atmosfere salınan toplam sera gazı miktarını ifade eder (Allegretti et al., 2022; Uydur, 2024). Bu kavram yalnızca doğrudan enerji tüketimini değil; ulaşımı, beslenmeyi, tüketim alışkanlıklarını,

kullanılan ürünlerin üretim süreçlerini, atık oluşumunu ve tedarik zincirlerini de kapsar. Örneğin bir ürünün karbon ayak izi yalnızca kullanım aşamasında değil; hammadde çıkarımı, üretim, taşıma, ambalajlama, kullanım ve bertaraf aşamalarında ortaya çıkan emisyonlarla birlikte değerlendirilir. Karbon ayak izinin azaltılmasında bireysel davranışlar önemlidir; ancak kalıcı sonuçlar enerji altyapısı, kent planlaması, üretim teknolojileri, kamu politikaları ve kurumsal uygulamalardaki değişimlerle birlikte mümkündür (Adewuyi and Awodumi, 2017).

Tablo 1.2'deki uygulamalar günlük yaşamda çevresel etkilerin azaltılmasına yardımcı olabilir. Ancak karbon ayak izi yalnızca bireysel tercihlerle değil, yapısal koşullarla da ilişkilidir.

Tablo 1.2. Karbon ayak izini azaltmaya yönelik örnek uygulamalar

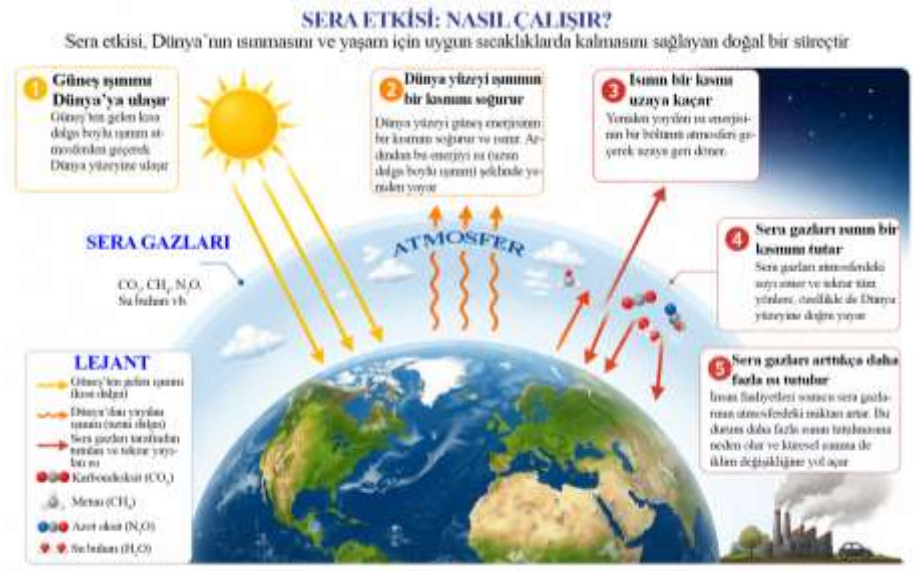
Alan	Ne Yapılabilir?	Olası Etki
Ulaşım	Toplu taşıma, bisiklet, yürüme veya araç paylaşımı tercih edilebilir.	Yakıt tüketimi ve ulaşımla ilişkili emisyonlar azalır.
Evsel enerji kullanımı	LED ampuller, verimli cihazlar ve iyi yalıtım kullanılabilir.	Elektrik ve ısınma talebi azalır.
Tüketim alışkanlıkları	Uzun ömürlü, onarılabilir ve gereksiz ambalajı daha az olan ürünler tercih edilebilir.	Üretim ve atıkla ilişkili emisyonlar azalır.
Beslenme	Yerel, mevsimlik ve daha düşük etkili ürünler tercih edilebilir.	Taşıma ve üretimden kaynaklanan çevresel etkiler azalabilir.
Atık yönetimi	Geri dönüşüm, yeniden kullanım ve atık azaltımı uygulanabilir.	Kaynak tüketimi ve atıkla ilişkili emisyonlar azalır.
Enerji tercihi	Mümkün olduğunda yenilenebilir enerji kaynakları tercih edilebilir.	Fosil yakıtlara bağımlılık ve sera gazı emisyonları azalır.

1.6. Sera Etkisi ve İnsan Kaynaklı Sera Gazları

Sera etkisi, Dünya'nın yaşam için uygun sıcaklık koşullarını korumasını sağlayan doğal bir süreçtir (Al-Ghussain, 2019). Güneş'ten gelen ışınımın bir bölümü atmosferden geçerek Dünya yüzeyine ulaşır. Dünya yüzeyi bu enerjinin bir kısmını soğurur ve daha sonra ısı olarak atmosfere geri yayar. Atmosferdeki sera gazları bu ısının bir bölümünü tutarak Dünya yüzey sıcaklığının korunmasına yardımcı olur (IPCC, 2023; United States Environmental Protection Agency [EPA], 2025). Doğal sera etkisi olmasaydı Dünya çok daha soğuk bir gezegen olurdu. Bu nedenle sera etkisi kendi başına olumsuz bir süreç değildir. Sorun, insan faaliyetlerinin atmosferdeki sera gazı miktarını artırarak sera etkisini güçlendirmesi ve doğal dengeyi bozmasıdır. Fosil yakıt kullanımı, endüstriyel süreçler, ormansızlaşma, tarım, hayvancılık ve atık yönetimi gibi faaliyetler sera gazı yoğunluklarını artırır. Bu artış

atmosferde daha fazla ısının tutulmasına ve küresel sıcaklıkların yükselmesine neden olur.

Şekil 1.2, sera etkisinin temel mekanizmasını göstermekte ve sera gazlarının Dünya yüzeyinden yayılan ısının bir bölümünü nasıl tuttuğunu ortaya koymaktadır.



Şekil 1.2. Sera etkisinin temel işleyişi

Özetle sorun doğal sera etkisinin varlığı değil, insan faaliyetleriyle güçlenmesidir. Sera gazı yoğunlukları arttıkça sıcaklık artışı, kuraklık, aşırı yağış, orman yangınları ve deniz seviyesinin yükselmesi gibi riskler büyür. Enerji sistemleri bu süreçte merkezi bir role sahiptir. Elektrik üretiminde, ulaşımda, sanayide ve binalarda kullanılan fosil yakıtlar emisyonları artırdığı için enerji dönüşümü iklim politikasının temel alanlarından biridir.

Başlıca sera gazları arasında karbondioksit, metan, diazot monoksit ve florlu gazlar yer alır (Tablo 1.3). Bu gazlar kaynakları, atmosferde kalma süreleri ve iklim üzerindeki etkileri bakımından farklılık gösterir. Karbondioksit fosil yakıt kullanımının en yaygın sonucudur. Metan atmosferde daha kısa süre kalır; ancak kısa vadede güçlü bir ısı tutma etkisine sahiptir. Diazot monoksit özellikle tarım ve bazı endüstriyel süreçlerle ilişkilidir. Florlu gazlar ise çoğunlukla soğutma sistemleri, iklimlendirme teknolojileri ve belirli endüstriyel uygulamalardan kaynaklanır (EPA, 2025).

Enerji talebi fosil yakıtlarla karşılandığında emisyonlar artar. Bu nedenle iklim değişikliğiyle mücadelede talep yönetimi, verimlilik ve düşük karbonlu kaynaklara geçiş birlikte ele alınmalıdır (IPCC, 2023). Emisyon azaltımı yalnızca elektrik üretiminde değil; ulaşım, sanayi, tarım, binalar ve

tüketim alışkanlıklarında da dönüşüm gerektirir. Bu dönüşüm hava kalitesi ve enerji güvenliği açısından ek faydalar da sağlayabilir (EPA, 2025; IEA, 2024).

Tablo 1.3. Başlıca sera gazları ve kaynakları

Sera Gazı	Başlıca Kaynaklar	İklim Açısından Önemi
Karbondioksit, CO_2	Fosil yakıt kullanımı, sanayi, ulaşım, ormansızlaşma	İnsan kaynaklı sera gazı emisyonlarının en önemli bileşenlerinden biridir.
Metan, CH_4	Tarım, hayvancılık, atıklar, doğal gaz ve petrol sistemlerinden sızıntılar	Kısa vadede güçlü bir ısı tutma etkisine sahiptir.
Diazot monoksit, N_2O	Gübre kullanımı, tarımsal faaliyetler, bazı endüstriyel süreçler	Atmosferde uzun süre kalabilir ve iklim değişikliğine katkıda bulunur.
Florlu gazlar	Soğutma sistemleri, iklimlendirme teknolojileri, bazı endüstriyel uygulamalar	Daha düşük miktarlarda salınsalar da güçlü sera etkileri oluşturabilirler.

1.7. Enerji Verimliliği ve Sürdürülebilir Tüketim

Enerji verimliliği, aynı işi yapmak veya aynı hizmeti sunmak için daha az enerji kullanma kapasitesidir. Başka bir deyişle enerji verimliliği, yaşam kalitesini, üretim düzeyini veya hizmet kalitesini korurken enerji tüketimini azaltmayı amaçlar. Daha verimli aydınlatma sistemleri, iyi yalıtılmış binalar, yüksek verimli elektrikli cihazlar, verimli motorlar, toplu taşıma sistemleri ve akıllı enerji yönetimi uygulamaları enerji verimliliğine örnek olarak verilebilir.

Enerji verimliliği sürdürülebilir enerji politikasının en etkili araçlarından biridir. Aynı hizmetin daha az enerjiyle sağlanması fosil yakıt kullanımını, sera gazı emisyonlarını ve enerji maliyetlerini azaltabilir.

Enerji verimliliği ve enerji tasarrufu ilişkili kavramlardır; ancak aynı anlama gelmezler. Enerji tasarrufu, enerji tüketimini azaltmaya yönelik davranışları ifade eder. Örneğin gereksiz ışıkları kapatmak, kullanılmayan cihazların fişini çekmek veya kısa mesafelerde yürümeyi tercih etmek enerji tasarrufu biçimleridir. Buna karşılık enerji verimliliği, aynı hizmeti daha az enerjiyle sağlayan teknolojik veya yapısal iyileştirmeleri içerir (Abas et al., 2015). Örneğin akkor ampul yerine LED ampul kullanmak, eski bir buzdolabı yerine yüksek enerji sınıfına sahip bir cihaz seçmek veya iyi yalıtılmış bir binayı ısıtmak enerji verimliliği örnekleridir (Tablo 1.4).

Tablo 1.4. Enerji tasarrufu ile enerji verimliliği arasındaki fark

Kavram	Açıklama	Örnek
Enerji tasarrufu	Davranış yoluyla enerji tüketimini azaltmaktır.	Kullanılmayan ışıkları kapatmak
Enerji verimliliği	Aynı işin daha az enerjiyle yapılmasını sağlayan teknolojik veya sistemsel iyileştirmedir.	LED ampul kullanmak
Sürdürülebilir tüketim	Gelecek nesilleri dikkate alarak kaynakları bilinçli kullanmaktır.	Gereksiz tüketimi azaltmak ve dayanıklı ürünleri tercih etmek

Enerji verimliliği özellikle binalar, ulaşım, sanayi, tarım ve evsel tüketim alanlarında önemlidir. Binalarda ısı yalıtımı, verimli ısıtma-soğutma sistemleri, doğal aydınlatma ve yüksek enerji performanslı bina tasarımları enerji talebini azaltabilir. Ulaşımda toplu taşıma, elektrikli araçlar, yakıt verimli motorlar, bisiklet yolları ve şehir planlaması önemlidir. Sanayide verimli motor sistemleri, atık ısı geri kazanımı, süreç iyileştirmeleri ve enerji yönetim sistemleri önemli enerji tasarrufu sağlayabilir.

Sürdürülebilir tüketim, enerji kullanımının çevresel ve toplumsal sonuçlarını dikkate alarak karar vermek anlamına gelir. Bir ürünün yalnızca fiyatı değil; üretiminde kullanılan enerji, hammaddeleri, taşıma mesafesi, kullanım ömrü, tamir edilebilirliği ve geri dönüşüm olanakları da önemlidir.

Bu dönüşüm bireysel tercihlerle başlayabilir; ancak kurumların ve politikaların desteğini de gerektirir. Okullar, belediyeler, kamu kurumları ve işletmeler verimli binalar, toplu taşıma yatırımları, enerji etiketleri, standartlar, yenilenebilir enerji uygulamaları ve eğitim programları yoluyla sürece katkı sağlayabilir (Tablo 1.5).

Tablo 1.5. Enerji verimliliğini artırmaya yönelik örnek uygulamalar

Alan	Uygulama	Beklenen Katkı
Aydınlatma	LED aydınlatma ve hareket sensörlerinin kullanımı	Elektrik tüketimini azaltır.
Binalar	Isı yalıtımı, çift cam ve verimli ısıtma-soğutma sistemleri	Isıtma ve soğutma talebini azaltır.
Ev aletleri	Yüksek enerji verimliliğine sahip cihazların tercih edilmesi	Uzun vadede enerji maliyetlerini azaltır.
Ulaşım	Toplu taşıma, bisiklet, yürüme ve araç paylaşımı	Yakıt tüketimini ve emisyonları azaltır.
Sanayi	Verimli motorlar, atık ısı geri kazanımı ve enerji yönetimi	Üretimde enerji yoğunluğunu azaltır.
Okullar	Enerji izleme, öğrenci projeleri ve farkındalık etkinlikleri	Enerji okuryazarlığını güçlendirir.

Özetle, sürdürülebilir enerji dönüşümü üretim kaynaklarının değiştirilmesiyle sınırlı değildir. Enerji talebinin azaltılması, mevcut enerjinin verimli kullanılması ve kalan talebin düşük karbonlu kaynaklarla karşılanması birlikte düşünülmelidir.

1.8. Sürdürülebilir Bir Gelecek İçin Enerji Eğitimi

Enerji eğitimi, öğrencilerin ve toplumun bu bölümde tartışılan kavramları anlamlandırmasını sağlar. Günümüzde bu eğitim yalnızca fiziksel kavramları değil; iklim değişikliği, yenilenebilir enerji, verimlilik, sürdürülebilir tüketim ve enerjiye adil erişim gibi konuları da içermelidir.

Bu bağlamda enerji okuryazarlığı, bilgiyi karar verme becerileriyle birleştiren temel hedeftir. Enerji okuryazarı bireyler farklı kaynakları karşılaştırabilir, çevresel etkileri tartışabilir ve günlük yaşamda daha bilinçli tercihler yapabilir (Ayata et al., 2024; DeWaters et al., 2013; Leite et al., 2026; Ramachandran et al., 2024; Santillán and Cedano, 2023).

Enerji konuları fen eğitimi, çevre eğitimi, STEM ve sürdürülebilirlik eğitimi için güçlü öğrenme fırsatları sunar. Elektrik üretimi, yakıt kullanımı, ısıtma ve soğutma, ulaşım ve okul binalarındaki enerji tüketimi gibi örnekler soyut kavramların günlük yaşamla ilişkilendirilmesini kolaylaştırır (Hiğde, 2022; Mylonas et al., 2021; Vasconcelos et al., 2023).

Enerji eğitimi sosyobilimsel tartışmalar için de uygun bir alandır. Bir bölgede rüzgâr türbini kurulması, hidroelektrik santral inşa edilmesi, nükleer enerji kullanılması veya biyoyakıt üretilmesi gibi kararlar yalnızca teknik bilgi değil; çevresel etkiler, ekonomik maliyetler, toplumsal kabul ve etik soruları da içerir. Bu tür tartışmalar öğrencilerin kanıta dayalı düşünme ve farklı görüşleri değerlendirme becerilerini geliştirebilir (Sadler, 2004; Zeidler, 2014).

STEM yaklaşımı enerji okuryazarlığını deney, tasarım ve veri analizi yoluyla destekler. Bir güneş paneli modeli yapmak, rüzgâr türbini tasarlamak, basit bir hidroelektrik düzenek kurmak veya bir okulun enerji tüketimini ölçmek öğrencilerin hem bilimsel kavramları hem de sürdürülebilir çözümler geliştirme süreçlerini anlamalarına yardımcı olabilir. Bu nedenle etkili enerji eğitimi, öğrencileri pasif bilgi alıcıları olarak değil; gözlem yapan, veri toplayan, çözüm öneren ve enerji kararlarının sonuçlarını tartışan aktif katılımcılar olarak konumlandırmalıdır.

Enerji eğitimi okul ortamıyla sınırlı değildir. Aileler, belediyeler, medya, müzeler, bilim merkezleri, çevre örgütleri ve yerel yönetimler güvenilir bilgiye erişimi destekleyerek enerji tartışmalarına daha bilinçli kamusal katılıma katkı sağlayabilir (DOE and AAAS, 2017; Ramachandran et al., 2024).

Sürdürülebilir bir gelecek için enerji eğitiminin temel amacı yalnızca bireyleri enerji tasarrufuna teşvik etmek değil, aynı zamanda enerji sistemlerini bilimsel bilgi, çevresel duyarlılık, teknolojik yenilik ve toplumsal sorumluluk çerçevesinde değerlendirebilmelerini sağlamaktır (Tablo 1.6).

Tablo 1.6. Enerji eğitiminde kullanılabilecek örnek etkinlikler

Etkinlik	Amaç	Geliştirilen Beceriler
Evde veya okulda enerji tüketimini ölçme	Enerji kullanımını görünür kılmak	Veri toplama, analiz, farkındalık
Güneş paneli modeli tasarlama	Güneş enerjisinin çalışma ilkesini anlamak	Tasarım, problem çözme, STEM becerileri
Rüzgâr türbini modeli yapma	Rüzgâr enerjisindeki mekanik-elektrik dönüşümünü anlamak	Deney yapma, mühendislik düşüncesi
Karbon ayak izi hesaplama	Günlük yaşamın çevresel etkilerini değerlendirmek	Sorumlu karar verme
Enerji kaynaklarını karşılaştırma tartışması	Farklı kaynakların avantaj ve sınırlılıklarını belirlemek	Eleştirel düşünme, kanıt kullanımı
Yerel bir enerji sorunu üzerine proje	Enerji konularını toplumla ilişkilendirmek	Katılım, araştırma, çözüm geliştirme

1.9. Bölüm Özeti ve Tartışma Soruları

Bu bölüm enerji ve çevre arasındaki ilişkiyi temel kavramlar üzerinden incelemiştir. Enerji türleri ve günlük yaşamdan örnekler, sonraki bölümlerde kaynakların karşılaştırılması için kavramsal bir temel sağlamıştır. Enerji dönüşümleri, yenilenebilir enerji teknolojileri dahil olmak üzere pek çok sistemin temelini oluşturur. Dönüşümler sırasında verimlilik kayıpları ortaya çıkabildiği için enerji verimliliği sürdürülebilirlik açısından merkezi öneme sahiptir.

Enerji okuryazarlığı yalnızca enerji kavramlarını bilmek olarak değil; çevresel, ekonomik ve toplumsal sonuçları değerlendirme, kanıta dayalı karar verme ve sorumlu davranış geliştirme becerisi olarak ele alınmıştır.

Fosil yakıtların sera gazı emisyonları, hava kirliliği, ekosistem bozulması ve sağlık sorunlarıyla ilişkisi açıklanmıştır. Yenilenebilir kaynakların genel olarak daha düşük etkili olmasına rağmen yaşam döngüsü ve yerel koşullar açısından değerlendirilmesi gerektiği vurgulanmıştır.

İklim değişikliği, karbon ayak izi ve sera etkisi enerji sistemleriyle bağlantılı olarak incelenmiştir. Talep yönetimi, enerji verimliliği, düşük karbonlu kaynaklara geçiş ve sürdürülebilir tüketimin birlikte ele alınması gerektiği gösterilmiştir.

Son olarak enerji eğitimi; fen eğitimi, çevre eğitimi, STEM ve sosyobilimsel tartışmalar için güçlü bir öğrenme alanı olarak tanımlanmıştır. Bu yaklaşım, bireylerin enerji kararlarını daha bilinçli değerlendirmelerine yardımcı olabilir.

Tartışma Soruları

1. Enerji neden yalnızca teknik bir konu olarak değil, çevresel ve toplumsal bir konu olarak da değerlendirilmelidir?
2. Enerjinin korunumu yasası günlük yaşamdan hangi örneklerle açıklanabilir?
3. Enerji tasarrufu ile enerji verimliliği arasındaki fark nedir? Bu ayrım neden önemlidir?
4. Yenilenebilir enerji kaynakları fosil yakıtlara göre daha çevre dostu kabul edilse de neden tamamen etkisiz değildir?
5. Karbon ayak izi yalnızca bireysel davranışlarla açıklanabilir mi? Neden?
6. İklim değişikliği enerji sistemlerini nasıl etkileyebilir?
7. Enerji okuryazarlığı neden yalnızca bilgi sahibi olmakla sınırlı değildir?
8. Bir okulda enerji verimliliğini artırmak için hangi uygulamalar yapılabilir?
9. Bir rüzgâr türbini veya hidroelektrik santral projesi değerlendirilirken hangi çevresel ve toplumsal faktörler dikkate alınmalıdır?
10. Enerji eğitimi, öğrencilerin sürdürülebilir bir gelecek için sorumlu karar verme becerilerini nasıl geliştirebilir?

BÖLÜM 2: ENERJİ KAYNAKLARI

Enerji kaynakları; insanların ısınma, aydınlatma, ulaşım, sanayi, tarım ve iletişim gibi ihtiyaçlarını karşılamak için kullandıkları doğal kaynaklar ve dönüştürülmüş enerji biçimleridir. Bu bölümde bu kaynaklar yalnızca adlarıyla değil, enerji sistemi içindeki işlevleri ve sürdürülebilirlik açısından doğurdukları sonuçlar bakımından incelenmektedir (DOE and AAAS, 2017; Energy Institute, 2024).

Enerji kaynakları genellikle yenilenebilir ve yenilenemeyen kaynaklar olarak sınıflandırılır. Bu ayrım öğrenme için yararlı bir başlangıç noktası sağlar; ancak sürdürülebilirlik yalnızca yenilenme hızıyla açıklanamaz. Üretim teknolojisi, yaşam döngüsü etkileri, altyapı gereksinimleri, sistem esnekliği, maliyet, enerji güvenliği ve toplumsal kabul de karar verme sürecinin parçalarıdır (IRENA, 2024; Wüstenhagen et al., 2007).

Bu bölüm, Bölüm 1'de ele alınan temel kavramları enerji kaynakları bağlamında genişletmektedir. Amaç, Bölüm 3 ve 4'te yenilenemeyen ve yenilenebilir kaynakların ayrıntılı tartışmasına geçmeden önce okuyuculara karşılaştırmalı bir değerlendirme çerçevesi sunmaktır.

Bölüm boyunca çevresel etki, yaşam döngüsü, maliyet, süreklilik, enerji güvenliği, teknolojik uygulanabilirlik, toplumsal kabul ve adil erişim birlikte ele alınmaktadır. Bu yaklaşım, kaynakların basit bir olumlu-olumsuz ayrımıyla değil, kanıta dayalı ve çok boyutlu bir karar verme süreci içinde değerlendirilmesini mümkün kılar (DeWaters et al., 2013; Ramachandran et al., 2024; Sovacool and Dworkin, 2015).

Bu bölümde enerji kaynaklarının sınıflandırılması, birincil ve ikincil enerji ayrımı, enerji taşıyıcıları, başlıca kaynak grupları, karar verme ölçütleri, enerji güvenliği, toplumsal kabul ve sürdürülebilir enerji karması ele alınmaktadır (Kutu 2.1).

Kutu 2.1. Bu bölümde neler öğrenilecek?

Öğrenme Hedefi
Yenilenebilir ve yenilenemeyen kaynakları temel özelliklerine göre ayırt etmek.
Birincil enerji, ikincil enerji ve enerji taşıyıcısı kavramlarını örneklerle açıklamak.
Enerji kaynaklarını çevresel etki, maliyet, süreklilik, enerji güvenliği ve toplumsal kabul açısından değerlendirmek.
Bir enerji kaynağının yalnızca kullanım aşamasını değil, üretimden atık yönetimine kadar olan etkilerini de tartışmak.
Yerli kaynaklar, ithalat bağımlılığı, fiyat kırılganlığı ve enerji yoksulluğu gibi konuları enerji kararlarıyla ilişkilendirmek.
Farklı kaynakların güçlü yönlerini ve sınırlılıklarını dikkate alarak dengeli bir enerji karması tasarlamak.

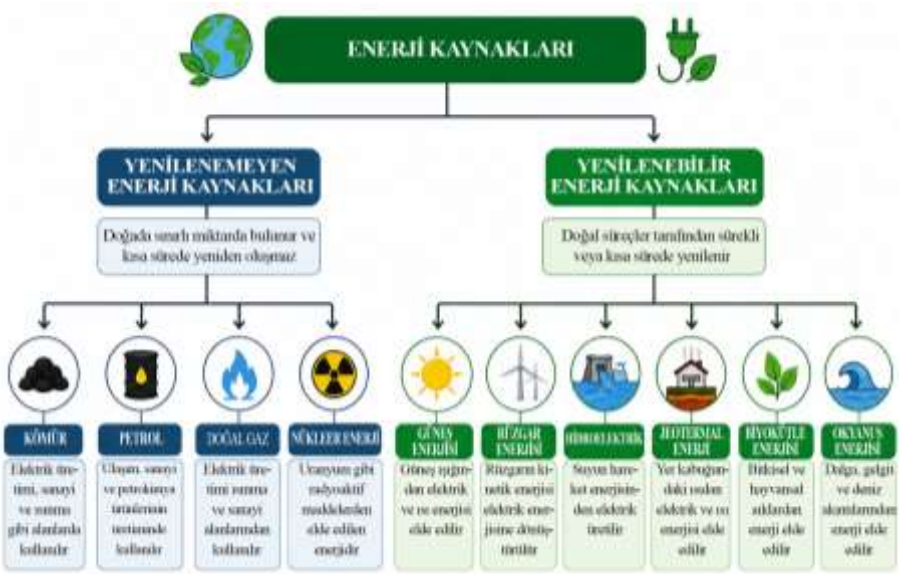
2.1. Enerji Kaynaklarının Temel Sınıflandırılması

Enerji kaynakları; doğadaki biçimleri, yenilenme hızları, kullanım alanları, enerji sistemindeki rolleri, çevresel etkileri ve ekonomik maliyetleri gibi farklı ölçütlere göre sınıflandırılabilir. Bu kitapta temel ayrım

yenilenemeyen ve yenilenebilir enerji kaynakları arasında yapılmaktadır; ancak bu ayrım yalnızca ilk adımdır (DOE and AAAS, 2017; IEA, 2024).

Yenilenemeyen enerji kaynakları doğada sınırlı miktarda bulunan ve insan yaşamı açısından kısa bir süre içinde yeniden oluşmayan kaynaklardır. Kömür, petrol, doğal gaz ve uranyum bu gruba girer. Yüksek enerji yoğunluğu ve gelişmiş altyapı önemli avantajlar sağlasa da iklim değişikliği, hava kirliliği, ekosistem baskısı, dışa bağımlılık, güvenlik ve atık yönetimi gibi konular dikkate alınmalıdır (International Atomic Energy Agency [IAEA], 2024).

Yenilenebilir enerji kaynakları, doğal süreçlerle sürekli olarak veya kısa süreler içinde yenilenebilen kaynaklardır. Güneş ışınımı, rüzgâr, akan su, jeotermal ısı, biyokütle ve deniz-okyanus hareketleri bu gruba girer. Düşük karbonlu enerji sistemleri için önemli olsalar da arazi kullanımı, malzeme gereksinimleri, değişken üretim, ekosistem etkileri, geri dönüşüm ve toplumsal kabul ile birlikte değerlendirilmelidirler (NREL, 2021; Wüstenhagen et al., 2007). Şekil 2.1, enerji kaynaklarının iki ana grupta incelenebileceğini göstermektedir. Ancak sınıflandırma mutlak bir iyi-kötü ayrımı olarak yorumlanmamalıdır; kaynakların uygunluğu kullanım bağlamına, teknolojiye, yer seçimine, maliyete ve çevresel-toplumsal sonuçlara göre değişir.



Şekil 2.1. Enerji kaynaklarının temel sınıflandırılması

Tablo 2.1, yenilenemeyen ve yenilenebilir enerji kaynaklarını kaynak durumu, örnekler, çevresel etkiler, enerji güvenliği, süreklilik, teknolojik gereksinimler ve sürdürülebilirlik açısından karşılaştırmaktadır. Bununla

birlikte enerji planlaması yalnızca kaynak türüne dayanmamalıdır. Teknoloji, ölçek, yerel koşullar, maliyet, altyapı ve toplumsal etkiler de belirleyicidir. Bu nedenle bölümün geri kalanında enerji kaynakları daha geniş bir karar verme çerçevesinde incelenmektedir.

Tablo 2.1. Yenilenemeyen ve yenilenebilir enerji kaynaklarının karşılaştırılması

Özellik	Yenilenemeyen Enerji Kaynakları	Yenilenebilir Enerji Kaynakları
Kaynak durumu	Sınırlıdır ve kısa sürede yenilenmez.	Doğal süreçlerle sürekli veya kısa sürede yenilenir.
Örnekler	Kömür, petrol, doğal gaz, uranyum	Güneş, rüzgâr, hidroelektrik, jeotermal, biyokütle, okyanus enerjisi
Çevresel etki	Fosil yakıtlar yüksek sera gazı emisyonlarına ve kirliliğe neden olabilir.	Genellikle daha düşük sera gazı emisyonlarına sahiptir; ancak yerel çevresel etkileri olabilir.
Enerji güvenliği	İthalat bağımlılığı yaratabilir.	Yerel kaynaklara dayalı üretimi destekleyebilir.
Süreklilik	Stoklara ve rezervlere bağlıdır.	Kaynağın doğal koşullarına bağlıdır; bazıları değişken üretim yapabilir.
Teknolojik ihtiyaç	Mevcut altyapı yaygındır.	Depolama, akıllı şebekeler ve esnek enerji sistemleri gerekebilir.
Sürdürülebilirlik	Uzun vadede sınırlı ve çevresel açıdan sorunludur.	Doğru planlandığında sürdürülebilir enerji sistemlerine katkı sağlayabilir.

2.2. Birincil Enerji, İkincil Enerji ve Enerji Taşıyıcıları

Enerji kaynaklarını değerlendirmek için yenilenebilir-yenilenemeyen ayrımına ek olarak birincil enerji, ikincil enerji ve enerji taşıyıcısı kavramlarını anlamak gerekir. Bu kavramlar, enerjinin doğadan elde edilmesinden son kullanıcıya ulaştırılmasına kadar olan dönüşüm zincirini açıklamaya yardımcı olur (DOE and AAAS, 2017; IEA, 2024).

Birincil enerji, doğrudan doğada bulunan ve henüz başka bir enerji biçimine dönüştürülmemiş kaynakları ifade eder. Kömür, petrol, doğal gaz, uranyum, güneş ışınımı, rüzgâr, akan su, jeotermal ısı ve biyokütle birincil enerji kaynaklarına örnek olarak verilebilir (DOE and AAAS, 2017).

İkincil enerji, birincil enerji kaynaklarının dönüştürülmesiyle elde edilen enerji biçimidir. Elektrik en yaygın örnektir. Elektrik kömür, doğal gaz, hidroelektrik, rüzgâr veya güneş enerjisi kullanılarak üretilebilir; bu nedenle elektriğin çevresel etkisi, üretiminde hangi birincil kaynakların ve teknolojilerin kullanıldığına bağlıdır (IEA, 2024).

Enerji taşıyıcısı, enerjinin bir yerden başka bir yere taşınmasını veya daha sonra kullanılmak üzere depolanmasını sağlayan ara bir enerji biçimidir. Bu açıdan elektrik ve hidrojen önemli enerji taşıyıcılarıdır. Hidrojenin düşük karbonlu bir seçenek olup olmadığı hidrojenin kendisinden çok üretim yöntemine bağlıdır (IEA, 2024; IRENA, 2024).

Bu ayrım, enerji kararlarında kaynak, teknoloji ve taşıyıcı kavramlarının karıştırılmaması açısından önemlidir. Örneğin bir elektrikli aracın çevresel etkisi yalnızca egzoz emisyonu olmamasıyla açıklanamaz;

elektrik üretim karması, batarya üretimi ve şarj altyapısı da dikkate alınmalıdır (IEA, 2024; NREL, 2021).

Tablo 2.2, birincil enerji, ikincil enerji ve enerji taşıyıcıları arasındaki ayrımı özetlemektedir. Bu ayrım enerji okuryazarlığı açısından önemlidir; çünkü enerjiyle ilgili tartışmalarda kaynak, dönüşüm teknolojisi ve enerji taşıyıcısı kavramları zaman zaman karıştırılmaktadır. Karar verme süreçlerinde "hangi kaynak?", "hangi teknoloji?", "hangi dönüşüm yolu?" ve "hangi son kullanım?" soruları birlikte ele alınmalıdır (DeWaters et al., 2013; Ramachandran et al., 2024).

Tablo 2.2. Birincil enerji, ikincil enerji ve enerji taşıyıcılarına örnekler

Kavram	Açıklama	Örnekler
Birincil enerji	Doğrudan doğada bulunan enerji kaynağıdır.	Kömür, petrol, doğal gaz, güneş ışınımı, rüzgâr, su, jeotermal ısı, biyokütle
İkincil enerji	Birincil enerji kaynaklarının dönüştürülmesiyle elde edilir.	Elektrik, benzin, dizel, bazı biyoyakıtlar
Enerji taşıyıcısı	Enerjinin taşınmasını, depolanmasını veya son kullanımını kolaylaştırır.	Elektrik, hidrojen, sentetik yakıtlar

2.3. Yenilenemeyen Enerji Kaynakları: Genel Değerlendirme

Yenilenemeyen enerji kaynakları modern ekonomilerin gelişmesinde belirleyici bir rol oynamıştır. Kömür, petrol, doğal gaz ve nükleer enerji; elektrik üretimi, ulaşım, sanayi ve ısınma gibi alanlarda uzun süre başlıca seçenekler arasında yer almıştır (Energy Institute, 2024; Jyothi et al., 2023; Smith et al., 2019). Bu bölüm, karar verme için temel oluşturmak üzere yenilenemeyen kaynaklara ilişkin genel bir değerlendirme sunmaktadır; bu kaynakların ayrıntılı çevresel etkileri Bölüm 3'te tartışılmaktadır.

Yüksek enerji yoğunluğu, depolanabilirlik ve mevcut altyapıyla uyumluluk yenilenemeyen kaynakların öne çıkan güçlü yönleridir. Kömür, petrol ve doğal gaz taşınabilir yakıtlar olarak enerji sistemlerine esneklik sağlamıştır. Nükleer enerji de elektrik üretimi sırasında doğrudan fosil yakıt yakmadığı için düşük karbonlu seçenekler arasında tartışılmaktadır; ancak uranyum arzı, radyoaktif atık, güvenlik ve toplumsal kabul dikkatli planlama gerektirir (Energy Institute, 2024; IAEA, 2024).

Buna karşılık fosil yakıtların yakılması sera gazı emisyonları, hava kirliliği ve sağlık etkileri açısından büyük sorunlar yaratır (EPA, 2025; IPCC, 2023). Ayrıca kömür madenciliği, petrol çıkarımı, doğal gaz üretimi, boru hatları ve rafineri süreçleri gibi aşamalar suyu, toprağı ve ekosistemleri etkileyebilir. Bu nedenle yenilenemeyen kaynaklar yalnızca kullanım aşamasına göre değil, tüm yaşam döngüsü dikkate alınarak değerlendirilmelidir (NREL, 2021).

Enerji güvenliği açısından yenilenemeyen kaynakların durumu ülkeden ülkeye değişir. Yerli kaynaklara sahip ülkeler arz güvenliği açısından avantaj kazanabilirken, ithalata bağımlı ülkeler fiyat dalgalanmaları,

jeopolitik riskler ve dışa bağımlılıkla karşılaşabilir. Bu durum enerji kaynaklarının ekonomik ve politik boyutlarının teknik özellikleri kadar önemli olduğunu göstermektedir (Energy Institute, 2024; IEA, 2024).

Bu nedenle yenilenemeyen enerji kaynakları değerlendirilirken yalnızca kısa vadeli maliyetler veya mevcut altyapının kolaylığı dikkate alınmamalıdır. İklim etkileri, hava kalitesi, sağlık maliyetleri, rezerv sınırlılıkları, atık yönetimi, dışa bağımlılık ve fosil yakıtların aşamalı olarak terk edilmesinin toplumsal sonuçları birlikte düşünülmelidir (IPCC, 2023; ILO, 2015).

2.4. Yenilenebilir Enerji Kaynakları: Genel Değerlendirme

Yenilenebilir enerji kaynakları düşük karbonlu ve daha sürdürülebilir enerji sistemleri açısından giderek daha fazla önem kazanmaktadır. Güneş, rüzgâr, hidroelektrik, jeotermal, biyokütle ve deniz-okyanus enerjisi bu kapsamda değerlendirilir (Neha and Rambeer, 2021). Bu bölüm, ilerleyen bölümlerde belirli yenilenebilir enerji teknolojilerinin ayrıntılı tartışmasına geçmeden önce yenilenebilir kaynaklara ilişkin genel bir değerlendirme sunmaktadır.

Yenilenebilir kaynakların en önemli avantajı, yaşam döngüsü boyunca genellikle fosil yakıtlara göre daha düşük sera gazı emisyonlarına sahip olmalarıdır (NREL, 2021). Ayrıca yerel kaynaklara dayalı üretimi destekleyebilir, enerji ithalatına bağımlılığı azaltabilir ve enerji sistemlerinin çeşitlendirilmesine katkı sağlayabilirler (IRENA, 2024).

Bununla birlikte yenilenebilir enerji kaynakları tek tip veya sorunsuz seçenekler değildir. Güneş ve rüzgâr enerjisi değişken üretim yapabilir; hidroelektrik projeler nehir ekosistemlerini etkileyebilir; biyokütle sürdürülebilir hammadde yönetimi gerektirir; jeotermal enerji ise yerel çevre koşullarına bağlıdır. Bu nedenle yer seçimi, şebeke entegrasyonu, depolama, malzeme kullanımı, geri dönüşüm ve toplumsal kabul birlikte değerlendirilmelidir (IRENA, 2024; Wüstenhagen et al., 2007).

Bu nedenle yenilenebilir kaynakların değerlendirilmesi, düşük karbon avantajlarını kabul ederken yerel çevresel ve toplumsal etkileri de görünür kılan dengeli bir yaklaşıma dayanmalıdır.

Tablo 2.3, enerji kaynaklarının farklı sektörlerde farklı roller üstlendiğini göstermektedir. Ancak bir kaynağın kullanım alanı, onun otomatik olarak en uygun seçenek olduğu anlamına gelmez. Uygunluk; yerel potansiyel, maliyet, altyapı, çevresel etki, süreklilik ve toplumsal kabul ölçütleriyle birlikte belirlenir (IEA, 2024; IRENA, 2024).

Tablo 2.3. Başlıca enerji kaynakları, enerji taşıyıcıları ve kullanım alanları

Enerji Kaynağı	Kaynak Türü	Yaygın Kullanım Alanları
Kömür	Yenilenemeyen	Elektrik üretimi, sanayi, ısınma
Petrol	Yenilenemeyen	Ulaşım, sanayi, petrokimya ürünleri
Doğal gaz	Yenilenemeyen	Elektrik üretimi, ısınma, sanayi
Nükleer enerji	Yenilenemeyen	Elektrik üretimi
Güneş enerjisi	Yenilenebilir	Elektrik üretimi, su ısıtma, küçük ölçekli sistemler
Rüzgâr enerjisi	Yenilenebilir	Elektrik üretimi
Hidroelektrik	Yenilenebilir	Elektrik üretimi, depolama ve sistem dengeleme
Jeotermal enerji	Yenilenebilir	Elektrik üretimi, ısıtma, seracılık
Biyokütle enerjisi	Yenilenebilir	Isı, elektrik, biyogaz ve biyoyakıt üretimi
Deniz ve okyanus enerjisi	Yenilenebilir	Elektrik üretimi, araştırma ve pilot uygulamalar
Hidrojen	Enerji taşıyıcısı	Sanayi, ulaşım, enerji depolama, yakıt hücreleri

2.5. Enerji Kaynaklarını Değerlendirme Ölçütleri: Karar Verme Çerçevesi

Enerji kaynaklarını karşılaştırmak onları yenilenebilir veya yenilenemeyen olarak sınıflandırmakla sınırlı değildir. Gerçek enerji kararları çok ölçütlü kararlardır. Bir ülke, belediye, okul veya hane için uygun seçenek; coğrafi koşullara, altyapıya, maliyete, çevresel hedeflere, enerji talebine ve toplumsal beklentilere göre değişebilir (IEA, 2024; WCED, 1987). Çevresel etki en temel ölçütlerden biridir; ancak bu etki enerji üretimi sırasında oluşan emisyonlarla sınırlı değildir. Hammadde çıkarımı, üretim, taşıma, kurulum, işletme, bakım, söküm ve atık yönetimi gibi aşamalar da yaşam döngüsü içinde değerlendirilmelidir. Bu nedenle bir enerji kaynağının "temiz" olup olmadığı ancak tüm süreçler birlikte incelenerek anlaşılabilir (NREL, 2021). Maliyet de çok boyutlu bir ölçüttür. Bir enerji seçeneğinin maliyeti yalnızca santralin ilk yatırım maliyetiyle belirlenmez; yakıt, bakım, şebeke bağlantısı, depolama, yedek kapasite, çevresel zarar ve toplumsal etkiler de dikkate alınmalıdır. Bu nedenle kısa vadede düşük görünen maliyetler uzun vadede daha yüksek çevresel veya toplumsal maliyetler yaratabilir (IEA, 2024; IRENA, 2024).

Süreklilik ve enerji güvenliği, enerji sistemlerinin güvenilir biçimde işlemesi için önemlidir. Bazı kaynaklar yönlendirilebilir üretim sağlayabilirken, bazı yenilenebilir kaynaklar hava koşullarına bağlı olarak değişken üretim yapar. Bu durum şebeke esnekliği, depolama, talep yönetimi ve kaynak çeşitliliği gerektirir (IEA, 2024; IRENA, 2024).

Toplumsal kabul ve adil erişim de karar verme sürecinin parçası olmalıdır. Bir enerji projesi teknik olarak uygulanabilir ve ekonomik olarak uygun olsa bile, yerel toplulukların yaşam alanlarını, tarımı, turizmi veya kültürel değerleri olumsuz etkiliyorsa tartışmalı hâle gelebilir. Sürdürülebilir

enerji kararları yalnızca ne kadar enerji üretildiğini değil; enerjinin kim için, nerede, hangi maliyetle ve hangi toplumsal sonuçlarla üretildiğini de sorgulamalıdır (Sovacool and Dworkin, 2015; Wüstenhagen et al., 2007).

Tablo 2.4, enerji kaynaklarının tek boyutlu olarak değerlendirilmemesi gerektiğini göstermektedir. Tek bir kaynağı mutlak olarak üstün göstermek yerine karar verme çerçevesi, belirli bir bağlamda hangi kaynak bileşiminin daha sürdürülebilir ve uygulanabilir olduğunu tartışmaya açar.

Tablo 2.4. Enerji kaynaklarını değerlendirmeye yönelik karar verme çerçevesi

Ölçüt	Açıklama	Karar Verme Açısından Önemi
Çevresel etki	Sera gazı emisyonları, hava-su-toprak etkileri ve ekosistem baskısı	İklim hedefleri, çevre koruma ve halk sağlığı için temel bir ölçüttür.
Yaşam döngüsü	Hammadde çıkarımı, üretim, taşıma, kurulum, işletme, söküm ve atık yönetimi	Kaynağın yalnızca kullanım aşamasını değil tüm etkilerini görmeyi sağlar.
Sistem maliyeti	Kurulum, işletme, yakıt, bakım, şebeke, depolama ve dışsal maliyetler	Enerji fiyatlarını, yatırım kararlarını ve uzun dönemli uygulanabilirliği etkiler.
Süreklilik ve esneklik	Bir kaynağın düzenli üretim sağlayabilmesi ve sistemin değişken üretime uyumu	Elektrik sistemi güvenilirliği ve arz-talep dengesi için önemlidir.
Enerji güvenliği	Kaynağın sürekli, erişilebilir ve ekonomik biçimde sağlanabilmesi	Dışa bağımlılığı, fiyat kırılganlığını ve arz risklerini azaltabilir.
Teknolojik uygulanabilirlik	Teknoloji olgunluğu, yerel kapasite, bakım ve işletme gereksinimleri	Bir kaynağın pratikte kurulup sürdürülebilir olup olmadığını belirler.
Altyapı ihtiyacı	Şebeke bağlantısı, depolama, taşıma, iletim ve dağıtım gereksinimleri	Enerji dönüşümünün hızını, maliyetini ve sistem uyumluluğunu etkiler.
Toplumsal kabul	Yerel toplulukların, kurumların ve toplumun projeye yönelik tutumları	Projelerin uygulanabilirliği ve uzun dönemli başarısı için kritiktir.
Adil erişim	Güvenli, uygun maliyetli ve kapsayıcı enerji erişimi	Enerji yoksulluğu, bölgesel eşitsizlik ve adil geçiş açısından önemlidir.

2.6. Enerji Güvenliği, Uygulanabilirlik ve Toplumsal Kabul

Enerji güvenliği, enerjinin sürekli, güvenilir, erişilebilir ve ekonomik biçimde sağlanabilmesi anlamına gelir (Bhattarai, 2022). Bir ülkenin enerji güvenliği yerli kaynaklarına, ithalata bağımlılığına, enerji altyapısının dayanıklılığına, fiyat istikrarına ve kaynak çeşitliliğine bağlıdır (IEA, 2024). Yenilenemeyen enerji kaynaklarına yüksek bağımlılık, özellikle enerji ithal eden ülkeler için dışa bağımlılık ve fiyat kırılganlığı yaratabilir. Petrol ve doğal gaz fiyatlarındaki dalgalanmalar enerji maliyetlerini ve ekonomik planlamayı etkileyebilir. Yenilenebilir kaynaklar yerel üretimi destekleyebilir; ancak değişken üretim, şebeke esnekliği ve depolama gereksinimleri gibi yeni planlama ihtiyaçları da doğurabilir (Energy Institute, 2024; IEA, 2024).

Teknolojik uygulanabilirlik de enerji kaynaklarının kullanımında belirleyici bir faktördür. Bir bölgede yüksek güneş veya rüzgâr potansiyelinin bulunması tek başına yeterli değildir. Bu potansiyeli kullanmak için uygun teknoloji, yatırım, bakım kapasitesi, şebeke bağlantısı, arazi kullanımı planlaması ve kurumsal düzenlemeler gereklidir (IRENA, 2024). Enerji projelerinin uygulanabilirliği açısından toplumsal kabul giderek daha önemli hâle gelmektedir. Projeler yerel toplulukların yaşam alanlarını, doğal çevreyi, tarımsal üretimi, turizmi veya kültürel mirası etkileyebilir. Bu nedenle katılım, şeffaflık, yerel fayda paylaşımı ve çevresel etki değerlendirmesi önemlidir (Sovacool and Dworkin, 2015; Wüstenhagen et al., 2007).

Enerji okuryazarlığı, enerji güvenliği ile toplumsal kabul arasında bağlantı kurar. Doğru bilgiye sahip bireyler enerji projelerini daha sağlıklı değerlendirebilir; ancak kabulün güçlenmesi için karar verme süreçlerinin de adil, katılımcı ve güvenilir olması gerekir (DeWaters et al., 2013; Ramachandran et al., 2024).

2.7. Sürdürülebilir Enerji Karması ve Karar Verme

Enerji kaynaklarının seçimi ülkelerin coğrafi koşullarına, ekonomik yapılarına, teknolojik kapasitelerine, enerji taleplerine ve politika hedeflerine göre değişebilir. Örneğin güneşlenme süresi yüksek bölgelerde güneş enerjisi, rüzgâr potansiyeli yüksek kıyı ve açık alanlarda rüzgâr enerjisi, uygun jeolojik koşullara sahip bölgelerde ise jeotermal enerji daha güçlü bir seçenek olabilir (IRENA, 2024). Sürdürülebilirlik açısından enerji kararlarında üç temel boyut birlikte ele alınmalıdır. Çevresel boyut iklim, hava, su, toprak ve ekosistemler üzerindeki etkileri kapsar. Ekonomik boyut yatırım, işletme, enerji fiyatları ve dışa bağımlılık gibi konuları içerir. Toplumsal boyut ise enerjiye erişim, adil geçiş, sağlık, istihdam, yerel katılım ve toplumsal kabul ile ilgilidir (WCED, 1987).

Sürdürülebilir bir enerji sistemi yalnızca yenilenebilir kaynakların artırılması anlamına gelmez. Enerji verimliliği, tüketim alışkanlıkları, enerji depolama, akıllı şebekeler, talep yönetimi, ulaşımın dönüşümü ve sanayide temiz teknolojiler de bu sürecin parçalarıdır (IEA, 2024; IRENA, 2024). Bu nedenle sürdürülebilir bir enerji sistemi kurmak için tek bir kaynağa dayanmak yerine farklı kaynaklar ve teknolojiler tamamlayıcı olarak değerlendirilmelidir. Bir enerji karması tasarlanırken kısa vadeli arz güvenliği ile uzun vadeli iklim ve çevre hedefleri birlikte dikkate alınmalıdır. Bu yaklaşım, sonraki bölümlerde farklı kaynak gruplarının daha ayrıntılı değerlendirilmesi için temel sağlamaktadır.

2.8. Enerji Okuryazarlığı Açısından Değerlendirme

Enerji kaynaklarının sınıflandırılması enerji okuryazarlığının temel konularından biridir. Ancak enerji okuryazarlığı kaynak adlarını bilmekle sınırlı değildir. Enerji okuryazarı bireyler kaynakları çevresel etkileri, ekonomik maliyetleri, enerji güvenliğine katkıları, toplumsal sonuçları ve

yaşam döngüsü etkileriyle birlikte değerlendirebilmelidir (DeWaters et al., 2013; Ramachandran et al., 2024).

Bu açıdan enerji kaynakları fen ve çevre eğitimi için güçlü bir öğrenme alanı sunar. Öğrenciler kömür, petrol, doğal gaz, nükleer enerji, güneş, rüzgâr, hidroelektrik, jeotermal, biyokütle ve hidrojen gibi seçenekleri yalnızca tanım düzeyinde değil, karşılaştırmalı bir karar verme süreci içinde inceleyebilir (DeWaters et al., 2013; DOE and AAAS, 2017).

Enerji kaynakları sosyobilimsel tartışmalar için de uygundur. Kömürden çıkışın hızı, doğal gazın geçiş yakıtı olarak kullanımı, nükleer enerjinin rolü, hidroelektrik projelerin ekosistem etkileri veya rüzgâr türbinlerinin yer seçimi gibi konular bilimsel bilgi ile toplumsal değerlerin birlikte tartışılmasını gerektirir (Sadler, 2004; Zeidler, 2014).

Enerji kaynaklarına ilişkin sınıf içi etkinlikler; karşılaştırmalı tablolar hazırlama, ülke enerji profillerini inceleme, enerji senaryoları geliştirme, karbon ayak izi hesaplama, yerel enerji projelerini değerlendirme ve enerji karması tasarlama gibi uygulamalarla desteklenebilir. Bu etkinliklerde öğrenciler 2.5. bölümde sunulan karar verme ölçütlerini kullanarak kanıta dayalı değerlendirmeler yapabilir.

Kutu 2.2, öğrencilerin 2.5. bölümde sunulan karar verme ölçütlerini enerji karması tasarımına uygulamalarına yardımcı olan bir sınıf içi etkinlik sunmaktadır. Bu tür etkinlikler enerji kaynakları konusunu öğrenciler için daha somut hâle getirir. Ayrıca enerji okuryazarlığının yalnızca bilgiyi değil; analiz, kanıta dayalı değerlendirme, tartışma ve sorumlu karar verme becerilerini de içerdiğini gösterir.

Kutu 2.2. Sınıf içi etkinlik önerisi: Bir ülke için enerji karması tasarlama

Etkinlik Aşaması	Açıklama
Amaç	Öğrencilerin farklı enerji kaynaklarını karar verme ölçütleri kullanarak değerlendirmelerini sağlamak.
Uygulama	Öğrenciler, kurgusal bir ülke için enerji ihtiyaçları, coğrafi koşullar, ekonomik olanaklar ve çevresel hedeflere göre bir enerji karması önerir.
Değerlendirme	Her kaynak çevresel etki, yaşam döngüsü, sistem maliyeti, enerji güvenliği, süreklilik, altyapı ihtiyacı ve toplumsal kabul açısından puanlanır.
Tartışma	"Tek bir enerji kaynağına dayanmak mı, yoksa farklı kaynakları birlikte kullanmak mı daha sürdürülebilirdir?" sorusu tartışılır.
Çıktı	Öğrenciler enerji planlamasının teknik, çevresel, ekonomik ve toplumsal boyutları birlikte içerdiğini anlar.

2.9. Bölüm Özeti ve Tartışma Soruları

Bu bölüm enerji kaynaklarını yalnızca adları veya teknik özellikleriyle değil, karar verme süreci içinde incelemiştir. Yenilenebilir-yenilenemeyen ayrımı temel bir başlangıç noktasıdır; ancak bir kaynağın sürdürülebilirliği teknoloji, yerel koşullar, yaşam döngüsü etkileri, maliyet, enerji güvenliği ve toplumsal kabul ölçütleriyle birlikte değerlendirilmelidir.

Birincil enerji, ikincil enerji ve enerji taşıyıcıları arasındaki ayrım enerji sistemlerinin doğru anlaşılması için önemlidir. Elektrik ve hidrojen gibi taşıyıcıların çevresel etkileri, hangi kaynaklar ve teknolojilerle üretildiklerine bağlıdır.

Yenilenemeyen kaynaklar yüksek enerji yoğunluğu ve mevcut altyapı gibi avantajlar sağlayabilir; ancak iklim, hava kalitesi, atık yönetimi ve dışa bağımlılık açısından önemli sınırlılıklara sahiptir. Yenilenebilir kaynaklar düşük karbonlu dönüşüm için güçlü seçenekler sunar; bununla birlikte yer seçimi, değişken üretim, ekosistem etkileri, malzeme kullanımı ve toplumsal kabul açısından planlama gerektirir.

Enerji okuryazarlığı açısından temel hedef, bireylerin farklı kaynakları çevresel, ekonomik ve toplumsal sonuçlarıyla birlikte karşılaştırabilmesini ve sürdürülebilir enerji kararlarına bilinçli biçimde katılabilmesini sağlamaktır.

Tartışma Soruları

1. Enerji kaynaklarını yenilenebilir ve yenilenemeyen olarak sınıflandırmak neden önemlidir? Bu sınıflandırma neden tek başına yeterli değildir?
2. Birincil enerji, ikincil enerji ve enerji taşıyıcısı arasındaki fark nedir?
3. Elektriğin çevresel etkisi neden onu üretmek için kullanılan kaynak karmasına bağlıdır?
4. Hidrojenin düşük karbonlu bir enerji taşıyıcısı olup olmadığı neden üretim yöntemine bağlıdır?
5. Yenilenemeyen enerji kaynaklarının güçlü yönleri ve sürdürülebilirlik açısından sınırlılıkları nelerdir?
6. Yenilenebilir enerji kaynakları neden tamamen sorunsuz kabul edilmemelidir?
7. Bir enerji kaynağını değerlendirirken yaşam döngüsü yaklaşımı neden önemlidir?
8. Enerji güvenliği, maliyet ve çevresel etki arasında nasıl bir ilişki kurulabilir?
9. Enerji projelerinde toplumsal kabul ve yerel katılım neden önemlidir?
10. Sürdürülebilir bir enerji sistemi için farklı kaynakların birlikte kullanılması neden gereklidir?

BÖLÜM 3: YENİLENEMEYEN ENERJİ KAYNAKLARI VE ÇEVRESEL ETKİLERİ

Yenilenemeyen enerji kaynakları, doğada sınırlı miktarda bulunan ve insan yaşamı açısından kısa sayılabilecek sürelerde yeniden oluşamayan kaynaklardır. Kömür, petrol, doğal gaz ve nükleer enerji üretiminde kullanılan uranyum bu grupta değerlendirilir. Bu kaynaklar tarihsel olarak sanayileşmenin, ulaşımın, kentleşmenin ve elektrik üretiminin gelişmesinde belirleyici bir rol oynamıştır (DOE and AAAS, 2017; Energy Institute, 2024; Jyothi et al., 2023).

Bu kaynakların yaygın kullanımı; yüksek enerji yoğunluğu, depolanabilirlik, mevcut altyapıyla uyumluluk ve sürekli arz sağlayabilme özellikleriyle şekillenmiştir. Kömür elektrik üretimi ve sanayide, petrol ulaşımda, doğal gaz elektrik üretimi, ısınma ve sanayide kullanılmakta; nükleer enerji ise bazı ülkelerde fosil yakıt yakmadan büyük ölçekli elektrik üretimi sağlayan bir seçenek olarak değerlendirilmektedir (IAEA, 2024; IEA, 2022).

Buna karşılık yenilenemeyen kaynaklar iklim değişikliği, hava kirliliği, su ve toprak kirliliği, atık yönetimi, iş güvenliği, ithalata bağımlılık ve toplumsal kabul gibi sorunlarla ilişkilidir. Bu nedenle yalnızca üretim kapasitesi veya kısa vadeli maliyet açısından değil; çevresel etki, yaşam döngüsü, sistem maliyeti, enerji güvenliği, altyapı bağımlılığı ve adil geçiş gibi ölçütlerle birlikte değerlendirilmelidir (IEA, 2024; ILO, 2016; IPCC, 2023).

Kutu 3.1. Bu bölümde neler öğrenilecek?

Öğrenme Hedefi
Kömür, petrol, doğal gaz ve nükleer enerjinin temel özelliklerini açıklamak.
Bu kaynakları enerji yoğunluğu, altyapı uyumluluğu, maliyet, çevresel etki ve güvenlik açısından karşılaştırmak.
Fosil yakıt kullanımını sera gazı emisyonları, hava kirliliği, sağlık etkileri ve ekosistem baskılarıyla ilişkilendirmek.
Nükleer enerjiyi düşük işletme emisyonları, güvenlik, radyoaktif atık ve toplumsal kabul boyutlarıyla değerlendirmek.
Karbon yakalama, metan azaltımı ve yakıt değişimi gibi geçiş teknolojilerinin olanaklarını ve sınırlılıklarını tartışmak.
Yenilenemeyen kaynakların enerji güvenliği ve enerji okuryazarlığı açısından rolünü yorumlamak.

Bu bölümde fosil yakıtlar, nükleer enerji, çevresel etkiler, karbon yakalama ve metan azaltımı gibi geçiş teknolojileri, yenilenemeyen enerji kullanımına ilişkin küresel ve Avrupa ölçeğindeki eğilimler ile seçilmiş ülke örnekleri ele alınmaktadır. Amaç, Bölüm 2'de geliştirilen karar verme çerçevesini yenilenemeyen kaynaklara uygulamak ve bu kaynakların enerji dönüşümündeki yerini dengeli biçimde tartışmaktır (Kutu 3.1).

3.1. Fosil Enerji Kaynakları

Fosil enerji kaynakları kömür, petrol ve doğal gazdan oluşur. Milyonlarca yıl önce yaşamış organik kalıntıların yer altında basınç ve sıcaklık etkisiyle dönüşmesi sonucunda oluşan bu yakıtlar, uzun süre elektrik üretimi, ulaşım, sanayi, ısınma ve petrokimya gibi alanlarda başlıca enerji girdileri olmuştur (Energy Institute, 2024; Singh et al., 2020). Yüksek enerji yoğunluğu, taşınabilirlik, depolanabilirlik ve mevcut altyapıyla uyumluluk fosil yakıtları sanayileşme ve ekonomik büyüme süreçlerinde güçlü bir seçenek hâline getirmiştir. Ancak bu tarihsel avantajlar bugün çevresel maliyetler ve enerji güvenliği riskleriyle birlikte yeniden değerlendirilmektedir (Energy Institute, 2024; IEA, 2024).

Fosil yakıtların enerji sistemindeki rolü; iklim etkileri, hava kirliliği, çıkarma ve taşıma süreçlerinin çevresel sonuçları, fiyat dalgalanmaları, ithalata bağımlılık ve adil geçiş gereksinimiyle birlikte tartışılmalıdır (IPCC, 2023; ILO, 2016; Sovacool and Dworkin, 2015).

3.1.1. Kömür

Kömür, tarihsel olarak sanayileşmenin temel enerji kaynaklarından biridir. Elektrik üretiminde, demir-çelik üretimi gibi bazı endüstriyel süreçlerde ve ısınmada kullanılır. Yüksek karbon içeriği nedeniyle yakıldığında önemli miktarda karbondioksit açığa çıkarır; bu nedenle iklim değişikliği açısından en sorunlu fosil yakıtlardan biri olarak kabul edilir (IPCC, 2023; Energy Institute, 2024).

Kömür yakımı yalnızca karbondioksit emisyonları açısından değil, hava kirliliği açısından da önemlidir. Kükürt dioksit, azot oksitler, partikül madde ve ağır metaller insan sağlığı ve ekosistemler üzerinde olumsuz etkiler yaratabilir (EPA, 2025). Özellikle filtreleme ve emisyon kontrol sistemleri yetersiz olduğunda kömür kullanımı solunum yolu hastalıkları, kalp-damar sorunları ve asit yağmurlarıyla ilişkilendirilebilir. Kömür madenciliği de önemli çevresel etkiler yaratır. Açık ocak madenciliği arazi yapısını ve bitki örtüsünü değiştirebilir; yer altı madenciliği ise iş güvenliği, metan birikimi ve madencilik atıkları gibi riskler içerir. Bu nedenle kömürün enerji sistemlerindeki rolü ekonomik maliyetin yanı sıra iklim, sağlık ve yerel çevre maliyetleriyle birlikte değerlendirilmelidir (EPA, 2025; ILO, 2016; IPCC, 2023).

3.1.2. Petrol

Petrol özellikle ulaşım sektörü için kritik bir fosil yakıttır. Benzin, dizel, jet yakıtı ve çeşitli petrokimyasal ürünlerin üretiminde kullanılır. Karayolu taşımacılığı, havacılık, deniz taşımacılığı ve bazı endüstriyel süreçler hâlen büyük ölçüde petrol ürünlerine bağlıdır (Energy Institute, 2024; IEA, 2024; Singh et al., 2020).

Petrolün en önemli avantajlarından biri yüksek enerji yoğunluğu ve kolay taşınabilirliğidir. Bu özellikler petrolü uzun süre ulaşım sektörü için vazgeçilmez kılmıştır. Ancak petrolün çıkarılması, taşınması, rafine edilmesi

ve yakılması çevresel riskler taşır. Petrol sızıntıları deniz ve kıyı ekosistemlerine zarar verebilir. Rafineri süreçleri hava ve su kirliliğine yol açabilir. Petrol ürünlerinin yakılması karbondioksit, azot oksitler ve partikül madde emisyonlarına neden olabilir (EPA, 2025; IPCC, 2023). Petrol kaynaklarının belirli bölgelerde yoğunlaşması, ithalatçı ülkeler için dışa bağımlılık ve fiyat oynaklığı riskleri yaratır. Bu nedenle ulaşımda petrol bağımlılığını azaltmak için elektrikli araçlar, biyoyakıtlar, toplu taşıma, enerji verimliliği ve alternatif yakıtlar seçenekler arasında yer almaktadır (IEA, 2024; IRENA, 2024).

3.1.3. Doğal Gaz

Doğal gaz, büyük ölçüde metandan oluşan ve elektrik üretimi, ısınma, sanayi ve bazı ulaşım uygulamalarında kullanılan bir fosil yakıttır. Yanma sırasında kömüre göre daha düşük karbondioksit emisyonu üretebildiği için bazı enerji politikalarında kömürden yenilenebilir kaynaklara geçişte "geçiş yakıtı" olarak değerlendirilmektedir (IEA, 2024; Moore et al., 2014). Doğal gazın çevresel etkisi yalnızca yanma sırasındaki karbondioksit emisyonlarıyla sınırlı değildir. Çıkarma, işleme, taşıma ve dağıtım sırasında metan kaçakları oluşabilir. Metan atmosferde karbondioksite göre daha kısa süre kalsa da kısa vadede güçlü bir ısı tutma etkisine sahiptir; bu nedenle doğal gazın iklim etkisi değerlendirilirken kaçaklar dikkate alınmalıdır (EPA, 2025; IEA, 2024a).

Doğal gaz enerji güvenliği açısından da iki yönlü bir niteliğe sahiptir. Bir yandan kömüre göre daha esnek elektrik üretimi sağlayabilir ve değişken yenilenebilir kaynakları dengeleyebilir. Diğer yandan ithal doğal gaza yüksek bağımlılık fiyat oynaklığı ve jeopolitik riskler yaratabilir. Bu nedenle doğal gazın rolü geçici, dikkatli planlanmış ve düşük karbonlu dönüşümle uyumlu biçimde ele alınmalıdır (IEA, 2024, 2024a).

Tablo 3.1. Başlıca fosil yakıtlar ve kullanım alanları

Fosil Yakıt	Temel Özellik	Başlıca Kullanım Alanları	Temel Çevresel Risk
Kömür	Yüksek karbon yoğunluğuna sahip katı fosil yakıt	Elektrik üretimi, sanayi, ısınma	Yüksek CO_2 emisyonları, hava kirliliği, madencilik etkileri
Petrol	Yüksek enerji yoğunluğuna sahip sıvı yakıt	Ulaşım, petrokimya, sanayi	Sızıntılar, hava kirliliği, sera gazı emisyonları
Doğal gaz	Metanın baskın olduğu gaz yakıt	Elektrik üretimi, ısınma, sanayi	CO_2 emisyonları ve metan sızıntısı

Tablo 3.1, kömür, petrol ve doğal gazın başlıca özelliklerini, yaygın kullanım alanlarını ve temel çevresel risklerini özetlemektedir. Tablo, fosil yakıtların fiziksel biçimleri ve kullanım alanları bakımından farklılaştığını; ancak sera gazı emisyonları, kirlilik ve çıkarma süreçlerine bağlı etkiler gibi önemli çevresel kaygıları paylaştıklarını göstermektedir.

3.2. Nükleer Enerji

Nükleer enerji, atom çekirdeğinde depolanan enerjinin kontrollü nükleer fisyon yoluyla açığa çıkarılması ve elektrik üretiminde kullanılmasıdır (Rabilloud, 2013). Nükleer santrallerde genellikle uranyum yakıt olarak kullanılır. Uranyum sınırlı bir mineral olduğu için nükleer enerji yenilenebilir enerji kaynağı olarak kabul edilmez (DOE and AAAS, 2017; IAEA, 2024). Nükleer enerji, elektrik üretimi sırasında doğrudan fosil yakıt yakmadığı için düşük karbondioksit emisyonlarına sahip olabilir. Bu nedenle bazı ülkeler nükleer enerjiyi düşük karbonlu elektrik üretimi ve arz güvenliği açısından değerlendirmektedir. Güneş ve rüzgâr gibi değişken kaynakların aksine nükleer santraller yönlendirilebilir ve sürekli elektrik üretimi sağlayabilir (IAEA, 2024; IEA, 2022).

Bununla birlikte nükleer enerjinin radyoaktif atık yönetimi, yüksek yatırım maliyeti, uzun inşaat süresi ve karmaşık güvenlik düzenlemeleri gibi sınırlılıkları vardır (Tablo 3.2). Kullanılmış nükleer yakıtın uzun vadeli güvenli depolanması teknik, ekonomik ve toplumsal açılardan dikkatli planlama gerektirir (IAEA, 2024; IEA, 2022).

Nükleer enerji projelerinde güvenlik ve risk algısı da belirleyicidir. Modern santraller gelişmiş güvenlik sistemlerine sahip olsa da geçmişte yaşanan büyük kazalar toplumsal kaygıları artırmıştır. Bu nedenle projeler yalnızca mühendislik açısından değil; risk yönetimi, acil durum planlaması, şeffaf iletişim ve toplumsal kabul açısından da değerlendirilmelidir (IAEA, 2024; Sovacool and Dworkin, 2015).

Bu nedenlerle nükleer enerjiyi sürdürülebilirlik açısından değerlendirmek dengeli bir yaklaşım gerektirir. Düşük karbonlu elektrik üretimi ve arz güvenliği gibi avantajlar; radyoaktif atık, maliyet, proje süresi, güvenlik ve toplumsal kabulle birlikte ele alınmalıdır (Tablo 3.2) (IAEA, 2024; IEA, 2022).

Tablo 3.2. Nükleer enerjinin avantajları ve sınırlılıkları

Boyut	Avantaj	Sınırlılık
Karbon emisyonları	Doğrudan CO_2 emisyonları düşüktür.	Yakıt madenciliği, inşaat ve atık yönetimi yaşam döngüsü etkileri yaratır.
Elektrik üretimi	Sürekli ve kontrol edilebilir elektrik üretimi sağlar.	İnşaat süreleri uzun ve yatırım maliyetleri yüksektir.
Enerji güvenliği	Yakıt stoklamayı ve kaynak çeşitlendirmesini destekleyebilir.	Uranyum sınırlıdır ve dışa bağımlılık yaratabilir.
Atık yönetimi	Atık hacmi bazı kaynaklara göre daha düşük olabilir.	Radyoaktif atıklar uzun süreli güvenli depolama gerektirir.
Toplumsal kabul	Düşük karbonlu enerji tartışmalarına dâhil edilebilir.	Kaza, güvenlik ve atık endişeleri toplumsal muhalefet yaratabilir.

3.3. Yenilenemeyen Enerji Kaynaklarının Çevresel Etkileri

Yenilenemeyen enerji kaynaklarının çevresel etkileri kaynak türüne, teknolojiye, üretim yöntemine, emisyon kontrol sistemlerine ve yerel koşullara göre değişir. Bu etkiler yaşam döngüsü yaklaşımıyla, yani kaynağın çıkarılmasından taşınmasına, dönüştürülmesine, tüketimine ve atık yönetimine kadar tüm aşamalar dikkate alınarak değerlendirilmelidir. Fosil yakıtlar açısından en temel etki, karbondioksit ve metan gibi sera gazlarının iklim değişikliğine katkısıdır (EPA, 2025; IPCC, 2023).

Hava kirliliği bir diğer önemli etkidir (Sharma et al., 2013). Fosil yakıtların yakılması sırasında partikül madde, kükürt dioksit ve azot oksitler gibi kirleticiler açığa çıkabilir. Bu kirleticiler solunum yolu hastalıkları, kalp-damar hastalıkları, asit yağmurları ve ekosistem bozulması gibi sorunlara yol açabilir (EPA, 2025).

Su ve toprak kirliliği de önemli sonuçlar arasındadır (Ivanova et al., 2022; Masood et al., 2020). Petrol sızıntıları deniz ekosistemlerine zarar verebilir; kömür madenciliği ve atık depolama süreçleri toprak yapısını bozabilir. Petrol ve doğal gaz çıkarımı su kaynakları üzerinde baskı oluşturabilirken, nükleer enerji üretiminde radyoaktif atıkların güvenli yönetimi kritik öneme sahiptir (EPA, 2025; IAEA, 2024).

Yenilenemeyen enerji kaynaklarının çevresel etkileri yerel toplulukları da etkileyebilir. Madencilik bölgelerinde arazi kaybı, sağlık riskleri, iş güvenliği sorunları ve ekonomik bağımlılık ortaya çıkabilir. Petrol ve doğal gaz altyapıları kıyı alanlarını, deniz ekosistemlerini ve yerel geçim kaynaklarını etkileyebilir. Nükleer santrallerde risk algısı, atık depolama ve acil durum planlaması toplumsal tartışmalar yaratabilir (ILO, 2016; Sovacool and Dworkin, 2015).

Şekil 3.1. Yenilenemeyen enerji kaynaklarının çevresel etki zinciri

Şekil 3.1, yenilenemeyen enerji kaynaklarının çevresel etkilerinin yalnızca enerji üretim aşamasında ortaya çıkmadığını göstermektedir. Kaynak çıkarımı, taşıma, dönüşüm, tüketim ve atık yönetimi dahil tüm aşamalar

çevresel sonuçlar doğurabilir; bu nedenle değerlendirme yaşam döngüsü yaklaşımıyla yapılmalıdır (Tablo 3.3).

Tablo 3.3. Yenilenemeyen enerji kaynaklarının başlıca çevresel etkileri

Etki Alanı	Fosil Yakıtlarla İlişkisi	Nükleer Enerjiyle İlişkisi
İklim değişikliği	CO_2 ve metan emisyonları iklim değişikliğine katkıda bulunur.	Elektrik üretimi sırasında doğrudan CO_2 emisyonları düşüktür.
Hava kirliliği	Partikül madde, SO_2 ve NOx emisyonları ortaya çıkabilir.	Normal işletme sırasında hava kirletici emisyonları düşüktür.
Su kullanımı ve kirliliği	Madencilik, sondaj, rafineri ve termik santral süreçleri su kaynaklarını etkileyebilir.	Soğutma suyu ihtiyacı ve radyoaktif atık yönetimi önemlidir.
Toprak ve arazi etkileri	Madencilik, boru hatları ve altyapı arazi kullanımını etkileyebilir.	Santral sahaları, atık depolama ve güvenlik bölgeleri planlama gerektirir.
Atık yönetimi	Kül, madencilik atığı, petrol çamuru ve rafineri atıkları oluşabilir.	Radyoaktif atıkların uzun süre güvenli biçimde depolanması gerekir.
Toplumsal etki	Sağlık, yerel ekonomi, istihdam ve yerinden edilme etkileri ortaya çıkabilir.	Risk algısı, acil durum planlaması ve toplumsal kabul önemlidir.

3.4. Karbon Yakalama, Metan Azaltımı ve Geçiş Teknolojileri

Fosil yakıta dayalı sistemlerden uzaklaşma uzun ve karmaşık bir süreçtir. Bazı ülkelerde elektrik üretimi, sanayi, ısınma ve ulaşım hâlâ büyük ölçüde fosil yakıtlara bağlıdır. Bu nedenle enerji dönüşümü sırasında emisyonları azaltmayı amaçlayan geçiş teknolojileri ve yönetim araçları tartışılmaktadır (IEA, 2024).

Karbon yakalama, kullanma ve depolama teknolojileri; fosil yakıtların yakılması veya endüstriyel süreçler sırasında ortaya çıkan karbondioksitin atmosfere salınmadan önce yakalanmasını, yer altında depolanmasını veya bazı endüstriyel süreçlerde kullanılmasını amaçlar. Bu teknolojiler özellikle çimento, demir-çelik ve kimya gibi doğrudan elektriklendirilmesi zor sektörlerde tartışılmaktadır. Ancak yüksek maliyet, enerji gereksinimi, depolama güvenliği ve uzun vadeli izleme ihtiyaçları nedeniyle karbon yakalama teknolojileri tek başına bir çözüm olarak görülmemelidir (IEA, 2020; IEA, 2024b). Kısa vadeli iklim etkilerini sınırlamak için metan emisyonlarının azaltılması da önemlidir. Doğal gaz sistemlerinde kaçakların tespit edilmesi, boru hatlarının iyileştirilmesi, petrol ve gaz üretiminde metan salımının sınırlandırılması ve atık sahalarında metanın yönetilmesi bu alandaki başlıca uygulamalardır. Metan kısa vadede güçlü bir sera etkisine sahip olduğu için kaçakların azaltılması iklim politikaları açısından önemlidir (EPA, 2025; IEA, 2024a).

Geçiş teknolojileri enerji dönüşümüne katkı sağlayabilir; ancak fosil yakıt bağımlılığını kalıcı hâle getirecek biçimde kullanılırlarsa sürdürülebilirlik riskleri yaratırlar. Bu nedenle enerji verimliliği, yenilenebilir

enerji yatırımları, elektrifikasyon, depolama, şebeke esnekliği ve sürdürülebilir tüketim birlikte planlanmalıdır (IEA, 2024; ILO, 2016; IRENA, 2024).

Tablo 3.4, fosil yakıtlara bağlı emisyonları azaltmaya yönelik seçilmiş yaklaşımları özetlemektedir. Bu yaklaşımlar enerji dönüşümünü destekleyebilir; ancak uzun vadeli karbonsuzlaşma hedefleri, yenilenebilir enerji yatırımları, enerji verimliliği, elektrifikasyon ve adil geçiş politikalarıyla birlikte değerlendirilmelidir.

Tablo 3.4. Fosil yakıtlara bağlı emisyonları azaltmaya yönelik seçilmiş yaklaşımlar

Yaklaşım	Amaç	Dikkat Edilmesi Gereken Nokta
Enerji verimliliği	Aynı işi daha az enerjiyle yapmak	En etkili ve düşük maliyetli azaltım yollarından biridir.
Yakıt değişimi	Kömürden daha düşük emisyonlu kaynaklara geçmek	Geçici bir çözüm olabilir; uzun vadede düşük karbonlu kaynaklara geçiş gereklidir.
Metan sızıntılarını azaltma	Doğal gaz sistemlerindeki sızıntıları azaltmak	Ölçüm, izleme ve bakım kapasitesi gerektirir.
Karbon yakalama ve depolama	CO_2 emisyonlarını yakalayıp depolamak	Yüksek maliyet, enerji ihtiyacı ve depolama güvenliği önemlidir.
Yenilenebilir enerjiye geçiş	Fosil yakıt kullanımını azaltmak	Şebeke, depolama ve planlama gereksinimleri ele alınmalıdır.
Elektrifikasyon	Ulaşım, ısıtma ve sanayiyi elektriğe kaydırmak	Elektriğin düşük karbonlu kaynaklardan üretilmesi gerekir.

3.5. Yenilenemeyen Enerji Kullanımının Küresel ve Avrupa Ölçeklerinde Durumu

Küresel enerji sistemi uzun süre fosil yakıtlara dayalı olarak gelişmiştir. Kömür, petrol ve doğal gaz küresel enerji tüketiminde hâlâ önemli paylara sahiptir. Petrol ulaşımda, kömür ve doğal gaz elektrik üretiminde, doğal gaz ise birçok ülkede ısınma ve sanayide yaygın olarak kullanılmaktadır (Energy Institute, 2024).

Son yıllarda yenilenebilir enerji kaynaklarının payı artsa da fosil yakıtlardan çıkış her ülkede aynı hızda ilerlememektedir. Ülkelerin enerji altyapıları, ekonomik gelişmişlik düzeyleri, yerli kaynakları, ithalata bağımlılıkları, sanayi yapıları ve politika tercihleri enerji dönüşümünün hızını belirlemektedir. Bu nedenle enerji dönüşümü küresel ölçekte eşitsiz ve çok boyutlu bir süreçtir (IEA, 2024; IRENA, 2024).

Avrupa'da iklim politikaları, enerji güvenliği kaygıları ve yenilenebilir enerji yatırımları fosil yakıtlara bağımlılığı azaltma yönünde önemli adımlar yaratmıştır (Adewuyi and Awodumi, 2017). Birçok ülkede kömüre dayalı elektrik üretimini azaltma veya sonlandırma hedefleri öne çıkarken, petrol ve doğal gaz ulaşım, sanayi ve ısınmada önemini korumaktadır. Bu nedenle Avrupa için enerji dönüşümü; yenilenebilir kapasite, enerji verimliliği, bina dönüşümü, elektrikli ulaşım, depolama,

şebeke altyapısı ve adil geçiş politikalarının birlikte uygulanmasını gerektirir (IEA, 2024; IRENA, 2024; ILO, 2016).

3.6. Seçilmiş Ülke Örneklerinde Yenilenemeyen Enerji Kullanımı

Türkiye, Yunanistan, Portekiz ve Kuzey Makedonya yenilenemeyen enerji kaynakları açısından farklı başlangıç noktalarına sahiptir. Fosil yakıtların rolü, ithalata bağımlılık, kömürden çıkış politikaları, yenilenebilir enerji potansiyeli ve nükleer enerjiye yaklaşımlar ülkeden ülkeye değişmektedir (IEA, 2024; IRENA, 2024).

Türkiye'de petrol, doğal gaz ve kömür enerji tüketiminde önemli paylara sahiptir. Petrol ve doğal gazda dışa bağımlılık enerji güvenliği açısından temel sorunlardan biridir. Türkiye ayrıca yenilenebilir elektrik üretimini artırmakta ve nükleer enerji yoluyla kaynak çeşitlendirmeyi hedeflemektedir (Furuncu, 2016). Bu nedenle temel konu, fosil yakıtlara bağımlılığı azaltırken, yenilenebilir kapasiteyi artırırken ve enerji verimliliğini güçlendirirken enerji güvenliğini sağlamaktır (Energy Institute, 2024; IEA, 2024; IRENA, 2024).

Yunanistan tarihsel olarak özellikle linyite dayalı elektrik üretimiyle öne çıkmıştır. Son yıllarda kömüre dayalı elektrik üretimini azaltma ve yenilenebilir kaynakları artırma politikaları geliştirmiştir (Panagopoulou, 2023). Adaların enerji dönüşümü, doğal gaz altyapısı, yenilenebilir yatırımlar ve elektrik bağlantıları önemli konulardır. Linyitten çıkış sürecinde yerel ekonomiler ve istihdam açısından adil geçiş politikaları da önem taşımaktadır (Energy Institute, 2024; IEA, 2024; ILO, 2016).

Portekiz kömüre dayalı elektrik üretimini sonlandıran ülkelerden biridir. Bununla birlikte petrol ve doğal gaz ulaşım, sanayi ve enerji sistemi açısından önemini korumaktadır. Rüzgâr, güneş, hidroelektrik, depolama ve şebeke esnekliği yatırımları enerji dönüşümünde öne çıkmaktadır (Seminario-Córdova and Rojas-Ortega, 2023). Bu örnek, kömürden çıkışın önemli bir adım olduğunu; ancak fosil yakıt bağımlılığını azaltmak için daha geniş politikalar gerektiğini göstermektedir (Energy Institute, 2024; IRENA, 2024).

Kuzey Makedonya'da kömür, petrol ve doğal gaz enerji karmasında önemli bir yer tutmaktadır. Kömürden çıkış ve yenilenebilir enerjiye geçiş ülke için önemli politika alanlarıdır. Eski kömür sahalarının güneş enerjisi projeleri için kullanılması, enerji altyapısının modernleştirilmesi ve yenilenebilir elektrik üretiminin artırılması fırsatlar sağlayabilir. Ancak bu dönüşüm finansman, altyapı, enerji güvenliği ve toplumsal etkiler açısından dikkatli planlanmalıdır (Energy Institute, 2024; IEA, 2024; ILO, 2016).

Tablo 3.5. Seçilmiş ülke örneklerinde yenilenemeyen enerji kullanımının genel karşılaştırması

Ülke	Yenilenemeyen Enerjiye İlişkin Genel Durum	Enerji Dönüşümü Açısından Temel Nokta
Türkiye	Petrol, doğal gaz ve kömür önemli paylara sahiptir; petrol ve doğal gazda ithalat bağımlılığı yüksektir.	Yenilenebilir elektrik üretimi artmakta ve nükleer enerjiyle kaynak çeşitlendirmesi hedeflenmektedir.
Yunanistan	Eskiden linyite bağımlıydı; petrol ve doğal gaz önemini korumaktadır.	Kömürlü elektrik üretimini kademeli azaltma ve yenilenebilir enerji kapasitesini artırma hedefi öne çıkmaktadır.
Portekiz	Kömürden çıkış tamamlanmıştır; petrol ve doğal gaz kullanımı devam etmektedir.	Rüzgâr, güneş, hidroelektrik ve depolama yatırımları enerji dönüşümünde önemlidir.
Kuzey Makedonya	Kömür, petrol ve doğal gaz enerji karmasında önemli yer tutmaktadır.	Kömürden çıkış ve yenilenebilir enerji yatırımları enerji dönüşümünün temel alanlarıdır.

Tablo 3.5, seçilmiş ülke örneklerinde yenilenemeyen enerji kaynaklarının rolünün farklılaştığını göstermektedir. Türkiye petrol ve doğal gazda güçlü bir ithalat bağımlılığıyla karşı karşıyayken, Yunanistan ve Kuzey Makedonya kömürden çıkış süreçleriyle yakından ilişkilidir; Portekiz ise kömürden çıkışı tamamlamış ancak petrol ve doğal gaz bağımlılığını yönetmeye devam eden bir örnek sunmaktadır. Bu örnekler, yenilenemeyen kaynaklardan uzaklaşmanın ulusal enerji güvenliği, altyapı, ekonomik koşullar ve toplumsal etkilerle ilişkili olarak değerlendirilmesi gerektiğini göstermektedir.

3.7. Enerji Okuryazarlığı Açısından Değerlendirme

Yenilenemeyen enerji kaynakları enerji okuryazarlığı açısından güçlü bir öğrenme alanı sunar. Fosil yakıtlar ve nükleer enerji; iklim değişikliği, hava kirliliği, enerji güvenliği, ekonomik maliyet, yerel etkiler, atık yönetimi ve toplumsal karar verme gibi pek çok boyutla ilişkilidir. Bu nedenle bu kaynakları değerlendirmek öğrencilerin enerji sistemlerini daha bütüncül biçimde anlamalarına yardımcı olabilir (DEO and AAAS, 2017; DeWaters and Powers, 2011).

Fosil yakıtların azaltılması, nükleer enerjinin rolü, ithalata bağımlılık, kömürden çıkış, karbon yakalama teknolojileri ve doğal gazın geçiş yakıtı olarak kullanılması gibi konular öğrenciler için sosyobilimsel tartışma alanları oluşturabilir (Sadler, 2004; Zeidler, 2014).

Bu tartışmaların etkili olabilmesi için öğrencilerin farklı kanıtları karşılaştırması, maliyetleri ve riskleri değerlendirmesi, paydaş bakış açılarını anlaması ve gerekçelendirilmiş kararlar geliştirmesi gerekir. Örneğin bir ülkenin kömürden çıkış hızı iklim hedefleri, elektrik arz güvenliği, enerji fiyatları, iş gücü, yerel ekonomi, sağlık etkileri ve yenilenebilir enerji kapasitesiyle birlikte değerlendirilmelidir (Sadler, 2004; Zeidler, 2014; ILO, 2016).

Yenilenemeyen kaynaklara ilişkin eğitim etkinlikleri, öğrencilerin enerji sistemlerinin karmaşık yapısını anlamalarına katkı sağlar. Kömür, petrol, doğal gaz, nükleer enerji ve yenilenebilir seçenekleri karşılaştıran etkinlikler, enerji konularını ezbere dayalı sınıflandırmalardan çıkarıp gerçek yaşamla ilişkili karar verme alanlarına dönüştürebilir (Kutu 3.2.) (DeWaters and Powers, 2011; Sadler, 2004).

Kutu 3.2. Sınıf içi tartışma önerisi: Enerji dönüşümünde zor kararlar

Etkinlik Aşaması	Açıklama
Amaç	Yenilenemeyen enerji kaynaklarının avantaj ve sınırlılıklarını enerji dönüşümü bağlamında değerlendirmek.
Uygulama	Öğrenciler bir ülke senaryosu üzerinden kömür, doğal gaz, petrol, nükleer enerji ve yenilenebilir enerji seçeneklerini tartışır.
Değerlendirme	Her seçenek enerji güvenliği, maliyet, çevresel etki, toplumsal kabul ve iklim hedefleri açısından puanlanır.
Tartışma	"Bir ülke fosil yakıtlardan nasıl ve hangi hızda çıkmalıdır?" sorusu sınıfta tartışılır.
Çıktı	Öğrenciler tek bir doğru çözüm aramak yerine dengeli bir enerji politikası oluşturmanın önemini kavrar.

3.8. Bölüm Özeti ve Tartışma Soruları

Bu bölüm yenilenemeyen enerji kaynaklarını Bölüm 2'de geliştirilen karar verme çerçevesiyle birlikte incelemiştir. Kömür, petrol, doğal gaz ve nükleer enerji yüksek enerji yoğunluğu, mevcut altyapıyla uyumluluk ve arz sürekliliği gibi avantajlara sahiptir; ancak çevresel, ekonomik ve toplumsal sınırlılıklar da taşırlar.

Fosil yakıtların başlıca sorunları sera gazı emisyonları, hava kirliliği, su ve toprak üzerindeki baskılar, ithalata bağımlılık ve fiyat kırılganlığıdır. Nükleer enerji düşük karbonlu elektrik üretimi açısından bazı avantajlar sunsa da radyoaktif atık, güvenlik, maliyet, uzun proje süresi ve toplumsal kabulle birlikte değerlendirilmelidir.

Karbon yakalama, metan azaltımı ve yakıt değişimi gibi geçiş yaklaşımları emisyonların sınırlandırılmasına katkı sağlayabilir; ancak sürdürülebilir bir geçiş için enerji verimliliği, yenilenebilir enerji, elektrifikasyon, depolama, şebeke esnekliği ve adil geçiş politikaları birlikte ele alınmalıdır.

Seçilmiş ülke örnekleri, fosil yakıtlardan çıkışın her ülkede aynı hızda veya aynı biçimde gerçekleşmediğini göstermektedir. Enerji okuryazarlığı açısından temel öğrenme sonucu, öğrencilerin kaynakları yalnızca teknik özellikleriyle değil; iklim etkileri, maliyetleri, enerji güvenliği sonuçları, toplumsal kabul ve yaşam döngüsü sonuçlarıyla birlikte değerlendirebilmesidir.

Tartışma Soruları

1. Yenilenemeyen enerji kaynakları neden uzun süre küresel enerji sisteminin temelini oluşturmuştur?
2. Kömür, petrol ve doğal gazın çevresel etkileri hangi açılardan farklılaşır?
3. Kömür iklim değişikliği açısından neden en sorunlu fosil yakıtlardan biri olarak kabul edilir?
4. Doğal gaz bazı durumlarda neden geçiş yakıtı olarak görülmektedir? Bu yaklaşımın sınırlılıkları nelerdir?
5. Metan kaçakları doğal gazın iklim etkisini nasıl değiştirebilir?
6. Nükleer enerji neden yenilenebilir enerji kaynağı olarak kabul edilmez?
7. Nükleer enerjinin düşük karbonlu elektrik üretimi açısından avantajları ve atık yönetimi açısından sınırlılıkları nelerdir?
8. Fosil yakıtlara bağımlılığı azaltmak enerji güvenliği açısından neden önemlidir?
9. Karbon yakalama teknolojileri fosil yakıt sorununu tamamen çözebilir mi? Neden?
10. Türkiye, Yunanistan, Portekiz ve Kuzey Makedonya'nın enerji dönüşümü öncelikleri hangi açılardan farklılaşmaktadır?
11. Kömürden çıkış sürecinde adil geçiş politikaları neden önemlidir?
12. Yenilenemeyen enerji kaynakları neden sosyobilimsel tartışma konusu olarak değerlendirilebilir?

BÖLÜM 4: YENİLENEBİLİR ENERJİ KAYNAKLARI VE ÇEVRESEL ETKİLERİ

Yenilenebilir enerji kaynakları, doğal süreçlerle sürekli olarak yenilenen ya da insan yaşamı açısından görece kısa sürelerde yeniden oluşabilen enerji kaynaklarıdır. Güneş, rüzgâr, hidroelektrik, jeotermal, biyokütle ve deniz-okyanus enerjisi bu grupta yer alır (Neha and Rambeer, 2021). Bu kaynaklar, fosil yakıtlara kıyasla genellikle daha düşük sera gazı emisyonlarına sahip olmaları ve enerji arzının çeşitlendirilmesine katkı sağlamaları nedeniyle sürdürülebilir enerji sistemlerinin temel bileşenleri arasında kabul edilmektedir (Ember, 2024; IRENA, 2024).

Yenilenebilir enerjiye geçiş yalnızca çevresel bir tercih değildir. Bu geçiş aynı zamanda enerji güvenliğini güçlendirmek, enerji ithalatına bağımlılığı azaltmak, yerel kaynakları kullanmak, yeni teknolojiler geliştirmek, ekonomik fırsatlar yaratmak ve iklim değişikliğiyle mücadele etmek açısından da önemlidir. Fosil yakıta dayalı enerji sistemleri sera gazı emisyonları, hava kirliliği, dışa bağımlılık ve kaynak sınırlılığı gibi sorunlara yol açarken, yenilenebilir enerji kaynakları daha düşük karbonlu ve daha dayanıklı enerji sistemleri için önemli seçenekler sunar (IEA, 2024; IRENA, 2024).

Bununla birlikte yenilenebilir enerji kaynakları tamamen etkisiz ya da sorunsuz değildir. Güneş panelleri ve rüzgâr türbinleri için malzeme üretimi, hidroelektrik santrallerin nehir ekosistemleri üzerindeki etkileri, biyokütlenin arazi kullanımıyla ilişkisi, jeotermal kaynakların yerel çevresel etkileri ve yenilenebilir enerji tesislerinin yer seçimi gibi konular dikkatle değerlendirilmelidir (IEA, 2024a; NREL, 2021). Bu nedenle yenilenebilir enerji projeleri yalnızca "temiz enerji üretimi" meselesi olarak ele alınmamalı; çevresel etki, yaşam döngüsü, sistem maliyeti, süreklilik, enerji güvenliği, toplumsal kabul ve adil geçiş gibi ölçütler açısından da değerlendirilmelidir (Sovacool and Dworkin, 2015; Wüstenhagen et al., 2007).

Bu bölümde yenilenebilir enerji kullanımının küresel gelişimi, Avrupa'daki durum, yenilenebilir enerjiye geçişin temel nedenleri, çevresel yararlar, sınırlılıklar, şebeke entegrasyonu, depolama gereksinimleri, toplumsal kabul ve enerji okuryazarlığı açısından yenilenebilir enerjinin önemi ele alınmaktadır. Belirli yenilenebilir enerji türleri sonraki bölümlerde ayrı ayrı incelenmektedir. Bu bölümün amacı, 2. Bölüm'de geliştirilen karar verme çerçevesini yenilenebilir enerji dönüşümüne uygulamak ve yenilenebilir enerjiyi yalnızca enerji kaynaklarının değişimi olarak değil; esnek, verimli, çevresel olarak planlanmış ve toplumsal olarak kabul gören bir enerji sistemine doğru dönüşüm olarak değerlendirmektir (Kutu 4.1).

Kutu 4.1. Bu bölümde neler öğrenilecek?

Öğrenme Hedefi
Yenilenebilir kaynakların düşük karbonlu ve sürdürülebilir enerji sistemlerindeki rolünü değerlendirmek.
Yenilenebilir enerji kullanımındaki büyüme eğilimlerini, politika hedeflerini ve bölgesel farklılıkları açıklamak.
Yenilenebilir enerjiye geçişin çevresel, ekonomik ve toplumsal nedenlerini tartışmak.
Yenilenebilir kaynakların çevresel yararlarını ve arazi kullanımı, ekosistem etkileri, malzeme gereksinimleri ve atık yönetimi gibi sınırlılıklarını karşılaştırmak.
Depolama, akıllı şebekeler, kaynak çeşitliliği ve enerji verimliliğinin yenilenebilir enerji sistemlerindeki önemini açıklamak.
Yenilenebilir enerji dönüşümünü toplumsal kabul, adil geçiş ve enerji okuryazarlığı açısından yorumlamak.

4.1. Küresel Yenilenebilir Enerji Kullanımı

Küresel enerji sistemi uzun bir süre kömür, petrol ve doğal gaz gibi fosil yakıtlara dayalı olarak gelişmiştir. Ancak son yıllarda yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımı hızla artmıştır (Reuters, 2023). Özellikle güneş ve rüzgâr enerjisi; teknolojik gelişmeler, maliyet düşüşleri, iklim politikaları ve enerji güvenliği kaygıları nedeniyle küresel ölçekte daha fazla önem kazanmıştır (Ember, 2024; IRENA, 2024).

Elektrik üretimi, yenilenebilir enerji dönüşümünün en hızlı ilerlediği alanlardan biridir. 2023 yılında yenilenebilir enerji kaynakları küresel elektrik üretiminin yaklaşık %30'unu karşılamıştır (Ember, 2024). Bu artış özellikle güneş ve rüzgâr enerjisindeki hızlı büyümeden kaynaklanmıştır. Hidroelektrik enerji en yaygın kullanılan yenilenebilir elektrik kaynaklarından biri olmaya devam etmektedir; ancak güneş ve rüzgâr son dönemde çok daha hızlı büyüyen teknolojiler olarak öne çıkmıştır (IRENA, 2025).

Yenilenebilir enerji kapasitesindeki artış 2024 yılında da devam etmiştir. Küresel yenilenebilir enerji kapasitesi 2024 yılında 585 GW artmış ve bu artışın büyük bölümü güneş ve rüzgâr enerjisinden kaynaklanmıştır (IRENA, 2025). Bu durum enerji dönüşümünün hızlandığını göstermektedir. Bununla birlikte fosil yakıtların küresel enerji sistemi içindeki payı hâlâ yüksektir. Bu nedenle yenilenebilir enerji yatırımları genişletilmeli, enerji verimliliği artırılmalı, şebeke altyapısı güçlendirilmeli ve enerji depolama sistemleri daha yaygın biçimde devreye alınmalıdır (IEA, 2024a, 2024b; IRENA, 2024).

Yenilenebilir enerji dönüşümünün küresel ölçekte başarılı olabilmesi için yalnızca yeni güneş, rüzgâr veya hidroelektrik santralleri kurmak yeterli değildir. Elektrik şebekeleri güçlendirilmeli, enerji depolama teknolojileri geliştirilmeli, talep yönetimi uygulamaları yaygınlaştırılmalı ve enerji piyasaları değişken yenilenebilir üretime uyum sağlayacak biçimde yeniden tasarlanmalıdır. Enerji dönüşümü, üretimden tüketime kadar bütün enerji sisteminin yeniden planlanmasını gerektiren çok boyutlu bir süreçtir (IEA, 2024a, 2024b; IRENA, 2024).

Küresel yenilenebilir enerji kullanımındaki temel eğilimler Tablo 4.1'de özetlenmektedir. Bu tablo elektrik üretimi, güneş ve rüzgâr enerjisi, hidroelektrik, biyokütle ve şebeke ile depolama sistemlerinin artan önemine ilişkin gelişmeleri kapsamaktadır.

Tablo 4.1. Küresel ölçekte yenilenebilir enerji kullanımına genel bakış

Alan	Genel Eğilim	Açıklama
Elektrik üretimi	Yenilenebilir kaynakların payı artmaktadır.	2023 yılında yenilenebilir enerji kaynakları küresel elektriğin yaklaşık %30'unu üretmiştir.
Güneş enerjisi	En hızlı büyüyen kaynaklar arasındadır.	Panel maliyetlerindeki düşüş ve yaygın kurulum olanakları büyümeyi hızlandırmaktadır.
Rüzgâr enerjisi	Karasal ve deniz üstü uygulamalarla yaygınlaşmaktadır.	Uygun rüzgâr potansiyeline sahip bölgelerde önemli bir elektrik kaynağıdır.
Hidroelektrik	Köklü ve büyük bir yenilenebilir kaynaktır.	Elektrik üretiminde önemli paya sahiptir; ancak ekosistem etkileri dikkatle yönetilmelidir.
Biyokütle	Isı, elektrik ve yakıt üretiminde kullanılabilir.	Sürdürülebilir hammadde yönetimi kritik öneme sahiptir.
Şebeke ve depolama	Yenilenebilir enerjinin yaygınlaşması için gereklidir.	Değişken güneş ve rüzgâr üretimi esnek enerji sistemleri gerektirir.

Şekil 4.1, enerji dönüşümünün yalnızca enerji kaynaklarının değiştirilmesi meselesi olmadığını göstermektedir. Yenilenebilir enerji sistemlerinin güvenilir biçimde çalışabilmesi için üretim, depolama, iletim, tüketim ve verimlilik birlikte planlanmalıdır.

Şekil 4.1. Fosil yakıt ağırlıklı bir enerji sisteminden yenilenebilir enerjiye geçişte temel aşamalar

4.2. Avrupa'da Yenilenebilir Enerji Kullanımı

Avrupa, yenilenebilir enerji politikalarının güçlü biçimde uygulandığı bölgelerden biridir. Avrupa Birliği, iklim değişikliğiyle mücadele, enerji güvenliğini artırma ve fosil yakıtlara bağımlılığı azaltma hedefleri doğrultusunda yenilenebilir enerji yatırımlarını desteklemektedir (European Commission, 2023; Eurostat, 2024). Avrupa Yeşil Mutabakatı, 2030 iklim ve enerji hedefleri, enerji verimliliği politikaları ve fosil yakıt ithalatını azaltmaya yönelik çabalar bu dönüşümün önemli bileşenleridir.

Eurostat verilerine göre, 2023 yılında yenilenebilir enerji kaynakları Avrupa Birliği'nde brüt nihai enerji tüketiminin %24,5'ini oluşturmuştur (Eurostat, 2024). Bu pay önceki yıllara göre artmıştır; ancak 2030 hedeflerine ulaşabilmek için yenilenebilir enerji yatırımlarının ve enerji verimliliği politikalarının daha da hızlandırılması gerekmektedir (European Commission, 2023).

Avrupa'da yenilenebilir enerji kullanımı ülkeden ülkeye değişmektedir. Kuzey Avrupa ülkelerinde rüzgâr ve hidroelektrik daha fazla öne çıkarken, Güney Avrupa ülkelerinde güneş enerjisi önemli bir potansiyele sahiptir. Jeotermal enerji, jeotermal kaynaklara sahip bölgelerde kullanılabilir; biyokütle enerjisi ise uygun biyokütle kaynaklarına sahip kırsal alanlarda geliştirilebilir. Bu nedenle Avrupa'da yenilenebilir enerji dönüşümü tek tip bir süreç değildir; her ülke coğrafi koşulları, enerji altyapısı, ekonomik yapısı ve politika tercihleri bakımından farklılaşmaktadır (European Commission, 2023; Eurostat, 2024).

Tablo 4.2. Avrupa'da yenilenebilir enerji kullanımını etkileyen temel faktörler

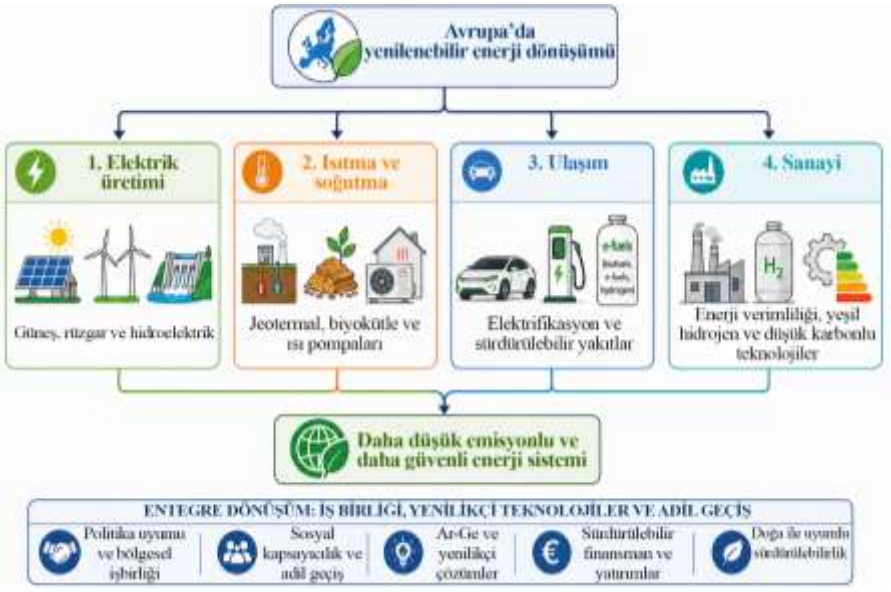
Faktör	Etki	Örnek
İklim politikaları	Yenilenebilir enerji yatırımlarını teşvik eder.	Avrupa Yeşil Mutabakatı ve 2030 enerji hedefleri
Coğrafi koşullar	Hangi kaynağın daha uygun olduğunu belirler.	Güney Avrupa'da güneş potansiyeli ve Kuzey Avrupa'da rüzgâr potansiyeli
Enerji güvenliği	Yerli kaynakların kullanımını önemli hâle getirir.	Fosil yakıt ithalatını azaltma hedefi
Teknolojik kapasite	Yenilenebilir enerji entegrasyonunu kolaylaştırır.	Akıllı şebekeler, batarya depolama ve ara bağlantılar
Toplumsal kabul	Projelerin uygulanabilirliğini etkiler.	Rüzgâr türbinleri, güneş santralleri ve yerel katılım süreçleri
Finansman	Yatırımların hızını belirler.	Kamu desteği, özel sektör yatırımları ve AB fonları

Güneş ve rüzgâr enerjisi Avrupa'nın enerji dönüşümünde giderek daha merkezi hâle gelmektedir. Ancak bu kaynaklar hava koşullarına bağlı olarak değişken elektrik ürettiğinden, elektrik şebekelerinin daha esnek hâle gelmesi gerekmektedir. Enerji depolama sistemleri, birbirine bağlı şebekeler, talep tarafı yönetimi ve akıllı şebekeler bu dönüşümün önemli bileşenleridir (IEA, 2024b). Avrupa'da yenilenebilir enerji kullanımını etkileyen temel

faktörler Tablo 4.2'de; iklim politikaları, coğrafi koşullar, enerji güvenliği, teknolojik kapasite, toplumsal kabul ve finansman başlıklarıyla özetlenmektedir.

Avrupa'da yenilenebilir enerjiye geçiş yalnızca elektrik üretiminde değil; ulaşım, ısıtma-soğutma, sanayi ve tarım gibi sektörlerde de dönüşüm gerektirmektedir. Elektrifikasyon, yeşil hidrojen, ısı pompaları, enerji verimli binalar ve sürdürülebilir ulaşım çözümleri bu sürecin tamamlayıcı bileşenleridir (IEA, 2024b; IRENA, 2024).

Şekil 4.2, yenilenebilir enerji dönüşümünün elektrik üretimiyle sınırlı olmadığını göstermektedir. Avrupa'nın uzun vadeli enerji dönüşümü elektrik, ulaşım, sanayi, binalar ve tarım gibi sektörlerin birlikte dönüşmesini gerektirir (European Commission, 2023; IEA, 2024b).



Şekil 4.2. Avrupa'da yenilenebilir enerji dönüşümünün sektörel boyutları

4.3. Yenilenebilir Enerjiye Geçişin Temel Nedenleri

Yenilenebilir enerjiye geçişin arkasında birden fazla neden bulunmaktadır. Bunlardan ilki iklim değişikliğiyle mücadele gereksinimidir. Fosil yakıtların yakılması sonucunda ortaya çıkan sera gazı emisyonları, küresel sıcaklık artışının en önemli nedenleri arasındadır. Yenilenebilir enerji kaynakları, fosil yakıt kullanımını azaltarak enerji sistemlerinin karbon yoğunluğunu düşürebilir (IPCC, 2023; IRENA, 2024).

İkinci önemli neden enerji güvenliğidir. Petrol, doğal gaz ve kömür gibi fosil yakıtlar birçok ülke için ithalata bağımlılık yaratmaktadır. Enerji ithalatına bağımlı ülkeler fiyat dalgalanmaları, arz kesintileri ve jeopolitik riskler karşısında daha kırılgan hâle gelebilir. Güneş, rüzgâr, hidroelektrik, jeotermal ve biyokütle gibi yerel yenilenebilir kaynakların kullanımı ülkelerin

enerji arzını çeşitlendirebilir ve dışa bağımlılığı azaltabilir (IEA, 2024c; IRENA, 2024).

Üçüncü neden ekonomik ve teknolojik dönüşümdür. Yenilenebilir enerji teknolojilerindeki maliyet düşüşleri, yeni yatırım alanları, yerli üretim olanakları ve istihdam imkânları enerji dönüşümünü hızlandırmaktadır. Özellikle güneş ve rüzgâr teknolojileri birçok bölgede rekabetçi elektrik üretimi sağlayabilir hâle gelmiştir. Ayrıca enerji depolama, akıllı şebekeler, elektrikli ulaşım ve yeşil hidrojen gibi teknolojiler yeni ekonomik alanlar yaratmaktadır (IEA, 2024b; IRENA, 2024).

Dördüncü neden çevresel ve sağlıkla ilgili yararlardır. Fosil yakıtların yakılması hava kirliliği, su kirliliği, toprak bozulması ve insan sağlığı üzerinde olumsuz etkilere yol açabilir. Doğru planlandığında yenilenebilir enerji kaynakları bu etkilerin azaltılmasına yardımcı olabilir. Özellikle kömür ve petrol kullanımının azaltılması hava kalitesinin iyileşmesine ve sağlıkla ilişkili maliyetlerin düşmesine katkı sağlayabilir (EPA, 2025; IPCC, 2023).

Beşinci neden sürdürülebilir kalkınmadır. Enerji ekonomik gelişme ve yaşam kalitesi için gereklidir; ancak enerji sistemlerinin çevresel ve toplumsal etkileri dikkate alınmadan sürdürülebilir kalkınma mümkün değildir. Yenilenebilir enerji, enerji verimliliği ve sürdürülebilir tüketim uygulamaları birlikte ele alındığında hem bugünün enerji ihtiyaçlarının karşılanmasına hem de gelecek nesillerin yaşam koşullarının korunmasına katkı sağlayabilir (IRENA, 2024). Yenilenebilir enerjiye geçişin temel nedenleri Tablo 4.3'te iklim değişikliğiyle mücadele, enerji güvenliği, ekonomik ve teknolojik dönüşüm, halk sağlığı ve sürdürülebilir kalkınma başlıklarıyla özetlenmektedir.

Tablo 4.3. Yenilenebilir enerjiye geçişin temel nedenleri

Neden	Açıklama	Beklenen Katkı
İklim değişikliğiyle mücadele	Fosil yakıtlardan kaynaklanan sera gazı emisyonlarını azaltma gereği	Daha düşük karbonlu bir enerji sistemi
Enerji güvenliği	İthal fosil yakıtlara bağımlılığı azaltmak	Yerli ve çeşitlendirilmiş enerji arzı
Ekonomik fırsatlar	Yeni teknoloji, yatırım ve istihdam alanları	Yeşil ekonomi ve yerel kalkınma
Sağlık ve çevre	Hava kirliliğini ve çevresel baskıları azaltmak	Daha temiz hava ve daha sağlıklı yaşam koşulları
Teknolojik yenilik	Depolama, akıllı şebekeler ve elektrikli ulaşımın gelişmesi	Daha esnek ve modern bir enerji sistemi
Sürdürülebilir kalkınma	Enerji ihtiyaçlarını çevresel ve toplumsal etkilerle birlikte değerlendirmek	Uzun vadeli sürdürülebilir bir enerji yapısı

Bu nedenler birlikte değerlendirildiğinde, yenilenebilir enerjiye geçiş yalnızca enerji üretim teknolojilerinin değişmesi değildir. Bu geçiş; iklim politikası, sanayi dönüşümü, kentsel planlama, eğitim, toplumsal katılım ve ekonomik kalkınma ile ilişkili çok boyutlu bir süreçtir (IEA, 2024c; IRENA, 2024).

4.4. Yenilenebilir Enerjinin Çevresel Yararları

Yenilenebilir enerji kaynaklarının en önemli çevresel yararı, fosil yakıtlara kıyasla genellikle daha düşük sera gazı emisyonlarına sahip olmalarıdır. Güneş, rüzgâr, hidroelektrik ve jeotermal enerji, elektrik üretimi sırasında fosil yakıt yakımıyla doğrudan ilişkili karbondioksit emisyonları oluşturmaz. Yaşam döngüsü açısından bakıldığında, birçok yenilenebilir elektrik teknolojisinin sera gazı emisyonları da fosil yakıtlara göre oldukça düşüktür (NREL, 2021).

Yenilenebilir enerji kaynakları hava kalitesinin iyileşmesine de katkı sağlayabilir. Kömür ve petrol gibi fosil yakıtların yakılması partikül madde, kükürt dioksit ve azot oksitler dâhil olmak üzere hava kirleticileri oluşturabilir. Bu kirleticiler insan sağlığını, ekosistemleri ve tarımsal üretimi olumsuz etkileyebilir. Yenilenebilir enerji kaynakları fosil yakıt kullanımını azalttığında hava kirliliği ve buna bağlı sağlık sorunları da azalabilir (EPA, 2025; NREL, 2021).

Yenilenebilir enerji kaynakları su ve toprak üzerindeki baskıların azalmasına da yardımcı olabilir. Özellikle güneş ve rüzgâr enerjisi, elektrik üretimi sırasında su kullanımı bakımından birçok termik santrale göre daha avantajlıdır. Bununla birlikte hidroelektrik, biyokütle ve bazı jeotermal uygulamalarda su yönetimi dikkatle planlanmalıdır. Bu durum, yenilenebilir enerji kaynaklarının çevresel yararlarının uygun planlama ve teknoloji seçimiyle güçlendirilebileceğini göstermektedir (NREL, 2021).

Yenilenebilir enerji kaynaklarının bir diğer yararı, enerji üretiminin yerelleşmesini destekleyebilmesidir. Çatı tipi güneş sistemleri, küçük ölçekli biyogaz tesisleri, yerel rüzgâr projeleri ve enerji kooperatifleri, enerji üretimini büyük merkezi santrallerden daha dağıtık yapılara doğru kaydırabilir. Bu durum hem enerji güvenliğine hem de yerel kalkınmaya katkı sağlayabilir (European Commission, 2023; IRENA, 2024).

Ancak çevresel yararlar kendiliğinden ortaya çıkmaz. Yenilenebilir enerji projeleri uygun yerlerde, uygun teknolojilerle, çevresel etki değerlendirmesi yapılarak ve yerel toplulukların görüşleri dikkate alınarak planlanmalıdır. Aksi hâlde düşük karbonlu bir teknoloji bile yerel ölçekte ekosistem, arazi kullanımı veya toplumsal kabul sorunları yaratabilir (NREL, 2021; Wüstenhagen et al., 2007).

4.5. Yenilenebilir Enerjinin Sınırlılıkları ve Planlama Gereklilikleri

Yenilenebilir enerji kaynakları iklim değişikliğiyle mücadele ve enerji güvenliğini artırma açısından önemli fırsatlar sunar. Ancak bu kaynakların her birinin kendine özgü sınırlılıkları ve planlama gereklilikleri vardır. Bu nedenle yenilenebilir enerji projeleri yalnızca kurulu güç veya elektrik üretimi açısından değerlendirilmemeli; çevresel etki, yaşam döngüsü, sistem maliyeti, süreklilik, enerji güvenliği, teknolojik uygulanabilirlik, altyapı gereksinimleri ve toplumsal kabul gibi ölçütler üzerinden de ele alınmalıdır (IEA, 2024b; IRENA, 2024; NREL, 2021; Sovacool and Dworkin, 2015).

Güneş ve rüzgâr enerjisinin temel sınırlılıklarından biri değişken üretim yapmalarıdır. Güneş enerjisi gece elektrik üretemez ve bulutluluk, mevsim ile coğrafi konumdan etkilenir. Rüzgâr enerjisi ise rüzgâr hızı ve sürekliliğine bağlıdır. Bu nedenle güneş ve rüzgâr enerjisinin yüksek paya sahip olduğu sistemlerde enerji depolama, esnek şebeke yönetimi, talep tarafı yönetimi ve farklı enerji kaynaklarının birlikte kullanımı giderek daha önemli hâle gelir (IEA, 2024b).

Arazi kullanımı bir diğer önemli konudur. Büyük ölçekli güneş ve rüzgâr projeleri arazi gerektirebilir. Bu arazilerin tarım, otlak alanları, ormanlar, turizm, kültürel miras veya doğal habitatlarla ilişkisi dikkatle değerlendirilmelidir. Çatı tipi güneş sistemleri, bozulmuş ya da enerji üretimi için uygun olmayan arazilerin kullanımı, tarımsal üretimle güneş enerjisini birleştiren agrivoltaik uygulamalar ve iyi planlanmış yer seçimi bu tür etkilerin azaltılmasına yardımcı olabilir (NREL, 2021).

Malzeme gereksinimleri ve geri dönüşüm, yenilenebilir enerji teknolojileri açısından giderek daha önemli hâle gelmektedir. Güneş panelleri, rüzgâr türbinleri, bataryalar ve elektrikli araçlar çeşitli metaller, mineraller ve endüstriyel malzemeler gerektirir. Bu malzemelerin çıkarılması, işlenmesi ve kullanım ömrü sonunda geri dönüştürülmesi sürdürülebilirlik açısından önemlidir. Bu nedenle yenilenebilir enerji dönüşümü döngüsel ekonomi ilkeleri ve sorumlu tedarik zincirleriyle birlikte düşünülmelidir (IEA, 2024a; IRENA, 2024).

Hidroelektrik enerji düşük karbonlu ve esnek elektrik üretimi sağlayabilse de nehir ekosistemleri üzerinde önemli etkilere sahip olabilir. Barajlar balık göç yollarını, tortu taşınımını, su sıcaklığını, yerel habitatları ve akış rejimlerini değiştirebilir. Bu nedenle hidroelektrik projelerde ekolojik akış, balık geçitleri, havza yönetimi ve yerel toplulukların katılımı önem taşır (NREL, 2021).

Biyokütle ve biyoyakıtlar atık yönetimi ve yerel enerji üretimi açısından fırsatlar sunabilir. Ancak sürdürülebilir hammadde yönetimi sağlanmadığında arazi kullanımı, gıda üretimiyle rekabet, su tüketimi ve emisyonlarla ilgili sorunlar ortaya çıkabilir. Bu nedenle biyokütle enerji sistemlerinde atık temelli kaynaklara öncelik verilmeli, yaşam döngüsü emisyonları değerlendirilmeli ve yerel ekosistemler korunmalıdır (IRENA, 2024; NREL, 2021).

Jeotermal enerji sürekli ve yerel enerji sağlayabilen önemli bir yenilenebilir kaynaktır. Bununla birlikte jeotermal projelerde geri basım, gaz emisyonları, mineral içeriği, su yönetimi ve yerel jeolojik etkiler dikkatle izlenmelidir. Deniz-okyanus enerjisi uzun vadeli potansiyele sahiptir; ancak teknoloji olgunluğu, maliyet, bakım zorlukları ve deniz ekosistemleri üzerindeki etkiler bakımından hâlen gelişme aşamasındadır (IRENA, 2024; NREL, 2021).

Şekil 4.3. Yenilenebilir enerji projelerinde çevresel planlama süreci

Şekil 4.3, yenilenebilir enerji yatırımlarının teknik uygulanabilirlikten daha fazlasını gerektirdiğini göstermektedir. Sürdürülebilir proje planlaması çevresel değerlendirme, toplumsal katılım, ekonomik uygulanabilirlik ve uzun dönemli işletme ve bakım süreçlerini bütünleştirmelidir (NREL, 2021; Wüstenhagen et al., 2007).

Tablo 4.4, yenilenebilir enerji kaynaklarının genel olarak çevresel açıdan daha avantajlı olduğunu, ancak her kaynağın kendi bağlamı içinde değerlendirilmesi gerektiğini göstermektedir. Sürdürülebilir enerji planlaması yalnızca düşük karbonlu kaynaklara yönelmek anlamına gelmez; yer seçimi, yaşam döngüsü etkileri, kaynak verimliliği, geri dönüşüm, yerel ekosistemler ve toplumsal kabulün birlikte yönetilmesi anlamına da gelir. Bu yaklaşım, 2. Bölüm'de ele alınan karar verme çerçevesinin yenilenebilir enerji projelerine uygulanmasını sağlar (NREL, 2021; Wüstenhagen et al., 2007).

Tablo 4.4. Yenilenebilir enerji kaynaklarının çevresel avantajları ve dikkat gerektiren etkileri

Enerji Kaynağı	Başlıca Çevresel Avantaj	Dikkat Gerektiren Etki
Güneş enerjisi	Elektrik üretimi sırasında doğrudan emisyon oluşturmaz.	Panel üretimi, arazi kullanımı ve panel atıklarının geri dönüşümü önemlidir.
Rüzgâr enerjisi	Düşük karbonlu elektrik üretimi sağlar.	Kuşlar, yarasalar, görsel etki, gürültü ve yerel kabul dikkate alınmalıdır.
Hidroelektrik	Uzun ömürlü ve düşük karbonlu elektrik üretimi sağlayabilir.	Nehir ekosistemleri, balık geçitleri, akış rejimi ve yerinden edilme etkileri önemlidir.
Jeotermal enerji	Sürekli ve yerel enerji sağlayabilir.	Su kullanımı, gaz emisyonları ve yerel jeolojik etkiler izlenmelidir.
Biyokütle enerjisi	Organik atıkları enerjiye dönüştürebilir.	Arazi kullanımı, gıda üretimiyle rekabet ve sürdürülebilir hammadde yönetimi önemlidir.
Deniz-okyanus enerjisi	Dalga, gelgit ve akıntılardan enerji elde edebilir.	Deniz ekosistemleri, kıyı kullanımı ve teknoloji olgunluğu dikkate alınmalıdır.

4.6. Şebeke Entegrasyonu, Depolama ve Enerji Verimliliği

Yenilenebilir enerji kaynaklarının yaygınlaşması, elektrik sistemlerinin daha esnek, dijital, verimli ve dayanıklı hâle gelmesini

gerektirir. Güneş ve rüzgâr enerjisi hava koşullarına bağlı olarak değişken elektrik ürettiği için, bu kaynakların yüksek paylara ulaştığı sistemlerde şebeke yönetimi, depolama, talep tarafı yönetimi ve enerji verimliliği birlikte ele alınmalıdır (IEA, 2024b).

Şebeke entegrasyonu, yenilenebilir kaynaklardan üretilen elektriğin elektrik sistemine güvenli ve verimli biçimde bağlanmasını ifade eder. Güneş ve rüzgâr enerjisinin yüksek paylara sahip olduğu sistemlerde iletim hatları güçlendirilmeli, dağıtım şebekeleri modernize edilmeli ve akıllı sayaçlar, dijital izleme sistemleri ile esnek piyasa yapıları geliştirilmelidir. Aksi hâlde yenilenebilir enerji üretimi artsa bile bu enerjinin tüketicilere güvenilir biçimde ulaştırılması zorlaşabilir (IEA, 2024b).

Enerji depolama, değişken yenilenebilir üretimi dengelemek için önemli bir çözümdür. Batarya sistemleri, pompaj depolamalı hidroelektrik, ısıl depolama, hidrojen ve diğer depolama teknolojileri farklı zaman ölçeklerinde kullanılabilir. Örneğin bataryalar kısa vadeli dengeleme için uygundur; hidrojen ve bazı kimyasal depolama yöntemleri ise uzun süreli depolama için değerlendirilebilir (IEA, 2024b; IRENA, 2024).

Talep tarafı yönetimi de enerji sistemlerinin esnekliğini artırabilir. Elektrik tüketiminin en yüksek olduğu dönemlerde talebi azaltmak veya bazı tüketim türlerini yenilenebilir üretimin yüksek olduğu dönemlere kaydırmak enerji sistemini daha dengeli hâle getirebilir. Akıllı cihazlar, kullanım zamanına dayalı tarifeler, enerji yönetim sistemleri ve tüketici farkındalığı bu süreçte önemlidir (IEA, 2024a, 2024b).

Enerji verimliliği, yenilenebilir enerji dönüşümünün tamamlayıcı bir bileşenidir. Enerji talebi azaltılmadığında yalnızca yeni yenilenebilir enerji kapasitesi kurmak yeterli olmayabilir. Binalarda yalıtım, verimli ısıtma ve soğutma sistemleri, LED aydınlatma, verimli motorlar, toplu taşıma, elektrikli ulaşım ve sanayide atık ısı geri kazanımı gibi uygulamalar toplam enerji talebini azaltır ve yenilenebilir enerjiye geçişi kolaylaştırır (Chen et al., 2022; IEA, 2024; IRENA, 2024).

Tablo 4.5, yenilenebilir enerji sistemlerinde esnekliğin yalnızca depolama teknolojilerine değil; akıllı şebekelere, talep tarafı yönetimine, kaynak çeşitliliğine, ara bağlantılara ve enerji verimliliğine de bağlı olduğunu göstermektedir. Bu nedenle enerji dönüşümü yeni güneş veya rüzgâr kapasitesi kurmakla sınırlı değildir; üretim, iletim, dağıtım, depolama, tüketim kalıpları ve verimlilik politikalarının bütünleşik biçimde planlanmasını ve yeniden tasarlanmasını gerektirir (IEA, 2024a, 2024b; IRENA, 2024).

Tablo 4.5. Yenilenebilir enerji sistemlerinde esneklik sağlayan temel unsurlar

Unsur	Başlıca İşlev	Örnek
Enerji depolama	Fazla üretimi depolamak ve ihtiyaç olduğunda kullanmak	Batarya, pompaj depolamalı hidroelektrik, hidrojen
Akıllı şebekeler	Üretim ve tüketimi dijital olarak izlemek ve yönetmek	Akıllı sayaçlar ve otomasyon sistemleri
Talep tarafı yönetimi	Tüketimi uygun zamanlara kaydırmak	Kullanım zamanına dayalı tarifeler ve akıllı cihazlar
Kaynak çeşitliliği	Farklı yenilenebilir kaynakları birlikte kullanmak	Güneş, rüzgâr, hidroelektrik ve biyokütle birleşimi
Ara bağlantılar	Bölgeler arasında elektrik alışverişini güçlendirmek	Ulusal ve bölgesel şebeke bağlantıları
Enerji verimliliği	Toplam enerji ihtiyacını azaltmak	Yalıtım, verimli cihazlar ve verimli sanayi sistemleri

4.7. Toplumsal Kabul, Yerel Etkiler ve Adil Geçiş

Yenilenebilir enerji projelerinin başarılı olabilmesi için teknik uygunluk, ekonomik uygulanabilirlik ve çevresel yararlar tek başına yeterli değildir. Toplumsal kabul, yerel katılım, adil fayda paylaşımı ve güven de proje başarısının temel belirleyicileridir. Bir proje düşük karbonlu ve ekonomik olarak uygulanabilir olsa bile, yerel toplulukların kaygıları dikkate alınmadığında toplumsal muhalefetle karşılaşabilir (Sovacool and Dworkin, 2015; Wüstenhagen et al., 2007).

Toplumsal kabul yalnızca insanların bir projeyi destekleyip desteklememesiyle ilgili değildir. Karar verme süreçlerine katılım, yerel faydaların paylaşımı, çevresel kaygıların dikkate alınması ve güvenilir bilgiye erişimle de ilişkilidir. Örneğin bir rüzgâr enerjisi projesinde görsel etki, gürültü, kuş göç yolları ve arazi kullanımı tartışılabilir; bir hidroelektrik projesinde ise nehir ekosistemleri, su kullanımı ve yerel geçim kaynakları kaygı konusu olabilir. Bu konular şeffaf biçimde ele alınmadığında yenilenebilir enerji projelerine direnç artabilir (Wüstenhagen et al., 2007).

Yenilenebilir enerji projeleri bazı bölgelerde yerel ekonomik fırsatlar yaratabilir. Kurulum, bakım, işletme, yerel tedarik zincirleri ve eğitim programları yeni istihdam alanları oluşturabilir. Enerji kooperatifleri, belediye ölçekli enerji projeleri ve çatı tipi güneş sistemleri yerel katılımı artırabilir. Ancak bu yararların adil biçimde paylaşılması gerekir (IRENA, 2024; Sovacool and Dworkin, 2015).

Adil geçiş, enerji dönüşümünün çalışanlar, düşük gelirli gruplar, fosil yakıt bölgeleri ve yerel topluluklar üzerindeki etkilerini dikkate alan bir yaklaşımdır. Fosil yakıt sektörlerindeki çalışanların yeni istihdam alanlarına geçişi, enerji maliyetlerinin adil yönetimi, yerel toplulukların karar alma süreçlerine katılımı ve yenilenebilir enerji yatırımlarından toplumsal faydalar yaratılması adil geçişin önemli bileşenleridir (ILO, 2015; Sovacool and Dworkin, 2015).

Enerji okuryazarlığı, yenilenebilir enerjiye geçişte toplumsal kabulün artırılması açısından da önemlidir (Wahlund and Palm, 2022). İnsanlar enerji kaynaklarının avantajlarını, sınırlılıklarını, çevresel etkilerini ve ekonomik

sonuçlarını anladığında daha bilinçli tartışmalar yapılabilir. Bu nedenle yenilenebilir enerji eğitimi yalnızca teknik bilgi aktarmamalı; karar verme, kanıta dayalı düşünme, yerel katılım ve toplumsal sorumluluk boyutlarını da içermelidir (DeWaters et al., 2013; Ramachandran et al., 2024; Wüstenhagen et al., 2007).

Bu zorluklar yenilenebilir enerjiye geçişin imkânsız olduğu anlamına gelmez. Tam tersine, enerji dönüşümünün dikkatli planlama, güçlü altyapı, bilimsel değerlendirme ve toplumsal katılım gerektirdiğini gösterir. Yenilenebilir enerji kaynakları enerji verimliliği ve sürdürülebilir tüketim alışkanlıklarıyla birlikte ele alındığında, daha düşük karbonlu ve daha güvenli bir gelecek için güçlü bir temel sağlayabilir (IEA, 2024a, 2024b; IRENA, 2024).

Tablo 4.6, yenilenebilir enerji dönüşümünün temel fırsatlarını ve zorluklarını özetlemektedir. Yenilenebilir enerjinin emisyon azaltımı, istihdam fırsatları, yerel kaynakların kullanımı ve iklim hedeflerine katkı sağlayabileceğini; ancak arazi kullanımı, finansman, şebeke esnekliği, toplumsal kabul ve uzun vadeli politika istikrarı bakımından dikkatli planlama gerektirdiğini göstermektedir.

Tablo 4.6. Yenilenebilir enerjiye geçişte fırsatlar ve zorluklar

Boyut	Fırsat	Zorluk
Çevresel	Sera gazı emisyonlarını azaltabilir.	Arazi kullanımı ve ekosistem etkileri dikkat gerektirir.
Ekonomik	Yeni istihdam ve teknoloji alanları yaratabilir.	Başlangıç yatırımı ve finansman ihtiyacı yüksek olabilir.
Enerji güvenliği	Yerel kaynakların kullanımını artırabilir.	Değişken üretim enerji sistemi planlamasını zorlaştırabilir.
Teknolojik	Depolama, akıllı şebekeler ve verimli teknolojileri teşvik eder.	Şebeke entegrasyonu ve esneklik gerektirir.
Toplumsal	Enerji kooperatiflerini ve yerel katılımı destekleyebilir.	Yer seçimi ve görsel etkiler yerel muhalefete yol açabilir.
Politik	İklim hedefleriyle uyumludur.	Uzun dönemli ve istikrarlı politika desteği gerektirir.

4.8. Enerji Okuryazarlığı Açısından Değerlendirme

Yenilenebilir enerjiye geçiş yalnızca mühendislik, yatırım ve altyapı konusu değildir. Bu dönüşümün başarılı olabilmesi için toplumun enerji kaynaklarını, enerji dönüşümlerini, çevresel etkileri ve sürdürülebilirlik seçeneklerini anlayabilmesi gerekir. Bu noktada enerji okuryazarlığı temel bir kavramdır. Güncel literatürde enerji okuryazarlığı bilgi, tutum, davranış, karar verme, sorumlu eylem ve sürdürülebilirlik farkındalığını içeren çok boyutlu bir yeterlilik olarak ele alınmaktadır (Ayata et al., 2024; DeWaters et al., 2013; Leite et al., 2026; Ramachandran et al., 2024; Santillán and Cedano, 2023).

Yenilenebilir enerji kaynakları eğitimde güçlü öğrenme fırsatları sunar. Güneş panelleri, rüzgâr türbinleri, hidroelektrik sistemler, biyokütle uygulamaları ve hidrojen teknolojileri fen eğitimi, çevre eğitimi, teknoloji, mühendislik ve matematiğin günlük yaşamla ilişkilendirilmesine yardımcı

olabilir. Bu nedenle STEM, sorgulamaya dayalı öğrenme, oyunlaştırma ve yerel çevre sorunlarına dayalı etkinlikler yenilenebilir enerji konularının öğretiminde etkili araçlar olarak kullanılabilir (Hiğde, 2022; Mylonas et al., 2021; Vasconcelos et al., 2023).

Enerji konuları sosyobilimsel tartışmalar için de uygundur. Bir rüzgâr santralinin nereye kurulacağı, bir hidroelektrik projenin ekosistemleri nasıl etkilediği, biyokütlenin arazi kullanımıyla nasıl ilişkili olduğu, güneş enerjisi santralleri için arazinin nasıl seçileceği veya yeşil hidrojenin hangi sektörlerde kullanılacağı yalnızca teknik sorular değildir. Bu kararlar ekonomik, çevresel ve toplumsal sonuçlar içerir. Bu nedenle yenilenebilir enerji eğitimi öğrencilerin kanıtları değerlendirme, farklı görüşleri karşılaştırma ve sürdürülebilir kararlar üzerine düşünme becerilerini geliştirebilir (Sadler, 2004; Zeidler, 2014).

Enerji okuryazarlığı açısından yenilenebilir enerji eğitiminin üç temel amacı vardır. Birincisi, öğrencilerin enerji kaynaklarının çalışma ilkelerini anlamasıdır. İkincisi, bu kaynakların avantaj ve sınırlılıklarını karşılaştırabilmeleridir. Üçüncüsü ise enerji tercihlerini çevresel, ekonomik ve toplumsal sonuçlarıyla birlikte değerlendirebilmeleridir. Bu üç amaç birlikte ele alındığında öğrenciler enerji sistemlerine ilişkin daha bütüncül bir anlayış geliştirebilir (DeWaters et al., 2013; Ramachandran et al., 2024).

Tablo 4.7. Yenilenebilir enerji eğitiminde kullanılabilecek yaklaşımlar

Yaklaşım	Örnek Uygulama	Beklenen Katkı
STEM etkinlikleri	Mini güneş paneli veya rüzgâr türbini modeli tasarlama	Enerji dönüşümü, ölçme ve tasarım becerilerini destekler.
Sorgulamaya dayalı öğrenme	Okulun enerji tüketimini inceleme	Veri toplama, analiz ve çözüm üretme becerilerini geliştirir.
Oyunlaştırma	Enerji tasarrufu yarışmaları veya dijital simülasyonlar	Katılımı, motivasyonu ve davranışsal farkındalığı artırabilir.
Yerel çevre sorunu	Yakındaki bir enerji projesinin çevresel etkilerini tartışma	Bilimsel bilgiyi yerel kararlarla ilişkilendirir.
Sosyobilimsel tartışma	Bir enerji yatırımı için farklı paydaşların görüşlerini değerlendirme	Kanıta dayalı karar verme ve eleştirel düşünmeyi destekler.
Karşılaştırmalı analiz	Güneş, rüzgâr, hidroelektrik ve biyokütleyi farklı ölçütlere göre karşılaştırma	Enerji kaynaklarının çok boyutlu değerlendirilmesini sağlar.

Tablo 4.7, teknik bilgiyi sorgulama, yerel çevre sorunları, sosyobilimsel tartışma ve karşılaştırmalı analizle ilişkilendirerek yenilenebilir enerji okuryazarlığını destekleyebilecek eğitim yaklaşımlarını sunmaktadır. Yenilenebilir enerji eğitimi yalnızca teknik bilgi vermemeli; aynı zamanda

öğrencilerin sürdürülebilir bir gelecek için sorumlu karar verme becerileri geliştirmelerine yardımcı olmalıdır. Bu nedenle enerji eğitimi bilgi aktarımının ötesine geçmeli ve öğrencileri gerçek yaşam enerji sorunlarını araştırmaya, alternatif çözümleri karşılaştırmaya, çevresel ve toplumsal etkileri değerlendirmeye ve enerji kararlarında ortaya çıkan ödünleşimleri tartışmaya teşvik etmelidir (Sadler, 2004; Zeidler, 2014).

4.9. Bölüm Özeti ve Tartışma Soruları

Bu bölümde yenilenebilir enerji kaynakları ve çevresel etkileri genel bir çerçeve içinde incelenmiştir. Yenilenebilir enerji kaynakları, doğal süreçlerle sürekli yenilenen veya görece kısa sürelerde yeniden oluşan kaynaklardan elde edilir. Güneş, rüzgâr, hidroelektrik, jeotermal, biyokütle ve deniz-okyanus enerjisi bu gruba girer.

Yenilenebilir enerji kaynakları genellikle fosil yakıtlara kıyasla daha düşük sera gazı emisyonlarına sahip oldukları için iklim değişikliğiyle mücadelede önemli rol oynar. Ayrıca enerji güvenliğini artırabilir, enerji ithalatına bağımlılığı azaltabilir, yerel kaynakların kullanımını destekleyebilir ve yeni ekonomik fırsatlar yaratabilir.

Küresel ölçekte yenilenebilir enerji yatırımları özellikle güneş ve rüzgâr enerjisinde hızla artmaktadır. Elektrik üretimi, enerji dönüşümünün en hızlı ilerlediği alanlardan biridir. Ancak fosil yakıtların küresel enerji sistemi içindeki payı hâlâ yüksektir. Bu nedenle yenilenebilir enerji yatırımları enerji verimliliği, depolama, akıllı şebekeler ve sürdürülebilir tüketimle birlikte ele alınmalıdır.

Avrupa'da yenilenebilir enerji dönüşümü iklim politikaları, enerji güvenliği kaygıları, teknolojik kapasite ve finansman olanaklarıyla desteklenmektedir. Ancak bu dönüşüm yalnızca elektrik üretiminde değil; ulaşım, binalar, sanayi, tarım ve ısıtma-soğutma alanlarında da değişim gerektirmektedir.

Yenilenebilir enerji kaynaklarının çevresel yararları önemli olsa da etkileri tamamen sıfır değildir. Arazi kullanımı, ekosistem etkileri, malzeme gereksinimleri, atık yönetimi, geri dönüşüm, su kullanımı ve toplumsal kabul gibi konular dikkatle değerlendirilmelidir. Bu nedenle yenilenebilir enerji projeleri yaşam döngüsü ve çevresel planlama ilkeleriyle ele alınmalıdır.

Güneş ve rüzgâr gibi değişken kaynakların yaygınlaşması enerji depolama, akıllı şebekeler, talep tarafı yönetimi ve kaynak çeşitliliği ihtiyacını artırır. Enerji verimliliği yenilenebilir enerji dönüşümünün tamamlayıcı unsurudur. Toplam enerji talebi azaltılmadığında, yalnızca yeni üretim kapasitesi kurmak sürdürülebilir bir enerji sistemi için yeterli değildir.

Yenilenebilir enerjiye geçiş aynı zamanda toplumsal bir süreçtir. Yerel toplulukların katılımı, şeffaf bilgilendirme, adil fayda paylaşımı ve enerji okuryazarlığı toplumsal kabul açısından önemlidir. Enerji okuryazarlığı, bireylerin yenilenebilir enerji kaynaklarını yalnızca teknik özellikleriyle değil, çevresel, ekonomik ve toplumsal sonuçlarıyla birlikte değerlendirebilmesini sağlar.

Tartışma Soruları

1. Yenilenebilir enerji kaynakları neden sürdürülebilir enerji sistemlerinin temel bileşenleri arasında görülmektedir?
2. Yenilenebilir enerjiye geçiş neden yalnızca çevresel değil, aynı zamanda ekonomik ve toplumsal bir süreç olarak değerlendirilmelidir?
3. Küresel ölçekte güneş ve rüzgâr enerjisinin hızlı büyümesini sağlayan temel faktörler nelerdir?
4. Avrupa'da yenilenebilir enerji dönüşümünü hızlandıran temel faktörler nelerdir?
5. Yenilenebilir enerji kaynaklarının çevresel etkileri neden tamamen sıfır değildir?
6. Güneş ve rüzgâr enerjisinin değişken üretim yapısı enerji sistemleri açısından hangi zorlukları yaratır?
7. Enerji depolama ve akıllı şebekeler yenilenebilir enerji dönüşümünde neden önemlidir?
8. Enerji verimliliği neden yenilenebilir enerji yatırımları kadar önemlidir?
9. Adil geçiş yaklaşımı yenilenebilir enerji dönüşümünde hangi toplumsal sorunların çözümüne katkı sağlayabilir?
10. Enerji okuryazarlığı yenilenebilir enerji dönüşümünün toplumsal kabulünü nasıl etkileyebilir?
11. Bir okulda yenilenebilir enerji farkındalığını artırmak için hangi STEM veya sorgulamaya dayalı etkinlikler uygulanabilir?

BÖLÜM 5: GÜNEŞ, RÜZGÂR VE HİDROELEKTRİK ENERJİ

Bu bölüm, yenilenebilir elektrik üretiminde öne çıkan üç temel kaynağı incelemektedir: güneş, rüzgâr ve hidroelektrik enerji. Bu kaynaklar, fosil yakıtlara kıyasla daha düşük sera gazı emisyonları sağlayabilmeleri, enerji arzını çeşitlendirmeleri ve yerel enerji potansiyelinden yararlanmayı mümkün kılmaları nedeniyle önemlidir (Kutu 5.1). Bununla birlikte her kaynak; teknik gereklilikler, çevresel etkiler, maliyet yapısı, süreklilik ve toplumsal kabul koşulları bakımından farklılık gösterir (IEA, 2024; IRENA, 2024).

Önceki bölümde, yenilenebilir enerji dönüşümünün yalnızca yeni üretim kapasitesi kurmakla sınırlı olmadığı; şebekeler, depolama, enerji verimliliği, yer seçimi, yaşam döngüsü etkileri ve adil geçiş ilkeleriyle birlikte ele alınması gerektiği vurgulanmıştır. Bu bölümde güneş, rüzgâr ve hidroelektrik enerji; çalışma ilkeleri, kullanım alanları, avantajları, sınırlılıkları, çevresel etkileri ve eğitsel uygulamaları açısından ayrıntılı biçimde incelenmektedir.

Kutu 5.1. Bu bölümde neler öğrenilecek?

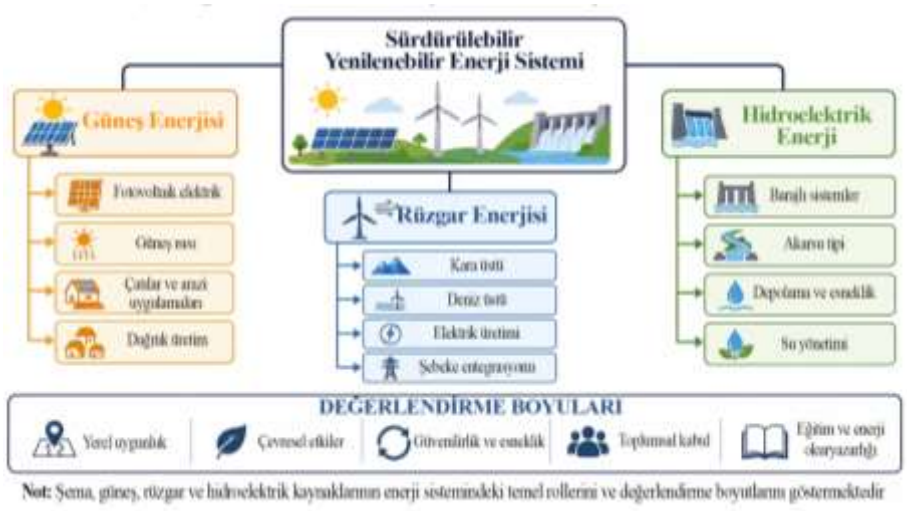
Öğrenme Hedefi
Bu kaynakların temel çalışma ilkelerini ve yenilenebilir enerji sistemlerindeki rollerini açıklamak.
Fotovoltaik, güneş termal, karasal/deniz üstü rüzgâr ve hidroelektrik sistemleri kullanım alanları ve teknik özellikleri açısından karşılaştırmak.
Güneş, rüzgâr ve hidroelektrik enerji projelerinin çevresel yararlarını ve dikkat gerektiren yaşam döngüsü etkilerini tartışmak.
Değişken üretim, depolama, şebeke entegrasyonu ve sistem esnekliğini bu üç kaynak bağlamında yorumlamak.
Enerji projelerini çevresel etki, maliyet, süreklilik, enerji güvenliği, yer seçimi ve toplumsal kabul ölçütleriyle analiz etmek.
Güneş, rüzgâr ve hidroelektrik enerjinin enerji okuryazarlığını ve sınıf içi etkinlikleri desteklemek için nasıl kullanılabileceğini açıklamak.

Tablo 5.1, bu bölümde incelenen üç yenilenebilir enerji kaynağının ortak özelliklerini ve farklılıklarını özetlemektedir. Güneş ve rüzgâr enerjisi hızla yaygınlaşan değişken üretim kaynaklarıdır. Buna karşılık hidroelektrik enerji, bazı bağlamlarda elektrik sistemlerine esneklik ve depolama desteği sağlayabilen köklü bir yenilenebilir kaynaktır.

Tablo 5.1. Güneş, rüzgâr ve hidroelektrik enerjiye genel bakış

Enerji Türü	Temel Kaynak	Başlıca Kullanım Alanı	Dikkat Gerektiren Nokta
Güneş enerjisi	Güneş ışınımı	Elektrik üretimi, sıcak su, ısıtma ve endüstriyel ısı uygulamaları	Üretim gün ışığına, hava koşullarına, panel yönelimine ve depolama/şebeke altyapısına bağlıdır.
Rüzgâr enerjisi	Havanın hareketi	Karasal ve deniz üstü elektrik üretimi	Üretim rüzgâr hızına bağlıdır; yer seçimi, kuş ve yarasa etkileri, gürültü ve toplumsal kabul önemlidir.
Hidroelektrik enerji	Akan veya depolanan su	Elektrik üretimi, sistem esnekliği ve bazı durumlarda enerji depolama	Nehir ekosistemleri, su yönetimi, kuraklık riski ve yerel topluluklar üzerindeki etkiler dikkatle değerlendirilmelidir.

Şekil 5.1, güneş, rüzgâr ve hidroelektrik kaynakların enerji sistemindeki temel rollerini göstermekte ve bu kaynakların yerel uygunluk, çevresel etkiler, süreklilik ve esneklik, toplumsal kabul ve enerji okuryazarlığı boyutlarıyla birlikte değerlendirilmesi gerektiğini belirtmektedir.



Şekil 5.1. Güneş, rüzgâr ve hidroelektrik kaynakların enerji sistemindeki rolleri.

5.1. Güneş Enerjisi

Güneş enerjisi, Güneş'ten gelen ışınımın elektriğe veya ısıya dönüştürülmesiyle elde edilen yenilenebilir bir enerji türüdür (Seminario-Córdova and Rojas-Ortega, 2023). Güneş, Dünya'daki yaşamın temel enerji kaynağıdır. Bitkilerin fotosentezi, rüzgârların oluşumu, su döngüsünün devamı ve birçok doğal süreç doğrudan ya da dolaylı olarak güneş enerjisine bağlıdır (DOE and AAAS, 2017).

Güneş enerjisi teknolojileri genel olarak iki ana başlık altında incelenebilir. Bunlardan ilki, güneş ışığını doğrudan elektrik enerjisine dönüştüren fotovoltaik sistemlerdir. İkincisi ise güneş ışınımını ısı enerjisine dönüştüren güneş termal sistemleridir. Güneş termal sistemleri su ısıtma, bina ısıtma veya yoğunlaştırılmış güneş enerjisi santrallerinde elektrik üretimi amacıyla kullanılabilir (U.S. Department of Energy [DOE], 2026, 2026a).

Güneş enerjisinin en önemli avantajlarından biri, kaynağın yaygın ve yenilenebilir olmasıdır (Maka and Alabid, 2022). Güneş panelleri küçük ölçekli çatı uygulamalarından büyük ölçekli güneş enerji santrallerine kadar farklı ölçeklerde kurulabilir. Bu nedenle güneş enerjisi hem bireysel kullanıcılar hem de büyük enerji yatırımları için uygundur.

Bununla birlikte güneş enerjisinin bazı sınırlılıkları vardır. Güneş enerjisi üretimi gün ışığına bağlıdır; gece elektrik üretilemez ve bulutluluk, mevsim, enlem, panel yönelimi ve gölgelenme üretim miktarını etkiler. Bu nedenle güneş enerjisinin daha güvenilir biçimde kullanılabilmesi için enerji depolama sistemleri, akıllı şebekeler, talep yönetimi ve diğer enerji kaynaklarıyla birlikte planlama önemlidir (IEA, 2024).

Tablo 5.2. Güneş enerjisinin başlıca avantajları, sınırlılıkları ve çevresel değerlendirme boyutları

Boyut	Güçlü Yön	Sınırlılık / dikkat gerektiren nokta
Kaynak ve erişilebilirlik	Güneş ışınımı yaygın ve yenilenebilir bir kaynaktır.	Üretim gece koşullarından, bulutluluk, mevsim, enlem, panel yönelimi ve gölgelenmeden etkilenir.
Ölçeklenebilirlik	Çatı sistemlerinden büyük santrallere kadar modüler biçimde kurulabilir.	Büyük tesislerde arazi kullanımı, şebeke bağlantısı ve yer seçimi dikkatle planlanmalıdır.
Çevresel etki	Elektrik üretimi sırasında doğrudan sera gazı veya hava kirletici emisyon oluşturmaz.	Panel üretimi, hammadde kullanımı ve kullanım ömrü sonu geri dönüşüm süreçleri dikkate alınmalıdır.
Su ve arazi kullanımı	Fotovoltaik sistemler işletme sırasında az su gerektirir; çatı sistemleri ek arazi ihtiyacını azaltır.	Büyük santraller hassas ekosistemler, tarım arazileri ve bazı termal uygulamalarda su kullanımı açısından değerlendirilmelidir.
Ekonomi ve altyapı	Maliyetler uzun vadede önemli ölçüde düşmüştür; yerel elektrik üretimini destekleyebilir.	İlk yatırım, invertörler, depolama ve şebeke bağlantısı maliyet oluşturabilir.
Eğitsel ve toplumsal değer	Enerji dönüşümü, ölçme ve veri analizi için somut öğrenme fırsatları sunar.	Deneyler öğrencilerin yaş düzeylerine uygun ve güvenli tasarlanmalı; yerel kabul ve katılım dikkate alınmalıdır.

Tablo 5.2, güneş enerjisinin başlıca avantajlarını, sınırlılıklarını ve çevresel değerlendirme boyutlarını özetlemektedir. Güneş enerjisi teknolojileri son yıllarda hızla yaygınlaşmış; özellikle fotovoltaik sistemler modüler yapıları, düşen maliyetleri ve geniş uygulama alanları nedeniyle

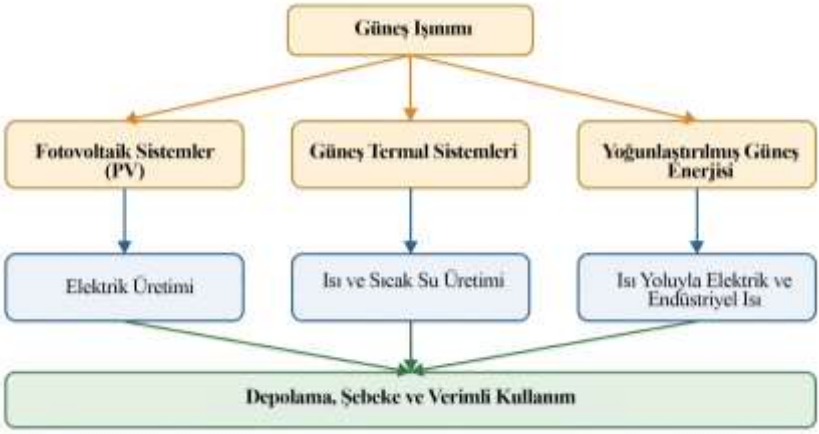
yenilenebilir enerji dönüşümünün en önemli bileşenlerinden biri hâline gelmiştir (Ember, 2024; IRENA, 2024).

5.1.1. Güneş Enerjisi Dönüşümleri

Güneş enerjisi doğada ve teknolojik sistemlerde farklı enerji biçimlerine dönüştürülebilir. Doğal süreçlerde güneş ışığı bitkiler tarafından fotosentez için kullanılır, suyun buharlaşmasını sağlar, atmosfer hareketlerini etkiler ve Dünya'nın iklim sistemlerinin işleyişinde önemli rol oynar (Maka and Alabid, 2022). Teknolojik sistemlerde ise güneş ışığı elektrik veya ısı enerjisine dönüştürülür.

Fotovoltaik sistemlerde, güneş ışığı yarı iletken malzemelerden yapılmış güneş hücrelerine ulaştığında elektrik akımı oluşur. Bu olgu fotovoltaik etki olarak adlandırılır. Güneş hücreleri bir araya getirilerek güneş panellerini, paneller ise daha büyük sistemleri oluşturur (Kataray et al., 2023). Bu sistemler çatı tipi elektrik üretiminden büyük güneş enerji santrallerine kadar farklı ölçeklerde kullanılabilir (DOE, 2026).

Güneş termal sistemlerinde temel amaç, güneş ışınımını ısıya dönüştürmektir. Basit güneş kolektörleri su ısıtma amacıyla kullanılabilir. Daha büyük ölçekli yoğunlaştırılmış güneş enerjisi sistemlerinde aynalar veya mercekler güneş ışığını belirli bir noktada yoğunlaştırır. Elde edilen bu ısı, buhar üretmek ve türbinleri çalıştırmak için kullanılabilir (DOE, 2026a).



Şekil 5.2. Güneş enerjisinin başlıca dönüşüm yolları.

Şekil 5.2, güneş enerjisinin yalnızca elektrik üretimi için değil, ısıtma ve endüstriyel ısı uygulamaları için de kullanılabileceğini göstermektedir. Bu nedenle güneş enerjisi farklı sektörlerde uygulanabilen esnek bir yenilenebilir kaynaktır.

5.1.2. Fotovoltaik Sistemler

Fotovoltaik sistemler, güneş ışığını doğrudan elektrik enerjisine dönüştüren sistemlerdir (Muliadi et al., 2021). Bu sistemlerin temel birimi güneş hücresidir. Güneş hücreleri genellikle silisyum gibi yarı iletken malzemelerden yapılır. Güneş ışığı hücre yüzeyine ulaştığında elektronların hareketiyle elektrik akımı oluşur (DOE, 2026).

Bir fotovoltaik sistem yalnızca panellerden oluşmaz. Sistemin çalışabilmesi için invertörler, bağlantı ekipmanları, montaj yapıları, kablolama, izleme sistemleri ve bazı durumlarda batarya depolama birimleri de gerekir. İnvertör, güneş panellerinden elde edilen doğru akımı evlerde ve elektrik şebekelerinde kullanılan alternatif akıma dönüştürür.

Fotovoltaik sistemler farklı ölçeklerde kurulabilir. Küçük sistemler genellikle konut çatılarında kullanılırken, orta ölçekli sistemler okullarda, kamu binalarında, çiftliklerde veya işletmelerde uygulanabilir. Büyük ölçekli güneş enerji santralleri uygun arazi alanlarında, sanayi bölgelerinde veya bozulmuş arazilerde elektrik üretmek amacıyla kurulabilir. Fotovoltaik sistemlerin temel bileşenleri Tablo 5.3'te özetlenmiştir. Tablo, bir fotovoltaik sistemin yalnızca güneş panellerinden oluşmadığını; invertörler, montaj sistemleri, kablolama, izleme sistemleri ve bazı durumlarda batarya depolamayı da içerdiğini göstermektedir.

Tablo 5.3. Fotovoltaik sistemlerin temel bileşenleri

Bileşen	İşlev
Güneş paneli	Güneş ışığını elektrik enerjisine dönüştürür.
İnvertör	Doğru akımı alternatif akıma dönüştürür.
Montaj sistemi	Panellerin uygun açı ve yönde konumlandırılmasını sağlar.
Kablolama ve bağlantılar	Elektriğin güvenli biçimde iletilmesini sağlar.
İzleme sistemi	Üretim miktarını ve sistem performansını izler.
Batarya	Üretilen elektriği daha sonra kullanmak üzere depolar.

Fotovoltaik sistemlerin en önemli avantajı modüler olmalarıdır. Küçük bir sistem başlangıçta kurulabilir ve ihtiyaç arttıkça genişletilebilir. Bu özellik, güneş enerjisini hem bireysel hem de kurumsal kullanıcılar için cazip hâle getirir. Ancak modülerlik, planlamanın önemsiz olduğu anlamına gelmez; panel yönelimi, gölgelenme, elektrik güvenliği ve şebeke bağlantısı uygun biçimde değerlendirilmelidir.

5.1.3. Güneş Termal Sistemleri ve Yoğunlaştırılmış Güneş Enerjisi

Güneş termal sistemleri, elektrik üretimi gerekiyorsa elektriğe dönüştürülmeden önce güneş ışığını ısı enerjisine dönüştüren sistemlerdir (Maka and Alabid, 2022). En yaygın örneklerden biri güneş kolektörleriyle çalışan su ısıtma sistemleridir. Bu sistemlerde güneş ışınımı kolektör yüzeyinde ısıya dönüştürülür ve bu ısı suya aktarılır. Konutlarda, otellerde,

spor tesislerinde ve bazı endüstriyel uygulamalarda sıcak su ihtiyacını karşılamak için kullanılabilirler.

Yoğunlaştırılmış güneş enerjisi sistemleri daha büyük ölçekli uygulamalardır. Bu sistemlerde aynalar veya yansıtıcı yüzeyler güneş ışığını belirli bir noktada toplar. Elde edilen yüksek sıcaklık, elektrik üretiminde kullanılan türbinleri çalıştırmak üzere buhar üretmek için kullanılabilir. Yoğunlaştırılmış güneş termal teknolojileri elektrik üretimine ek olarak yüksek sıcaklık gerektiren bazı endüstriyel ısı uygulamaları için de değerlendirilebilir (DOE, 2026a).

Tablo 5.4, başlıca güneş enerjisi teknolojilerini temel çalışma ilkeleri ve kullanım alanları bakımından karşılaştırmaktadır. Bu karşılaştırma, güneş enerjisinin fotovoltaik elektrik üretimiyle sınırlı olmadığını; ısı üretimi, yoğunlaştırılmış güneş enerjisi ve hibrit uygulamaları da kapsadığını göstermektedir. Özellikle yüksek ısı talebi olan uygulamalarda güneş termal sistemleri enerji tasarrufu ve emisyon azaltımı açısından önemli fırsatlar sunabilir.

Tablo 5.4. Güneş enerjisi teknolojilerinin karşılaştırılması

Teknoloji	Temel Çalışma İlkesi	Kullanım Alanı
Fotovoltaik sistemler	Güneş ışığını doğrudan elektriğe dönüştürür.	Konut, okul, işletme, güneş enerji santrali
Güneş kolektörleri	Güneş ışığını ısıya dönüştürür.	Sıcak su, bina ısıtma, havuz ısıtma
Yoğunlaştırılmış güneş enerjisi	Güneş ışığını aynalarla yoğunlaştırarak yüksek sıcaklık üretir.	Elektrik üretimi, endüstriyel ısı uygulamaları
Güneş destekli hibrit sistemler	Güneş enerjisini diğer enerji sistemleriyle birlikte kullanır.	Isıtma, soğutma, tarım ve endüstriyel uygulamalar

5.1.4. Güneş Enerjisinin Çevresel Etkileri

Güneş enerjisi, elektrik üretimi sırasında fosil yakıtları doğrudan yakmadığı için sera gazı emisyonlarını azaltma potansiyeline sahiptir. Ancak güneş enerjisi sistemlerinin çevresel etkileri sıfır değildir. Panel üretimi için hammadde çıkarımı, üretim süreçlerinde enerji kullanımı, arazi gereksinimleri ve kullanım ömrü sonunda panel atıklarının yönetimi dikkatle ele alınmalıdır (NREL, 2021).

Çatı tipi güneş sistemleri, arazi kullanımını artırmadan elektrik üretebildikleri için çevresel açıdan avantajlıdır. Ancak büyük ölçekli güneş enerji santrallerinde yer seçimi önemlidir. Tarım arazileri, doğal yaşam alanları veya hassas ekosistemler üzerine kurulan projeler çevresel ve toplumsal tartışmalara yol açabilir. Bu nedenle güneş enerjisi projelerinde çevresel etki değerlendirmesi, yerel topluluklarla iletişim ve geri dönüşüm planları önemlidir.

Güneş enerjisinin en güçlü çevresel özelliği fosil yakıt kullanımını azaltmaya yardımcı olmasıdır. Bununla birlikte sürdürülebilir bir güneş enerjisi sistemi, üretimden geri dönüşüme kadar tüm yaşam döngüsünü dikkate almalıdır. Bu yaklaşım, yenilenebilir enerji teknolojilerinin yalnızca "temiz" olarak etiketlenmesinden ziyade çevresel planlama ve kaynak yönetimi içinde değerlendirilmesini gerektirir.

5.1.5. Güneş Enerjisinin Eğitimde Kullanımı

Güneş enerjisi, öğrencilerin enerji dönüşümü, elektrik üretimi, sürdürülebilirlik ve iklim değişikliğini somut biçimde öğrenmelerine yardımcı olan uygun bir örnektir. Küçük güneş panelleriyle yapılan basit deneyler, öğrencilerin güneş ışığının elektrik enerjisine nasıl dönüştüğünü anlamalarına yardımcı olur.

Güneş enerjisiyle ilgili okul etkinlikleri ölçme, gözlem, veri toplama ve problem çözme becerilerini geliştirebilir. Öğrenciler günün farklı saatlerinde güneş paneli çıktısını ölçebilir, panel açısının üretim üzerindeki etkisini gözlemleyebilir veya gölgelenmenin elektrik üretimini nasıl azalttığını deneysel olarak inceleyebilir. Bu tür etkinlikler yenilenebilir enerji öğrenimini yalnızca kavramsal bilgi düzeyinde bırakmaz; veri temelli düşünmeyi, tasarımı ve günlük yaşamla bağlantı kurmayı da destekler (Hiğde, 2022; Vasconcelos et al., 2023).

Enerji okuryazarlığı açısından güneş enerjisi, öğrencilerin enerji üretimi ile tüketim davranışı arasındaki bağlantıyı görmelerine de yardımcı olur. Örneğin bir okulda çatı tipi güneş paneli uygulaması, yalnızca elektrik üretim teknolojisi için değil; enerji tasarrufu, karbon ayak izi, maliyet, yerel katılım ve sürdürülebilirlik tartışmaları için de bir öğrenme ortamı oluşturabilir. Bu bakımdan güneş enerjisi, sosyobilimsel tartışmalarla ilişkilendirilebilecek güçlü bir eğitsel konudur (Sadler, 2004; Zeidler, 2014).

Kutu 5.2. Sınıf içi etkinlik önerisi: Güneş paneli üretimini gözlemleme

Etkinlik Aşaması	Açıklama
Amaç	Güneş ışığı miktarı ile elektrik üretimi arasındaki ilişkiyi gözlemlemek.
Malzemeler	Küçük güneş paneli, multimetre, lamba veya güneş ışığı, kayıt formu.
Uygulama	Panel farklı açılarda ve farklı ışık koşullarında ölçülür.
Gözlem	Gerilim veya akım değerleri kaydedilir.
Tartışma	Işık şiddeti, panel açısı, gölgelenme ve enerji verimliliği arasındaki ilişki değerlendirilir.
Genişletme	Öğrenciler okulun enerji tüketimini olası güneş enerjisi üretimiyle karşılaştırabilir.

Bu etkinlik, öğrencilerin yenilenebilir enerjiyi yalnızca kuramsal değil, deneysel olarak da öğrenmelerini sağlar. Ayrıca enerji verimliliği,

teknoloji tasarımı, veri okuryazarlığı ve çevresel sürdürülebilirlik ile bağlantılar kurulmasına yardımcı olur (Kutu 5.2).

5.1.6. Enerji Okuryazarlığı Açısından Değerlendirme

Güneş enerjisi, enerji okuryazarlığı açısından güçlü bir öğretim konusudur; çünkü öğrenciler temel bilimsel kavramları ve günlük yaşam kararlarını birlikte değerlendirebilir. Bir güneş panelinin nasıl çalıştığını anlamak bilişsel boyutu; güneş enerjisinin çevresel ve toplumsal etkilerini tartışmak tutumsal boyutu; enerji tasarrufu, verimli tüketim ve yenilenebilir enerji tercihleri üzerine düşünmek ise davranışsal boyutu destekler (DeWaters et al., 2013; Santillán and Cedano, 2023).

Bu nedenle güneş enerjisi eğitimi "panel Güneş'ten elektrik üretir" bilgisiyle sınırlı kalmamalıdır. Öğrenciler panel üretiminin yaşam döngüsü etkilerini, değişken üretim sorununu, depolama ihtiyacını, yer seçimini, maliyeti ve toplumsal kabulü de değerlendirebilmelidir. Böyle bir yaklaşım, enerjiyi teknik bilgi ile sürdürülebilirlik ve sorumlu yurttaşlığı birleştiren bir öğrenme alanına dönüştürür.

5.2. Rüzgâr Enerjisi

Rüzgâr enerjisi, havanın hareketinden elde edilen yenilenebilir bir enerji türüdür. Dünya yüzeyi Güneş tarafından farklı oranlarda ısıtılır ve bu durum atmosferde basınç farkları oluşturur (Cevasco et al., 2021). Bu basınç farkları hava hareketine, yani rüzgâra yol açar. Rüzgâr türbinleri bu kinetik enerjiyi önce mekanik enerjiye, ardından elektrik enerjisine dönüştürür (DOE, 2026c).

Rüzgâr enerjisi tarih boyunca farklı amaçlarla kullanılmıştır. Geleneksel yel değirmenleri tahıl öğütmek veya su pompalamak için kullanılırken, modern rüzgâr türbinleri elektrik üretimi için geliştirilmiştir. Günümüzde rüzgâr enerjisi, hem karasal hem de deniz üstü alanlarda kurulan türbinler aracılığıyla elektrik üretiminde yaygın olarak kullanılmaktadır (DOE, 2026c; IEA, 2024).

Rüzgâr enerjisinin en önemli avantajlarından biri, elektrik üretimi sırasında fosil yakıtları doğrudan kullanmaması ve sera gazı emisyonu oluşturmamasıdır. Bu açıdan rüzgâr enerjisi düşük karbonlu enerji sistemlerinin önemli bir bileşenidir. Ancak rüzgâr enerjisi üretimi rüzgâr hızına ve sürekliliğine bağlıdır. Bu nedenle uygun yer seçimi, rüzgâr ölçümleri, şebeke bağlantısı ve enerji depolama çözümleri son derece önemlidir (IEA, 2024b; NREL, 2021).

Tablo 5.5, rüzgâr enerjisinin başlıca avantajlarını, sınırlılıklarını ve çevresel değerlendirme boyutlarını özetlemektedir. Tablo, rüzgâr enerjisinin önemli bir düşük karbonlu seçenek olduğunu; ancak sürdürülebilir kullanımının rüzgâr potansiyeline, yer seçimine, şebeke entegrasyonuna, biyoçeşitliliğin korunmasına, toplumsal kabule ve uzun vadeli bakıma bağlı olduğunu göstermektedir.

Tablo 5.5. Rüzgâr enerjisinin başlıca avantajları, sınırlılıkları ve çevresel değerlendirme boyutları

Boyut	Güçlü Yön	Sınırlılık / dikkat gerektiren nokta
Kaynak potansiyeli	Rüzgâr yenilenebilirdir ve uygun bölgelerde güçlü bir enerji kaynağı olabilir.	Rüzgâr hızı ve sürekliliği bölgeye göre değişir; uzun süreli ölçüm gerekir.
Emisyonlar ve hava kalitesi	Elektrik üretimi sırasında doğrudan sera gazı veya hava kirletici emisyon oluşturmaz.	Türbin üretimi, taşınması ve kurulumu yaşam döngüsü etkilerine sahiptir.
Yer seçimi ve ölçek	Tek türbinden büyük karasal ve deniz üstü santrallere kadar farklı ölçeklerde kurulabilir.	Yer seçimi, iletim altyapısı, yerleşimlere uzaklık ve toplumsal kabul belirleyicidir.
Biyoçeşitlilik ve yerel çevre	Düşük karbonlu üretim iklim baskısını azaltmaya katkı sağlar.	Kuşlar, yarasalar, gürültü, gölge titreşimi, görsel etki ve deniz üstü projelerde deniz ekosistemleri değerlendirilmelidir.
Şebeke entegrasyonu ve ekonomi	Uygun bölgelerde rekabetçi üretim sağlayabilir ve güneş enerjisini tamamlayabilir.	Değişken üretim nedeniyle esnek şebekeler, depolama, dengeleme ve bakım yatırımları gerekir.

5.2.1. Rüzgâr Türbinlerinin Çalışma İlkesi

Rüzgâr türbinleri, rüzgârın kinetik enerjisini elektrik enerjisine dönüştüren sistemlerdir. Rüzgâr türbin kanatlarına çarptığında kanatların iki tarafında basınç farkı oluşur. Bu fark kanatların dönmesini sağlar. Dönen kanatlar rotoru hareket ettirir ve bu dönme hareketi jeneratöre aktarılır; jeneratörde elektrik üretilir (DOE, 2026c).

Şekil 5.3, rüzgâr enerjisinin temelde kinetik enerjiden elektrik enerjisine dönüşüm süreci olduğunu göstermektedir. Rüzgâr hızı, türbin kanadı tasarımı, kule yüksekliği ve bölgenin rüzgâr potansiyeli üretilebilecek elektrik miktarını doğrudan etkiler.

Şekil 5.3. Rüzgâr türbinlerinde enerji dönüşüm süreci.

Bir rüzgâr türbini yalnızca kanatlardan oluşmaz. Türbinin verimli ve güvenli çalışabilmesi için rotor, nasel, jeneratör, kule, fren sistemi, yaw/yönlendirme sistemi, kontrol sistemi ve trafo-bağlantı sistemi gibi birbiriyle ilişkili birçok bileşenin birlikte çalışması gerekir. Modern türbinler rüzgâr yönünü ve hızını izleyebilir, kanat açılarını ayarlayabilir. Bu sayede daha verimli elektrik üretimi sağlanabilir ve çok yüksek rüzgâr hızlarında sistem güvenliği korunabilir. Rüzgâr türbinlerinin temel bileşenleri Tablo 5.6'da özetlenmiştir.

Tablo 5.6. Rüzgâr türbinlerinin temel bileşenleri

Bileşen	İşlev
Kanatlar	Rüzgârın kinetik enerjisini dönme hareketine dönüştürür.
Rotor	Kanatların bağlı olduğu ana dönen bölümdür.
Kule	Türbini daha güçlü ve daha düzenli rüzgârlardan yararlanacak yükseklikte tutar.
Jeneratör	Mekanik hareketi elektrik enerjisine dönüştürür.
Nasel	Jeneratör, dişli kutusu ve kontrol sistemlerini barındıran üst bölümdür.
Yaw/yönlendirme sistemi	Türbinin rüzgâr yönüne dönmesini sağlar.
Kontrol sistemi	Türbinin güvenli ve verimli çalışmasını izler ve düzenler.
Trafo ve bağlantı sistemi	Üretilen elektriği şebeke bağlantısına uygun hâle getirir.

5.2.2. Karasal ve Deniz Üstü Rüzgâr Enerjisi

Rüzgâr enerjisi uygulamaları genel olarak karasal ve deniz üstü rüzgâr enerjisi olarak ikiye ayrılır. Karasal rüzgâr türbinleri, rüzgâr potansiyelinin yüksek olduğu kara alanlarına kurulur. Bu türbinler genellikle tepeler, açık araziler, kıyı bölgeleri ve rüzgâr koridorlarında yer alır. Karasal rüzgâr enerjisinin kurulumu ve bakımı deniz üstü sistemlere göre genellikle daha kolaydır.

Deniz üstü rüzgâr enerjisi, denizlere veya büyük su kütlelerine kurulan türbinler aracılığıyla elektrik üretimini ifade eder. Deniz üstü rüzgârları çoğu zaman daha güçlü ve daha düzenli olabilir. Bu nedenle deniz üstü rüzgâr çiftlikleri yüksek elektrik üretim potansiyeline sahiptir. Ancak kurulum, bakım, deniz tabanı bağlantıları, iletim hatları ve çevresel izleme süreçleri daha karmaşık ve maliyetli olabilir (NREL, 2021).

Tablo 5.7'de gösterildiği gibi hem karasal hem de deniz üstü rüzgâr enerjisi sistemleri yenilenebilir elektrik üretimi için önemlidir. Hangi seçeneğin daha uygun olduğu rüzgâr potansiyeline, coğrafi koşullara, maliyete, çevresel etkilere, şebeke bağlantısına, bakım gereksinimlerine ve toplumsal kabule bağlıdır.

Tablo 5.7. Karasal ve deniz üstü rüzgâr enerjisinin karşılaştırılması

Özellik	Karasal Rüzgâr Enerjisi	Deniz Üstü Rüzgâr Enerjisi
Kurulum alanı	Kara alanları, tepeler, açık araziler, kıyılar	Denizler ve büyük su kütleleri
Rüzgâr potansiyeli	Bölgeye göre değişir	Genellikle daha güçlü ve daha düzenlidir
Kurulum maliyeti	Görece daha düşüktür	Daha yüksektir
Bakım	Daha erişilebilirdir	Deniz koşulları nedeniyle daha zordur
Çevresel etki	Arazi kullanımı, kuşlar, yarasalar, gürültü ve görsel etki	Deniz ekosistemleri, balıkçılık, kuş göç yolları ve deniz kullanımı
Şebeke bağlantısı	Daha kolay olabilir	Denizaltı kabloları ve özel bağlantı altyapısı gerektirir

5.2.3. Rüzgâr Potansiyeli ve Yer Seçimi

Yer seçimi, rüzgâr enerjisi projelerinde en kritik konulardan biridir. Bir alana rüzgâr türbini kurulmadan önce uzun süreli rüzgâr ölçümleri yapılır. Rüzgâr hızı, rüzgâr yönü, türbülans, arazi yapısı, yerleşim yerlerine uzaklık, doğal yaşam alanları, kuş göç yolları ve şebeke bağlantı olanakları değerlendirilir.

Rüzgâr hızı arttıkça bir türbinin üretebileceği enerji miktarı da artar. Ancak türbinler çok düşük rüzgâr hızlarında verimli çalışmaz; çok yüksek rüzgâr hızlarında ise güvenlik nedeniyle durdurulabilir. Bu nedenle rüzgâr enerjisi projelerinde yalnızca rüzgârın varlığı değil, hızı, düzenliliği ve sürekliliği de önemlidir.

Tablo 5.8'de gösterildiği gibi doğru yer seçimi rüzgâr enerjisi projelerinin hem ekonomik verimliliğini hem de çevresel sürdürülebilirliğini artırır. Bu nedenle rüzgâr enerjisi yatırımları teknik analiz, çevresel değerlendirme, şebeke bağlantı olanakları ve toplumsal katılım süreçleriyle birlikte planlanmalıdır.

Tablo 5.8. Rüzgâr enerjisi projelerinde yer seçimini etkileyen faktörler

Faktör	Neden Önemlidir?
Ortalama rüzgâr hızı	Üretilecek elektrik miktarını doğrudan etkiler.
Rüzgâr yönü	Türbin yerleşimi ve santral tasarımı için gereklidir.
Arazi yapısı	Tepeler, vadiler ve engeller rüzgâr akışını etkileyebilir.
Şebeke bağlantısı	Üretilen elektriğin sisteme aktarılması için gereklidir.
Yerleşim yerlerine uzaklık	Gürültü, görsel etki ve güvenlik açısından dikkate alınır.
Kuş ve yarasa hareketleri	Ekolojik etkileri azaltmak için değerlendirilmelidir.
Toplumsal kabul	Yerel toplulukların bilgilendirilmesi ve sürece katılması proje başarısını etkiler.
Bakım erişimi	Türbinlerin düzenli bakım ve onarımı mümkün olmalıdır.

5.2.4. Rüzgâr Enerjisinin Çevresel Etkileri

Rüzgâr enerjisi, elektrik üretimi sırasında fosil yakıtları doğrudan yakmadığı için sera gazı emisyonlarının azaltılmasına yardımcı olur. Bu nedenle iklim değişikliğiyle mücadelede önemli bir yenilenebilir enerji kaynağıdır (IEA, 2024; Justice et al., 2024; NREL, 2021). Ancak rüzgâr enerjisinin çevresel etkileri sıfır değildir.

Rüzgâr türbinleri bazı bölgelerde kuşlar ve yarasalar için risk oluşturabilir. Özellikle göç yolları, üreme alanları ve hassas ekosistemler yakınındaki türbinler için dikkatli çevresel değerlendirme gerekir. Ayrıca türbinlerle ilişkili gürültü, gölge titreşimi, görsel etki ve arazi kullanımı da yerel tartışmalara yol açabilir (Pacific Northwest National Laboratory [PNNL], 2023).

Deniz üstü rüzgâr projelerinde deniz ekosistemleri, balıkçılık faaliyetleri, deniz kuşları, deniz memelileri ve kıyı kullanımı dikkate alınmalıdır. Bu etkilerin azaltılması için yer seçimi, inşaat dönemi planlaması, izleme sistemleri ve çevresel yönetim uygulamaları önemlidir (NREL, 2021).

Rüzgâr enerjisinin çevresel etkileri çoğu zaman uygun planlama ve izleme yöntemleriyle azaltılabilir. Örneğin kuş göç yollarından kaçınmak, türbin yerleşimini dikkatle düzenlemek, hassas dönemlerde inşaat faaliyetlerini sınırlamak ve yerel halkı karar alma süreçlerine dâhil etmek sürdürülebilir rüzgâr enerjisi projeleri için önemlidir.

5.2.5. Rüzgâr Enerjisinin Enerji Sistemindeki Rolü

Rüzgâr enerjisi, elektrik üretiminde fosil yakıtların payını azaltabilecek önemli kaynaklardan biridir. Güneş enerjisiyle birlikte rüzgâr enerjisi, küresel yenilenebilir enerji kapasitesindeki artışın temel unsurları arasındadır (IEA, 2024). Özellikle uygun rüzgâr potansiyeline sahip ülkelerde rüzgâr enerjisi elektrik üretiminde önemli paylara ulaşabilir.

Ancak rüzgâr enerjisi üretimi hava koşullarına bağlı olarak değişebilir. Rüzgâr zayıf olduğunda üretim azalır; güçlü ve düzenli rüzgâr dönemlerinde üretim artar. Bu nedenle rüzgâr enerjisinin enerji sistemine güvenilir biçimde entegre edilebilmesi için esnek elektrik şebekeleri, enerji depolama sistemleri, talep yönetimi ve farklı enerji kaynaklarıyla dengeli planlama gerekir (IEA, 2024a).

Rüzgâr enerjisi ile güneş enerjisi birbirini tamamlayabilir. Bazı bölgelerde güneş enerjisi gündüz saatlerinde güçlü üretim sağlarken, rüzgâr enerjisi gece veya farklı mevsimlerde daha güçlü olabilir. Bu nedenle farklı yenilenebilir kaynakların birlikte kullanılması enerji sisteminin daha dengeli çalışmasına katkı sağlayabilir. Şekil 5.4, rüzgâr enerjisinin tek başına değil, diğer yenilenebilir kaynaklar ve şebeke teknolojileriyle birlikte ele alınması gerektiğini göstermektedir. Bu yaklaşım sürdürülebilir ve güvenilir bir enerji sistemi için önemlidir.

Şekil 5.4. Rüzgâr enerjisinin elektrik sistemine entegrasyonu.

5.2.6. Rüzgâr Enerjisinin Eğitimde Kullanımı

Rüzgâr enerjisi, öğrencilerin enerji dönüşümü, aerodinamik, elektrik üretimi, çevre bilinci ve sürdürülebilirlik konularını öğrenmelerine yardımcı olan uygun bir örnektir. Basit model türbinler kullanılarak rüzgâr hızının, kanat sayısının, kanat açısının ve türbin yüksekliğinin elektrik üretimi üzerindeki etkileri gözlemlenebilir.

Bu tür etkinlikler yalnızca kuramsal bilgiyi değil; deney yapma, ölçme, veri yorumlama ve tasarım-geliştirme becerilerini de destekler. Rüzgâr enerjisi etkinlikleri fen, teknoloji, mühendislik ve matematiği bir araya getiren STEM temelli uygulamalar için oldukça uygundur. Yenilenebilir enerji etkinlikleri öğrencilerin teknik bilgiyi çevresel ve toplumsal kararlarla ilişkilendirmesine de yardımcı olabilir (Hiğde, 2022; Yıldırım and Selvi, 2016).

Kutu 5.3. Sınıf içi etkinlik önerisi: Mini rüzgâr türbini tasarlama

Etkinlik Aşaması	Açıklama
Amaç	Rüzgâr enerjisinin kinetik enerjiden elektrik enerjisine dönüşümünü gözlemlemek.
Malzemeler	Mini motor, karton veya plastik kanatlar, bağlantı kabloları, küçük LED, fan, cetvel.
Uygulama	Öğrenciler farklı kanat sayıları ve kanat açılarıyla mini türbinler tasarlar.
Ölçüm	Üretim LED parlaklığı veya basit ölçüm cihazlarıyla karşılaştırılır.
Değerlendirme	Hangi tasarımın daha verimli olduğu tartışılır.
Tartışma	Rüzgâr hızı, kanat tasarımı ve türbin yüksekliğinin üretim üzerindeki etkileri değerlendirilir.

Bu etkinlik, öğrencilerin enerji üretimini somut bir model üzerinden anlamalarına yardımcı olur. Ayrıca tasarım, deneme-yanılma, ekip çalışması ve çevre bilinci becerilerini geliştirir (Kutu 5.3).

5.2.7. Enerji Okuryazarlığı Açısından Değerlendirme

Rüzgâr enerjisi, enerji okuryazarlığını geliştirmek için güçlü bir öğrenme konusudur. Çünkü konu yalnızca bir türbinin nasıl çalıştığını açıklamakla sınırlı değildir; değişken üretim, yer seçimi, çevresel etki, enerji depolama, yerel kabul ve enerji politikası üzerine birlikte düşünmeyi gerektirir. Bu nedenle rüzgâr enerjisi öğrencilerin enerji sistemlerini bütüncül biçimde değerlendirmelerine yardımcı olabilir.

Enerji okuryazarlığı literatürü, enerji bilgisinin tutumlar, davranışlar, karar verme ve sorumlu eylemle birlikte ele alınması gerektiğini vurgular (DeWaters et al., 2013; Ramachandran et al., 2024; Santillán and Cedano, 2023). Rüzgâr enerjisi bu açıdan iyi bir örnektir: Bir bölgeye rüzgâr türbini kurulup kurulmayacağı sorusu teknik, ekonomik, çevresel ve toplumsal gerekçelerin birlikte tartışılmasını gerektirir.

Bu nedenle rüzgâr enerjisi derslerde yalnızca yenilenebilir bir elektrik üretim yöntemi olarak değil, aynı zamanda sosyobilimsel bir konu olarak da ele alınabilir. Öğrenciler rüzgâr türbinlerinin iklim değişikliğine katkıyı azaltma potansiyelini, kuşlar ve yarasalar üzerindeki etkilerini, yerel toplum görüşlerini ve enerji güvenliğini tartışabilir. Böylece enerji, bilimsel bilgi ile toplumsal karar verme arasındaki ilişki içinde öğrenilebilir (Sadler, 2004; Zeidler, 2014).

5.3. Hidroelektrik Enerji

Hidroelektrik enerji ya da hidrogüç, hareket eden veya düşen suyun enerjisinden elektrik üretilmesiyle elde edilen yenilenebilir bir enerji türüdür (Stocks et al., 2021). Nehirler, akarsular, barajlar ve su rezervuarları hidroelektrik üretimi için kullanılabilir. Bu sistemlerde suyun kinetik veya potansiyel enerjisi türbinleri döndürür ve türbinlere bağlı jeneratörler elektrik üretir (DOE, 2026d). Tablo 5.9, hidroelektrik enerjinin kaynak kullanımı, sistem esnekliği, çevresel etkiler, arazi ve su yönetimi, toplumsal boyutlar ve uzun vadeli sürdürülebilirlik açısından başlıca güçlü yönlerini ve sınırlılıklarını sunmaktadır.

Hidroelektrik enerji, dünya genelinde uzun süredir kullanılan en önemli yenilenebilir elektrik kaynaklarından biridir. Özellikle büyük nehir sistemlerine, yüksek yağışa veya dağlık araziye sahip bölgelerde hidroelektrik santraller önemli elektrik üretim kapasitesi sağlayabilir. Hidroelektrik yalnızca elektrik üretmez; bazı sistemlerde su depolama, taşkın kontrolü, sulama ve enerji sisteminde dengeleme gibi işlevler de sağlayabilir (IEA, 2026; International Hydropower Association, 2024). Bununla birlikte hidroelektrik etkisiz bir kaynak değildir. Büyük barajlar nehir ekosistemlerini, balık göç yollarını, su sıcaklığını, sediment taşınımını, arazi kullanımını ve yerel toplulukları etkileyebilir. Bu nedenle hidroelektrik projeler planlanırken yalnızca enerji üretimi değil; ekolojik denge, su yönetimi, yerel halkın katılımı ve uzun vadeli çevresel izleme süreçleri de dikkate alınmalıdır (Kuriqi et al., 2021; U.S. Energy Information Administration [EIA], 2022).

Tablo 5.9. Hidroelektrik enerjinin başlıca avantajları, sınırlılıkları ve çevresel değerlendirme boyutları

Boyut	Güçlü Yön	Sınırlılık / dikkat gerektiren nokta
Kaynak ve üretim	Akan su ve yükseklik farkı kullanılarak büyük ölçekli ve görece kontrol edilebilir elektrik üretimi sağlanabilir.	Üretim yağışa, akış rejimine, kuraklığa ve su yönetimine bağlıdır.
Sistem esnekliği ve depolama	Bazı santraller hızlı devreye girebilir ve şebekeyi dengeleyebilir; pompaj depolama entegrasyonu destekler.	Pompaj depolama uygun coğrafya ve iki rezervuar gerektirir; tüm projeler dikkatli işletme ister.
Çevresel etki	Fosil yakıt yakmadan düşük karbonlu elektrik üretimine katkı sağlar.	Nehir akışı, balık göçü, sediment taşınımı, su kalitesi ve bazı rezervuarlarda metan oluşumu dikkate alınmalıdır.
Arazi ve su yönetimi	Bazı projeler sulama, taşkın kontrolü ve yerel altyapı faydaları da sağlayabilir.	Rezervuarlar tarım, orman ve yerleşim alanlarını etkileyebilir; ekolojik akış korunmalıdır.
Toplumsal boyut	Yerel kalkınma, istihdam ve enerji güvenliğine katkı sağlayabilir.	Yerinden edilme, geçim kaynakları üzerindeki etkiler ve yerel kabul sorunları ortaya çıkabilir.
Uzun vadeli sürdürülebilirlik	Uzun ömürlü altyapı sağlayabilir ve bazı sistemlerde yenilenebilir entegrasyonu güçlendirebilir.	Havza ölçeğinde kümülatif etkiler ve iklim değişikliğinin neden olduğu su belirsizlikleri yönetilmelidir.

5.3.1. Hidroelektrik Santrallerin Çalışma İlkesi

Hidroelektrik santrallerde temel ilke, suyun hareketini kullanarak türbinleri döndürmektir. Su belirli bir yükseklikten aşağı doğru hareket ettiğinde potansiyel enerjisi kinetik enerjiye dönüşür. Bu hareket türbin kanatlarını döndürür. Türbinin dönme hareketi jeneratöre aktarılır ve jeneratör elektrik üretir (DOE, 2026d). Hidroelektrik üretimde iki temel unsur önemlidir: su debisi ve düşü yüksekliği. Debi, belirli bir zaman aralığında akan su miktarını ifade eder. Düşü yüksekliği ise suyun türbine ulaşmadan önce sahip olduğu yükseklik farkıdır. Genel olarak debi ve düşü yüksekliği arttıkça üretilebilecek elektrik miktarı da artar. Şekil 5.5, hidroelektrik enerjinin suyun potansiyel veya kinetik enerjisinden elektrik enerjisine dönüşümünü göstermektedir. Bir santralin verimliliği su miktarı, düşü yüksekliği, türbin tipi, jeneratör verimliliği ve su yönetimiyle yakından ilişkilidir.

Şekil 5.5. Hidroelektrik santrallerde enerji dönüşüm süreci.

Tablo 5.10, hidroelektrik sistemlerin temel bileşenlerini özetlemekte ve barajlar, rezervuarlar, cebri borular, türbinler, jeneratörler, trafolar, iletim hatları ve çevresel akış sistemleri gibi yapıların elektrik üretimine ve ekolojik yönetime nasıl katkı sağladığını göstermektedir.

Tablo 5.10. Hidroelektrik sistemlerin temel bileşenleri

Bileşen	İşlev
Baraj veya su alma yapısı	Suyu depolar veya türbinlere yönlendirir.
Rezervuar	Suyun belirli bir alanda birikmesini sağlar.
Cebri boru	Suyu yüksek basınçla türbine taşır.
Türbin	Suyun kinetik enerjisini mekanik enerjiye dönüştürür.
Jeneratör	Türbinin mekanik hareketini elektrik enerjisine dönüştürür.
Trafo	Üretilen elektriğin gerilimini şebeke için ayarlar.
Şalt sahası ve iletim hattı	Elektriği şebekeye aktarır.
Balık geçidi veya çevresel akış sistemi	Ekolojik etkilerin azaltılmasına yardımcı olur.

5.3.2. Hidroelektrik Santral Türleri

Hidroelektrik santraller farklı ölçütlere göre sınıflandırılabilir (Parvez et al., 2021). En yaygın sınıflandırma, santralin suyu kullanma biçimine dayanır. Bu açıdan hidroelektrik santraller; rezervuarlı hidroelektrik santraller, nehir tipi santraller, pompaj depolamalı hidroelektrik santraller ve küçük ölçekli hidroelektrik santraller olarak ele alınabilir.

Rezervuarlı hidroelektrik santraller, suyun büyük bir rezervuarda depolanmasına ve ihtiyaç duyulduğunda türbinlerden geçirilerek elektrik üretilmesine dayanır. Elektrik üretimine ek olarak bu sistemler taşkın kontrolü, sulama ve içme suyu temini gibi amaçlarla da kullanılabilir. Ancak büyük rezervuarlar arazi kullanımını, ekosistemleri ve yerel toplulukları etkileyebilir.

Nehir tipi hidroelektrik santraller, büyük rezervuarlar oluşturmadan nehrin doğal akışını kullanır. Bu sistemler genellikle rezervuarlı sistemlere göre daha küçük ölçeklidir ve daha sınırlı su depolama kapasitesine sahiptir.

Ancak nehir akışını değiştirebildikleri için ekolojik akış, balık geçitleri ve su kalitesi açısından dikkatli planlama gerektirir (Kuriqi et al., 2021).

Pompaj depolamalı hidroelektrik santraller, enerji depolamak için kullanılan özel sistemlerdir. Elektrik talebinin düşük ve elektrik üretiminin yüksek olduğu zamanlarda su alt rezervuardan üst rezervuara pompalanır. Elektrik talebi arttığında su tekrar aşağı bırakılır ve türbinlerden geçirilerek elektrik üretilir. Bu sistemler özellikle güneş ve rüzgâr gibi değişken yenilenebilir enerji kaynaklarının elektrik sistemine entegrasyonunda önemli rol oynayabilir (IEA, 2024; International Hydropower Association, 2024).

Tablo 5.11. Hidroelektrik santral türlerinin karşılaştırılması

Santral Türü	Temel Özellik	Avantaj	Dikkat Gerektiren Nokta
Rezervuarlı hidroelektrik	Su bir rezervuarda depolanır ve kontrollü biçimde kullanılır.	Yüksek üretim ve sistem esnekliği sağlayabilir.	Arazi kullanımı, ekosistem etkisi ve yerinden edilme ile ilgili riskler vardır.
Nehir tipi hidroelektrik	Nehrin doğal akışını kullanır.	Daha az büyük rezervuar kapasitesi gerektirir.	Nehir akışı, balık geçişi ve ekolojik denge etkilenebilir.
Pompaj depolamalı hidroelektrik	Elektriği suyun konum enerjisi olarak depolar.	Şebeke dengelemesi ve enerji depolama sağlar.	Uygun topoğrafya ve iki rezervuar gerektirir.
Küçük hidroelektrik	Yerel ölçekte daha düşük kapasiteli üretim sağlar.	Kırsal enerji ihtiyaçlarına katkı sağlayabilir.	Havza ölçeğinde kümülatif çevresel etkiler oluşabilir.

Küçük hidroelektrik santraller, yerel ölçekte elektrik üretebilen daha düşük kurulu güce sahip sistemlerdir. Küçük hidroelektrik projeler kırsal alanlarda veya yerel enerji talebini karşılamak için yararlı olabilir. Ancak küçük ölçek, çevresel etkilerin her zaman düşük olduğu anlamına gelmez; aynı nehir havzasında çok sayıda küçük santralin kümülatif etkiler yaratabileceği unutulmamalıdır (Kuriqi et al., 2021).

Tablo 5.11, hidroelektrik santral türlerinin bölgenin su potansiyeline ve enerji sisteminin ihtiyaçlarına göre değerlendirilmesi gerektiğini göstermektedir. Özellikle pompaj depolamalı sistemler, güneş ve rüzgâr gibi değişken kaynakları destekleyebilecek önemli çözümler arasındadır.

5.3.3. Türbin Türleri ve Uygulama Alanları

Bir hidroelektrik santralde kullanılan türbin tipi su debisine ve düşü yüksekliğine göre belirlenir. Farklı türbinler farklı koşullarda daha verimli çalışır. Bu nedenle santral tasarımında bölgenin hidrolojik yapısı, su miktarı, yükseklik farkı ve işletme amacı birlikte değerlendirilmelidir.

Genel olarak Pelton türbinleri yüksek düşü ve düşük debi koşullarında, Francis türbinleri orta düşü ve orta debi koşullarında, Kaplan türbinleri ise düşük düşü ve yüksek debi koşullarında kullanılır. Bu

sınıflandırma, hidroelektrik santrallerin coğrafi ve teknik koşullara göre tasarlanması gerektiğini göstermektedir.

Tablo 5.12. Başlıca hidroelektrik türbin türleri

Türbin Türü	Uygun Koşul	Yaygın Kullanım
Pelton türbini	Yüksek düşü, düşük debi	Dağlık bölgelerde yüksek düşülü santraller
Francis türbini	Orta düşü, orta debi	Birçok rezervuarlı hidroelektrik santral
Kaplan türbini	Düşük düşü, yüksek debi	Geniş debili nehir sistemleri
Pompa-türbin	Çift yönlü çalışma	Pompaj depolamalı hidroelektrik santraller

Tablo 5.12'de gösterildiği gibi türbin seçimi esas olarak düşü yüksekliğine, su debisine ve işletme amacına bağlıdır. Türbin seçimi yalnızca teknik verimlilik açısından değil, çevresel etki açısından da önemlidir. Örneğin balık geçişi, sucul canlıların korunması ve ekolojik akışın sürdürülmesi türbin tasarımı ve santral işletimiyle yakından ilişkilidir.

5.3.4. Hidroelektrik Enerjinin Çevresel Etkileri

Hidroelektrik enerji, elektrik üretimi sırasında fosil yakıt yakmadığı için düşük karbonlu elektrik üretimine katkı sağlayabilir (Bilgili et al., 2021). Ancak özellikle büyük rezervuar sistemlerinde çevresel ve toplumsal etkiler dikkatle yönetilmelidir. Barajlar nehirlerin doğal akışını değiştirebilir, sediment taşınımını azaltabilir, balık göç yollarını kesintiye uğratabilir ve su sıcaklığı ile oksijen düzeylerinde değişikliklere neden olabilir (EIA, 2022).

Nehir ekosistemleri su akış hızı, sıcaklık, kimyasal yapı ve mevsimsel değişimler ile ilişkili olarak gelişir. Hidroelektrik santraller bu doğal düzeni değiştirdiğinde balıklar, sucul bitkiler, omurgasızlar ve kıyı ekosistemleri etkilenebilir. Bu nedenle hidroelektrik projelerde ekolojik akışın korunması, balık geçitlerinin tasarlanması, sedimentin yönetilmesi ve su kalitesinin izlenmesi önemlidir (DOE, 2026d; Kuriqi et al., 2021).

Büyük rezervuarlar geniş alanların su altında kalmasına neden olabilir. Bu durum tarım alanlarını, ormanları, doğal yaşam alanlarını veya yerleşimleri etkileyebilir. Bazı bölgelerde yerel toplulukların taşınması gerekebilir. Ayrıca özellikle sıcak iklimlerde ve organik maddece zengin rezervuarlarda metan emisyonları oluşabilir. Bu nedenle hidroelektrik projelerin çevresel değerlendirmesi bölgesel koşullara göre yapılmalıdır.

5.3.5. Hidroelektrik Enerjinin Eğitimde Kullanımı

Hidroelektrik enerji, öğrencilerin enerji dönüşümü, su döngüsü, türbin teknolojisi, elektrik üretimi ve çevresel etkiler arasındaki ilişkiyi öğrenmelerine yardımcı olan uygun bir örnektir. Basit sınıf içi etkinlikler, suyun kinetik enerjisinin mekanik enerjiye ve elektrik enerjisine dönüşümünü gösterebilir.

Öğrenciler, su akış hızının dönme hareketini nasıl etkilediğini gözlemlemek için küçük su çarkları veya basit türbin modelleri kullanabilir. Ayrıca barajların çevresel etkileri, balık göç yolları, su kullanımı ve iklim değişikliği gibi konular sınıf tartışmalarıyla ele alınabilir.

Hidroelektrik enerji yalnızca teknik bir elektrik üretim örneği olarak değil, su yönetimi, ekosistem koruma, yerel toplum katılımı ve enerji güvenliğini içeren sosyobilimsel bir konu olarak da öğretilebilir. Bu yaklaşım öğrencilerin kanıta dayalı düşünme ve karar verme becerilerinin gelişmesine katkı sağlar (Sadler, 2004; Zeidler, 2014).

Kutu 5.4. Sınıf içi etkinlik önerisi: Mini su türbini modeli

Etkinlik Aşaması	Açıklama
Amaç	Akan suyun kinetik enerjisinin mekanik enerjiye dönüşümünü gözlemlemek.
Malzemeler	Küçük plastik kaşıklar veya karton kanatlar, şişe kapağı, çubuk, su kabı, basit LED veya mini motor.
Uygulama	Öğrenciler küçük bir su çarkı veya mini türbin modeli tasarlar.
Gözlem	Su debisi değiştirildiğinde türbinin dönme hızı gözlemlenir.
Tartışma	Debi, düşü yüksekliği ve türbin tasarımının üretim üzerindeki etkileri değerlendirilir.
Çevresel bağlantı	Barajların sucul ekosistemler ve balık geçitleri üzerindeki etkileri tartışılır.

Bu etkinlik hidroelektrik enerjinin çalışma ilkesini somutlaştırır. Aynı zamanda öğrencilerin yenilenebilir enerji kaynaklarının avantajlarını ve çevresel etkilerini birlikte değerlendirmelerine yardımcı olur (Kutu 5.4).

5.3.6. Enerji Okuryazarlığı Açısından Değerlendirme

Hidroelektrik enerji, enerji üretimi, su döngüsü, ekosistemler, iklim değişikliği, ekonomik kalkınma ve toplumsal etkiler arasında doğrudan bağlantılar kurduğu için enerji okuryazarlığı açısından güçlü bir öğretim konusudur. Bu bakımdan hidroelektrik enerji, öğrencilerin yalnızca bir enerji teknolojisinin nasıl çalıştığını değil, enerji kararlarının çevresel ve toplumsal sonuçlarını da değerlendirmelerini sağlar.

Enerji okuryazarlığı literatürü, enerji konularının kavramsal bilgiyle sınırlı olmadığını; tutumlar, davranışlar, karar verme ve sorumlu eylemi de içerdiğini vurgular (DeWaters et al., 2013; Ramachandran et al., 2024; Santillán and Cedano, 2023). Hidroelektrik projeler bu çok boyutlu yapıyı somutlaştırmak için uygundur. Öğrenciler bir baraj projesini değerlendirirken elektrik üretimi, su yönetimi, yerel geçim kaynakları, balık göçü, tarım, taşkın kontrolü ve iklim riski gibi birçok değişkeni birlikte dikkate almak zorundadır.

Bu nedenle hidroelektrik enerji sınıfta sistem düşüncesi ve sosyobilimsel akıl yürütme becerilerini geliştirmek için kullanılabilir. Öğrencilerden bir hidroelektrik projedeki farklı paydaşların görüşlerini

karşılaştırmaları, olası çevresel etkileri belirlemeleri ve sürdürülebilir bir çözüm önerisi geliştirmeleri istenebilir. Böylece enerji eğitimi teknik bilgi aktarımının ötesine geçerek bilinçli ve sorumlu yurttaşlık eğitimiyle bütünleşir.

5.4. Güneş, Rüzgâr ve Hidroelektrik Enerjinin Karşılaştırmalı Değerlendirmesi

Güneş, rüzgâr ve hidroelektrik enerji düşük karbonlu elektrik üretimi için önemli kaynaklardır; ancak enerji sistemindeki rolleri aynı değildir. Güneş ve rüzgâr enerjisi değişken üretim özelliklerine sahip olduğu için depolama, esnek şebekeler, talep yönetimi ve farklı kaynaklarla dengeleme gerektirir. Hidroelektrik enerji ise uygun koşullarda, özellikle rezervuarlı veya pompaj depolamalı sistemlerde daha kontrol edilebilir üretim sağlayabilir ve enerji sistemine esneklik katabilir.

Bu üç kaynak değerlendirilirken yalnızca kurulu güç veya üretim miktarı değil; yaşam döngüsü etkileri, arazi ve su kullanımı, ekosistem etkileri, maliyet, yerel koşullar, şebeke altyapısı ve toplumsal kabul de birlikte dikkate alınmalıdır. Bu yaklaşım, Bölüm 2'de geliştirilen enerji kaynaklarını değerlendirme ölçütleriyle uyumludur.

Tablo 5.13, yenilenebilir enerji kaynaklarının tek bir ölçüt üzerinden değerlendirilemeyeceğini göstermektedir. Bir kaynak düşük karbonlu olabilir; ancak yer seçimi, ekosistem etkisi, maliyet, altyapı ve toplumsal kabul karar verme sürecinin ayrılmaz parçalarıdır. Bu nedenle sürdürülebilir enerji planlamasında kaynaklar birbirini tamamlayacak biçimde ele alınmalıdır.

Tablo 5.13. Güneş, rüzgâr ve hidroelektrik enerjinin karşılaştırılması

Ölçüt	Güneş Enerjisi	Rüzgâr Enerjisi	Hidroelektrik Enerji
Üretim karakteri	Gün ışığına ve hava koşullarına bağlı değişken üretim	Rüzgâr hızına ve sürekliliğine bağlı değişken üretim	Su rejimine bağlıdır; bazı sistemlerde üretim daha kontrol edilebilir
Başlıca avantaj	Modüler, yaygın ve hızlı kurulabilir	Büyük ölçekli düşük karbonlu elektrik üretimi sağlayabilir	Elektrik üretimine ek olarak sistem esnekliği ve depolama desteği sağlayabilir
Başlıca sınırlılık	Gece üretim yapmaz; depolama ve şebeke desteği gerektirebilir	Yer seçimi, rüzgâr sürekliliği ve toplumsal kabul önemlidir	Nehir ekosistemleri, su kullanımı ve kuraklık riski dikkatle yönetilmelidir
Çevresel açıdan dikkat gerektiren nokta	Panel üretimi, arazi kullanımı ve geri dönüşüm	Kuş ve yarasa etkileri, gürültü, görsel etki ve deniz ekosistemleri	Akış rejimi, balık göçü, sediment taşınımı ve yerel topluluklar
Enerji okuryazarlığı değeri	Enerji dönüşümü, ölçme, veri analizi ve üretim-tüketim ilişkisi	Aerodinamik, tasarım, yer seçimi ve sosyobilimsel karar verme	Su döngüsü, sistem düşüncesi ve ekosistem-toplum ilişkisi

5.5. Bölüm Özeti ve Tartışma Soruları

Bu bölümde güneş, rüzgâr ve hidroelektrik enerji kaynakları çalışma ilkeleri, kullanım alanları, avantajları, sınırlılıkları, çevresel etkileri ve eğitsel uygulamaları açısından incelenmiştir. Güneş enerjisi fotovoltaik ve güneş termal sistemleri aracılığıyla elektrik ve ısı üretiminde kullanılabilir. Rüzgâr enerjisi, karasal ve deniz üstü uygulamalar yoluyla elektrik üretimi için önemli bir düşük karbonlu seçenektir. Hidroelektrik enerji ise akan veya depolanan suyun enerjisini kullanır ve bazı sistemlerde enerji depolama ile şebeke esnekliği açısından önemli rol oynayabilir.

Bu üç enerji türünün ortak özelliği, fosil yakıt kullanımını azaltma ve düşük karbonlu enerji sistemlerini destekleme potansiyeline sahip olmalarıdır. Ancak hiçbir kaynak tamamen etkisiz değildir. Güneş enerjisinde malzeme üretimi ve geri dönüşüm, rüzgâr enerjisinde yer seçimi ve canlılar üzerindeki etkiler, hidroelektrikte ise su yönetimi ve nehir ekosistemleri dikkatle değerlendirilmelidir. Enerji okuryazarlığı açısından bu kaynaklar, öğrencilerin teknik bilgiyi çevresel, ekonomik ve toplumsal kararlarla ilişkilendirmelerine yardımcı olur.

Tartışma Soruları

1. Güneş enerjisi üretimi neden gün ışığı, mevsim, panel yönelimi ve gölgelenme gibi faktörlere bağlıdır?
2. Fotovoltaik sistemler ile güneş termal sistemleri arasındaki temel farklar nelerdir?
3. Karasal ve deniz üstü rüzgâr enerjisi uygulamaları hangi açılardan farklılaşır?
4. Rüzgâr enerjisi projelerinde yer seçimi neden yalnızca teknik değil, aynı zamanda çevresel ve toplumsal bir karardır?
5. Hidroelektrik santrallerde debi, düşü yüksekliği ve su yönetimi neden önemlidir?
6. Pompaj depolamalı hidroelektrik sistemler güneş ve rüzgâr enerjisini nasıl destekleyebilir?
7. Güneş, rüzgâr ve hidroelektrik enerji kaynakları hangi yollarla birbirini tamamlayabilir?

BÖLÜM 6: JEOTERMAL, DENİZ-OKYANUS VE BİYOENERJİ KAYNAKLARI

Bu bölümde jeotermal enerji, deniz ve okyanus enerjisi ile biyoenerji kaynakları incelenmektedir (Kutu 6.1). Jeotermal enerji çoğunlukla ısıtma, sera yetiştiriciliği ve yerel elektrik üretimiyle; deniz ve okyanus enerjisi kıyı ve ada sistemleriyle; biyoenerji kaynakları ise atık yönetimi, kırsal kalkınma, ulaşım ve endüstriyel uygulamalarla ilişkilidir. Bu nedenle bölüm yalnızca teknik işleyişi değil; çevresel etkileri, hammadde yönetimini, yaşam döngüsü değerlendirmelerini, toplumsal kabulü, yerel kaynak kullanımını, eğitsel uygulamaları ve enerji okuryazarlığını da değerlendirmektedir.

Kutu 6.1. Bu bölümde neler öğrenilecek?

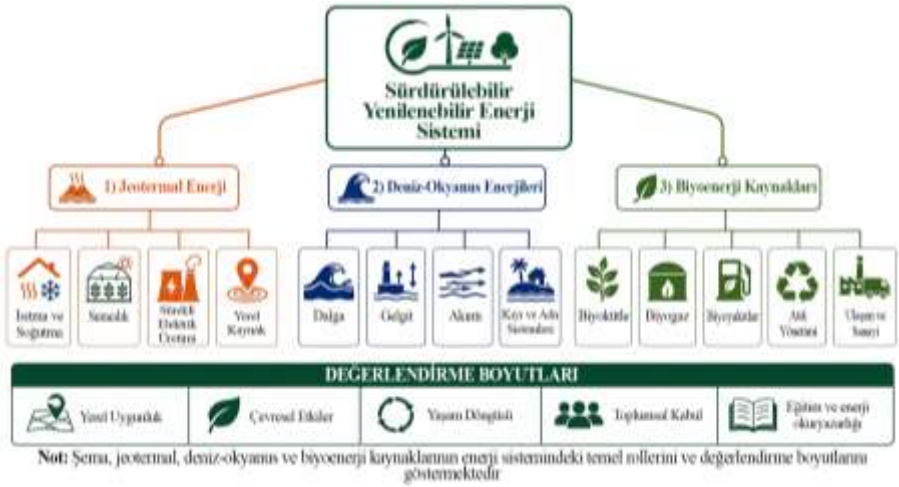
Öğrenme Hedefi
Jeotermal enerjinin oluşumunu, uygulamalarını ve çevresel etkilerini değerlendirmek.
Dalga, gelgit, akıntı, okyanus termal ve tuzluluk gradyanı enerjisinin temel özelliklerini açıklamak.
Biyokütle, biyogaz, biyometan ve biyoyakıtların kullanım alanlarını ve sürdürülebilirlik koşullarını karşılaştırmak.
Yenilenebilir kaynakları hammadde, üretim, kullanım ve atık yönetimi boyutlarıyla birlikte analiz etmek.
Bu kaynakları çevresel, ekonomik, toplumsal ve eğitsel karar verme süreçleriyle ilişkilendirmek.

Tablo 6.1, bu bölümde ele alınan kaynakların yenilenebilir enerji sistemleri içinde farklı roller üstlendiğini göstermektedir. Bu kaynakların sürdürülebilirliği yalnızca yenilenebilir niteliklerine değil; yerel koşullara, teknoloji seçimine, hammadde yönetimine, çevresel planlamaya ve toplumsal kabul süreçlerine de bağlıdır.

Tablo 6.1. Jeotermal, deniz-okyanus ve biyoenerji kaynaklarına genel bakış

Kaynak	Başlıca Kullanım Alanları	Temel Değerlendirme Boyutu
Jeotermal enerji	Elektrik üretimi, ısıtma, sera yetiştiriciliği ve termal kullanım	Kaynak bağımlılığı, yerel çevresel etkiler ve sürdürülebilir rezervuar yönetimi önemlidir.
Deniz-okyanus enerjisi	Dalga, gelgit, akıntı ve kıyı/ada sistemleri	Teknoloji olgunluğu, deniz ekosistemleri ve bakım maliyetleri dikkatle değerlendirilmelidir.
Biyokütle enerjisi	Isı, elektrik, biyogaz ve biyometan üretimi	Sürdürülebilir hammadde, arazi kullanımı ve atık yönetimi kritiktir.
Biyoyakıtlar	Ulaşım, sanayi, havacılık ve harmanlanmış yakıtlar	Gıda-arazi rekabeti, yaşam döngüsü emisyonları ve ileri hammaddelerin kullanımı önemlidir.

Şekil 6.1, jeotermal, deniz-okyanus ve biyoenerji kaynaklarının yenilenebilir enerji sistemleri içindeki farklı rollerini göstermektedir. Bu kaynakların aynı biçimde kullanılmadığını ortaya koyar: Jeotermal enerji çoğunlukla ısı ve yerel elektrik üretimiyle, deniz-okyanus enerjisi kıyı ve ada sistemleriyle, biyoenerji kaynakları ise atık yönetimi, kırsal kalkınma, ulaşım ve endüstriyel uygulamalarla ilişkilidir.



Şekil 6.1. Jeotermal, deniz-okyanus ve biyoenerji kaynaklarının enerji sistemindeki rolleri.

6.1. Jeotermal Enerji

Jeotermal enerji, yerkabuğunun altında depolanan ısı enerjisinden yararlanılarak elde edilen yenilenebilir bir enerji kaynağıdır. Dünya'nın içindeki doğal ısı, sıcak su, buhar, sıcak kayaçlar ve yeraltı akışkanları aracılığıyla yüzeye yakın bölgelere taşınabilir (Igwe, 2021). Bu ısı elektrik üretimi, bina ısıtma ve soğutma, sera yetiştiriciliği, termal turizm ve bazı endüstriyel süreçler için kullanılabilir (DOE, 2026e; IEA, 2024).

Jeotermal enerjinin önemli bir özelliği, güneş ve rüzgâr enerjisinden farklı olarak doğrudan hava koşullarına bağlı olmamasıdır. Uygun jeotermal kaynaklara sahip bölgelerde yıl boyunca sürekli ısı veya elektrik üretimi sağlanabilir. Bu nedenle jeotermal enerji, enerji sistemleri içinde güvenilir ve yerel bir yenilenebilir kaynak olarak değerlendirilebilir (IEA, 2024). Ancak jeotermal enerji her bölgede aynı ölçüde kullanılamaz. Jeotermal kaynakların sıcaklığı, derinliği, akışkan miktarı, jeolojik yapısı ve ekonomik uygulanabilirliği proje başarısını belirler. Ayrıca jeotermal projeler yeraltı akışkanı yönetimi, reinjeksiyon, gaz emisyonları, mineral çökelmesi, su kullanımı ve yerel çevresel etkiler açısından dikkatli değerlendirme gerektirir (DOE, 2026e; IEA, 2024).

Tablo 6.2, jeotermal enerjinin başlıca avantajlarını, sınırlılıklarını ve çevresel değerlendirme boyutlarını özetlemektedir.

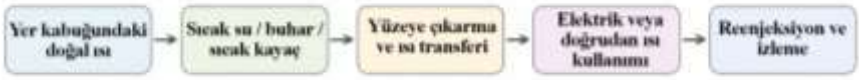
Tablo 6.2. Jeotermal enerjinin başlıca avantajları ve sınırlılıkları

Boyut	Avantaj	Sınırlılık
Kaynak	Yerkabuğundaki doğal ısıyı kullanır.	Yüksek potansiyel her bölgede bulunmaz.
Süreklilik	Uygun kaynakların bulunduğu yerlerde yıl boyunca enerji sağlayabilir.	Kaynak yönetimi doğru yapılmazsa rezervuar performansı düşebilir.
Kullanım alanı	Elektrik, ısıtma, soğutma, sera yetiştiriciliği ve termal turizm için kullanılabilir.	Kullanım biçimi kaynak sıcaklığına ve jeolojik koşullara bağlıdır.
Çevresel etki	Fosil yakıtlardan daha düşük sera gazı emisyonlarına sahip olabilir.	Yeraltı akışkanları, gaz salımları ve mineral içerikleri yönetilmelidir.
Enerji güvenliği	Yerel kaynakların kullanımını destekler.	İlk arama, sondaj ve yatırım maliyetleri yüksek olabilir.
Arazi kullanımı	Güneş ve rüzgâr enerjisine göre daha az yüzey alanı gerektirebilir.	Sondaj, boru hatları ve tesis altyapısı özel planlama gerektirir.

6.1.1. Jeotermal Enerjinin Oluşumu ve Çalışma İlkesi

Dünya'nın iç kısımlarında yüksek sıcaklıklar bulunur. Bu ısı, kayaçlar ve yeraltı akışkanları yoluyla yüzeye yakın bölgelere taşınabilir. Yerkabuğundaki kırıklar, fay hatları ve geçirgen kayaçlar sıcak su veya buharın hareket etmesini sağlar. Bu nedenle jeotermal kaynaklar genellikle tektonik açıdan aktif bölgelerde, fay hatları çevresinde veya volkanik alanlarda daha belirgindir (AGIC Energy, 2024; Igwe, 2021).

Jeotermal sistemlerde yeraltından çıkarılan sıcak su veya buhar doğrudan ısıtma için kullanılabilir ya da türbinleri çalıştırarak elektrik üretimini sağlayabilir. Kullanılmış akışkanın yeniden yeraltına basılması süreci reinjeksiyon olarak adlandırılır. Reinjeksiyon rezervuar basıncının korunmasına yardımcı olur ve jeotermal kaynağın daha sürdürülebilir kullanımını destekler (DOE, 2026e).



Şekil 6.2. Jeotermal enerjide temel enerji dönüşüm süreci.

Şekil 6.2, jeotermal enerjinin yeraltı ısı kaynaklarından elektrik, ısıtma veya doğrudan termal uygulamalara dönüşüm sürecini göstermektedir. Ayrıca jeotermal enerjinin sıcak su veya buharı yüzeye çıkarmakla sınırlı olmadığını ortaya koyar. Sürdürülebilir bir jeotermal sistemde kaynak koruma, akışkan yönetimi, reinjeksiyon ve çevresel izleme birlikte uygulanmalıdır.

6.1.2. Jeotermal Enerjinin Uygulamaları

Jeotermal enerji farklı sıcaklık aralıklarında farklı amaçlarla kullanılabilir. Yüksek sıcaklıklı kaynaklar elektrik üretimi için daha uygundur. Orta ve düşük sıcaklıklı kaynaklar doğrudan ısıtma, bölgesel ısıtma, sera yetiştiriciliği, su ürünleri yetiştiriciliği, termal turizm ve bazı endüstriyel süreçlerde kullanılabilir.

Jeotermal ısı pompaları, daha düşük sıcaklıklı yeraltı koşullarını bina ısıtma ve soğutması için de kullanabilir. Bu sistemler, belirli bir derinlikten sonra yerin görece sabit sıcaklığından yararlanır. Kışın binaları ısıtmak için yeraltından ısı alınır; yazın ise binalardaki fazla ısı yeraltına aktarılabilir (DOE, 2026e). Tablo 6.3, jeotermal enerjinin başlıca kullanım alanlarını sunmakta ve jeotermal kaynakların yalnızca elektrik üretimini değil, ısıtma, sera yetiştiriciliği, termal turizm ve bazı endüstriyel süreçleri de destekleyebileceğini göstermektedir.

Tablo 6.3. Jeotermal enerjinin uygulamaları ve elektrik üretim teknolojileri

Kullanım/Teknoloji	Açıklama	Uygun Durum / Dikkat Gerektiren Nokta
Doğrudan ısı kullanımı	Sıcak suyun bölgesel ısıtma, sera yetiştiriciliği, su ürünleri, termal turizm ve bazı endüstriyel süreçlerde kullanılması.	Orta ve düşük sıcaklıklı kaynaklar için uygundur; su kimyası ve reinjeksiyon planlanmalıdır.
Jeotermal ısı pompası	Yerin görece sabit sıcaklığının bina ısıtma ve soğutmasında kullanılması.	Bina ölçeğinde enerji verimliliği sağlar; kurulum tasarımı ve zemin koşulları önemlidir.
Kuru buhar santrali	Yeraltından gelen buharı doğrudan türbini çalıştırmak için kullanır.	Doğal buhar içeren yüksek sıcaklıklı kaynaklar gerektirir.
Flaş buhar santrali	Yüzeyde buhara dönüşen yüksek basınçlı sıcak suyu kullanır ve türbini çalıştırır.	Yüksek sıcaklık ve basınç gerektirir; akışkan yönetimi önemlidir.
İkili çevrim santrali	Jeotermal ısıyı buharlaşan ikincil bir akışkana aktarır ve türbini çalıştırır.	Orta sıcaklıklı kaynakların kullanılmasına olanak tanır.
Geliştirilmiş jeotermal sistemler	Sıcak kuru kayaçlardan ısı elde etmek için mühendislik yöntemleri kullanır.	Potansiyeli genişletebilir; ancak teknik, ekonomik ve mikro-sismisite riskleri değerlendirilmelidir.

Şekil 6.3. Sıcaklık düzeyine göre jeotermal enerjinin başlıca uygulamaları.

Şekil 6.3, jeotermal enerjinin kaynak sıcaklığına, yerel talebe, altyapıya ve ekonomik uygulanabilirliğe bağlı olarak farklı kullanım alanlarına sahip olduğunu göstermektedir. Ayrıca jeotermal enerjinin elektrik üretimiyle sınırlı olmadığını; birçok bölgede doğrudan ısı uygulamalarının jeotermal kaynakların en verimli ve sürdürülebilir kullanımı olabileceğini ortaya koymaktadır.

6.1.3. Jeotermal Santral Türleri

Jeotermal elektrik üretiminde kullanılan teknoloji, kaynağın sıcaklık ve basıncına ve yeraltı akışkanının özelliklerine göre değişir. Genel olarak üç ana jeotermal santral türü vardır: kuru buhar santralleri, flaş buhar santralleri ve ikili çevrim santralleri (EIA, 2022a; Sharmin et al., 2023).

Kuru buhar santralleri, yeraltından doğrudan gelen buharı türbinlere göndererek elektrik üretir. Flaş buhar santralleri, yüksek basınçlı sıcak suyun yüzeye çıkarıldıktan sonra basınç düşüşüyle kısmen buhara dönüşmesi ilkesine dayanır. İkili çevrim santralleri ise jeotermal akışkanın ısısını daha düşük kaynama noktasına sahip ikincil bir akışkana aktararak elektrik üretir.

Geliştirilmiş jeotermal sistemler, doğal geçirgenliği veya akışkanı sınırlı olan sıcak kayaçlardan enerji elde etmeyi amaçlayan daha yeni teknolojilerdir. Bu sistemler gelecekte jeotermal enerjinin coğrafi kullanım alanını genişletebilir; ancak dikkatli teknik, ekonomik ve çevresel değerlendirme gerektirir (IEA, 2024).

6.1.4. Jeotermal Enerjinin Çevresel Etkileri

Jeotermal enerji genel olarak fosil yakıtlara kıyasla daha düşük sera gazı emisyonlarına sahiptir. Elektrik üretimi veya doğrudan ısı kullanımı sırasında kömür, petrol ya da doğal gaz yakılması gerekmediği için hava kirliliği ve karbon emisyonları azaltılabilir (Idroes et al., 2024). Ayrıca uygun koşullarda jeotermal tesisler yıl boyunca kesintisiz enerji sağlayabilir (DOE, 2026e; IEA, 2024).

Ancak jeotermal enerjinin çevresel etkileri sıfır değildir. Yeraltından çıkarılan sıcak su veya buhar çözünmüş gazlar ve mineraller içerebilir. Bölgenin jeolojik yapısına bağlı olarak hidrojen sülfür, karbondioksit, bor, arsenik veya çeşitli çözünmüş mineraller farklı düzeylerde bulunabilir (Idroes et al., 2024). Bu nedenle jeotermal akışkanların yüzey sularına, toprağa veya atmosfere kontrolsüz biçimde karışmasına izin verilmemelidir.

Reinjeksiyon, jeotermal projelerin çevresel sürdürülebilirliği için kritik bir uygulamadır. Kullanılmış jeotermal akışkanın tekrar yeraltına basılması rezervuar basıncının korunmasına yardımcı olur ve olası yüzey kirliliği risklerini azaltır. Ancak reinjeksiyonun da uygun jeolojik koşullara göre planlanması gerekir.

Bazı jeotermal projeler mikro-sismisite, yani küçük ölçekli yer hareketleri içerebilir. Bu risk özellikle derin sondaj ve geliştirilmiş jeotermal sistemlerde dikkate alınmalıdır. Ayrıca sondaj faaliyetleri, boru hatları, tesis alanları ve su kullanımı yerel çevresel etkiler yaratabilir. Bu nedenle jeotermal projelerde çevresel etki değerlendirmesi, sürekli izleme ve yerel topluluklarla iletişim önemlidir. Tablo 6.4, jeotermal enerjinin rezervuar yönetimi, reinjeksiyon, gaz emisyonları, su kullanımı ve yerel çevresel etkiler dâhil olmak üzere başlıca çevresel etkilerini ve sürdürülebilirlik koşullarını özetlemektedir.

Tablo 6.4. Jeotermal enerjinin çevresel avantajları ve yönetim gerektiren konular

Çevresel Boyut	Avantaj	Dikkat Gerektiren Nokta
Sera gazı emisyonları	Fosil yakıtlardan daha düşük karbonlu enerji sağlayabilir.	Kaynağa bağlı olarak CO_2 ve diğer gaz salımları izlenmelidir.
Hava kalitesi	Fosil yakıt yanması gerekmediği için hava kirleticileri azalabilir.	Hidrojen sülfür gibi gazlar kontrol edilmelidir.
Su yönetimi	Reinjeksiyon yoluyla kaynak sürdürülebilirliği desteklenebilir.	Akışkanların yüzey sularına karışması önlenmelidir.
Toprak ve mineral etkileri	Kapalı sistemlerde etkiler azaltılabilir.	Bor, arsenik ve diğer mineraller dikkatle yönetilmelidir.
Arazi kullanımı	Görece sınırlı yüzey alanı gerektirebilir.	Sondaj alanları, boru hatları ve tesis altyapısı planlanmalıdır.
Jeolojik etki	Doğru planlamayla güvenli işletme sağlanabilir.	Bazı projelerde mikro-sismisite riski izlenmelidir.
Toplumsal etki	Yerel ısıtma, sera yetiştiriciliği ve istihdama katkı sağlayabilir.	Koku, gaz salımları ve yerel çevresel kaygılar dikkate alınmalıdır.

6.1.5. Jeotermal Enerjinin Eğitimde Kullanımı

Jeotermal enerji, öğrencilerin Dünya'nın iç yapısını, ısı transferini, enerji dönüşümünü, yenilenebilir enerjiyi ve çevresel sürdürülebilirliği birlikte öğrenebilecekleri uygun bir örnektir. Bu konu fen, coğrafya, fizik, kimya ve çevre eğitimiyle ilişkilendirilebilir.

Sınıfta jeotermal enerji öğretilirken basit deneyler ve görseller kullanılabilir. Örneğin sıcak su, buhar, ısı iletimi ve yalıtım üzerinden jeotermal enerjinin temel mantığı gösterilebilir. Ayrıca harita çalışmaları, öğrencilerin fay hatları, volkanik alanlar, sıcak su kaynakları ve jeotermal potansiyel arasındaki ilişkiyi incelemelerine yardımcı olabilir.

Bu tür etkinlikler, enerji okuryazarlığının yalnızca kavramsal bilgiyle değil; gözlem, veri yorumlama, mekânsal düşünme ve çevresel karar verme becerileriyle de geliştiğini gösterir. Enerji konularının sosyobilimsel niteliği dikkate alındığında öğrencilerin teknoloji, çevre ve toplum arasındaki ilişkileri tartışmaları gerekir (Sadler, 2004; Zeidler, 2014).

Kutu 6.2. Sınıf içi etkinlik önerisi: Jeotermal kaynak haritası hazırlama

Etkinlik Aşaması	Açıklama
Amaç	Jeotermal kaynaklar ile jeolojik yapı arasındaki ilişkiyi anlamak.
Malzemeler	Türkiye veya Avrupa haritası, fay hattı haritası, renkli kalemler ve araştırma notları.
Uygulama	Öğrenciler jeotermal kaynakların yoğunlaştığı bölgeleri harita üzerinde işaretler.
Gözlem	Kaynakların fay hatları, volkanik alanlar veya tektonik bölgelerle ilişkisi tartışılır.
Tartışma	Öğrenciler jeotermal enerjinin neden her bölgede aynı düzeyde kullanılamadığını değerlendirir.
Çevresel bağlantı	Reinjeksiyon, gaz salımları ve su yönetimi gibi çevresel konular ele alınır.

Bu etkinlik, öğrencilerin jeotermal enerjiyi yalnızca teknik bir enerji konusu olarak değil; coğrafya, çevre ve sürdürülebilirlik ilişkisi içinde değerlendirmelerine yardımcı olur (Kutu 6.2).

6.1.6. Enerji Okuryazarlığı Açısından Değerlendirme

Jeotermal enerji, enerji okuryazarlığı açısından güçlü bir öğretim konusudur. Enerji kaynağının fiziksel temelini, teknolojik dönüşüm sürecini, çevresel etkileri, yerel coğrafi koşulları ve toplumsal kabulü birlikte tartışmaya olanak tanır. Bu bakımdan jeotermal enerji öğrencilerin enerji sistemlerini tek boyutlu değil, çok boyutlu değerlendirmelerine yardımcı olabilir.

Enerji okuryazarlığı literatürü, enerji konularının yalnızca bilgi düzeyinde değil; tutumlar, davranışlar, karar verme, sürdürülebilirlik farkındalığı ve sorumlu eylem yoluyla da ele alınması gerektiğini vurgular (DeWaters et al., 2013; Ramachandran et al., 2024; Santillán and Cedano, 2023). Jeotermal enerji örneğinde öğrenciler, bir kaynağın yenilenebilir olmasının onu otomatik olarak çevresel etkilerden arınmış hâle getirmediğini; reinjeksiyon, akışkan yönetimi, gaz salımları ve yerel kabulün de dikkate alınması gerektiğini görebilir.

Bu nedenle jeotermal enerji eğitimi harita okuma, veri değerlendirme, çevresel etki tartışması, kaynak yönetimi ve yerel karar alma süreçleriyle ilişkilendirilebilir. Böyle bir yaklaşım öğrencilerin enerji teknolojilerini yalnızca teknik araçlar olarak değil, çevresel ve toplumsal sonuçları olan karar alanları olarak anlamalarını destekler.

6.2. Deniz ve Okyanus Enerjisi

Denizler ve okyanuslar büyük yenilenebilir enerji potansiyeline sahip doğal sistemlerdir. Dalga hareketleri, gelgitler, okyanus akıntıları, sıcaklık farkları ve tuzluluk farkları enerji üretimi için kullanılabilir. Bu kaynaklardan elde edilen enerji genel olarak deniz enerjisi, okyanus enerjisi veya deniz kaynaklı yenilenebilir enerji olarak adlandırılır (DOE, 2026f).

Deniz ve okyanus enerjisi henüz güneş, rüzgâr ve hidroelektrik kadar yaygınlaşmamış olsa da uzun vadede enerji çeşitliliğini artırabilecek önemli bir yenilenebilir kaynak olarak değerlendirilmektedir. Bu kaynaklar özellikle uzun kıyı şeritlerine, güçlü dalga rejimlerine veya belirgin gelgit hareketlerine sahip ülkeler için önemli potansiyel sunabilir. Ancak teknoloji maliyetleri, bakım güçlükleri, zorlu deniz koşulları, şebeke bağlantısı ve çevresel izleme gereksinimleri bu alandaki gelişmeyi yavaşlatmaktadır (DOE, 2026f; REN21, 2025).

Deniz üstü rüzgâr enerjisi teknik olarak rüzgâr enerjisinin bir alt türüdür. Ancak deniz alanlarında kurulduğu ve deniz tabanı, kıyı planlaması, balıkçılık, deniz taşımacılığı ve deniz ekosistemleriyle bağlantılı olduğu için deniz kaynaklı yenilenebilir enerji politikaları içinde de tartışılabilir. Bu bölümün temel odağı dalga, gelgit, deniz akıntısı, okyanus termal ve tuzluluk gradyanı enerjisidir; ancak seçilmiş ülke örnekleri değerlendirilirken deniz üstü rüzgâr enerjisine de kısaca değinilmektedir.

Tablo 6.5, deniz ve okyanus enerjisi teknolojilerinin tek bir kaynağa veya sürece dayanmadığını göstermektedir. Bunun yerine dalgalar, gelgitler, akıntılar, sıcaklık farkları ve tuzluluk gradyanları gibi farklı fiziksel süreçlerden yararlanılır. Bu nedenle deniz enerjisi projeleri dalga yüksekliği, gelgit aralığı, akıntı hızı, deniz derinliği, kıyı yapısı, çevresel hassasiyetler, mühendislik gereksinimleri ve şebeke bağlantısı birlikte dikkate alınarak değerlendirilmelidir.

Tablo 6.5. Deniz ve okyanus enerjisinin başlıca türleri

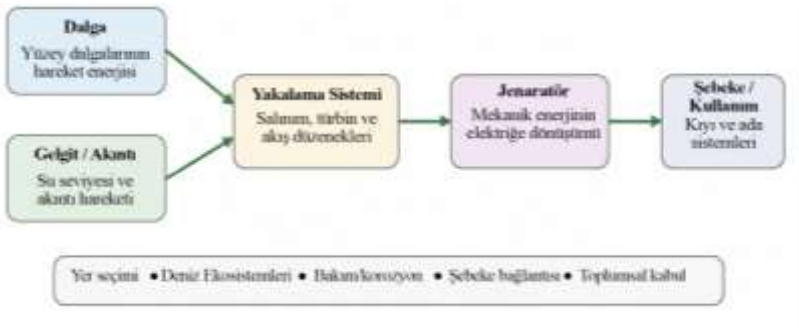
Enerji Türü	Kaynak	Temel Çalışma İlkesi	Gelişme Düzeyi
Dalga enerjisi	Deniz yüzeyindeki dalga hareketleri	Dalgaların yukarı-aşağı veya ileri-geri hareketi mekanik enerjiye dönüştürülür.	Gelişmekte olan teknoloji
Gelgit enerjisi	Ay ve Güneş'in kütleçekim etkilerinin neden olduğu gelgitler	Su seviyesi değişimleri veya gelgit akıntıları türbinleri çalıştırır.	Bazı ticari ve pilot uygulamalar vardır.
Deniz akıntısı enerjisi	Sürekli veya düzenli deniz akıntıları	Akıntıların kinetik enerjisi su altı türbinleriyle elektriğe dönüştürülür.	Pilot ve erken ticari aşama
Okyanus termal enerjisi	Sıcak yüzey suyu ile soğuk derin su arasındaki sıcaklık farkı	Sıcaklık farkını kullanan bir çevrim sistemiyle elektrik üretilebilir.	Sınırlı ve deneysel uygulamalar
Tuzluluk gradyanı enerjisi	Tatlı su ile deniz suyu arasındaki tuzluluk farkı	Nehir ağızlarındaki ozmotik basınç farkları kullanılır.	Araştırma ve pilot aşama
Deniz üstü rüzgâr	Deniz üzerindeki rüzgârlar	Denizde kurulan rüzgâr türbinleri elektrik üretir.	Hızla gelişen ticari teknoloji

6.2.1. Deniz ve Okyanus Enerjisinin Çalışma İlkesi

Deniz ve okyanus enerjisinde temel amaç, su kütlelerinin hareketinden veya fiziksel özelliklerinden yararlanarak elektrik üretmektir. Dalga enerjisi deniz yüzeyindeki dalga hareketlerini; gelgit enerjisi su seviyesindeki düzenli değişimleri veya gelgit akıntılarını; deniz akıntısı enerjisi ise suyun yatay hareketini kullanır (Offshore Energy, 2026; Tsamenyi and Herriman, 1998). Okyanus termal enerjisi sıcaklık farklarından, tuzluluk gradyanı enerjisi ise tuzlu su ile tatlı su arasındaki yoğunluk ve basınç farkından yararlanır (DOE, 2026f).

Dalga ve akıntı sistemleri çoğunlukla mekanik hareketi elektrik enerjisine dönüştüren türbinlere, jeneratörlere veya hidrolik sistemlere dayanır. Gelgit enerjisinde iki temel yöntem öne çıkar: set veya baraj benzeri yapılarla gelgit aralığını kullanmak ve su altı türbinleriyle gelgit akıntılarından yararlanmak. Gelgit hareketleri Dünya, Ay ve Güneş arasındaki kütleçekim ilişkilerinden kaynaklanır; dar boğaz veya kanallarda gelgit akıntılarının hızlanması elektrik üretimi için uygun koşullar yaratabilir (PNNL, 2026).

Şekil 6.4, deniz ve okyanus enerjisinin temel dönüşüm sürecini göstermektedir. Dalgalar, gelgitler, akıntılar, sıcaklık farkları ve tuzluluk gradyanları gibi farklı okyanus temelli fiziksel hareketlerin veya gradyanların kullanılabilir elektriğe dönüştürülebileceğini ortaya koyar. Bu teknolojiler farklı doğal süreçlere dayansa da ortak amaçları okyanus enerjisini elektrik enerjisine dönüştürmektir.



Şekil 6.4. Deniz ve okyanus enerjisinde temel enerji dönüşüm süreci.

6.2.2. Dalga Enerjisi

Dalga enerjisi, deniz yüzeyinde rüzgârların oluşturduğu dalga hareketinden yararlanarak elektrik üretmeyi amaçlayan yenilenebilir bir enerji türüdür. Dalgalar su yüzeyinde yukarı-aşağı ve ileri-geri hareketler oluşturur. Dalga enerjisi cihazları bu hareketi yakalayarak önce mekanik enerjiye, ardından elektrik enerjisine dönüştürür (Guo and Ringwood, 2021).

Dalga enerjisi özellikle uzun kıyı şeritlerine ve güçlü dalga rejimlerine sahip bölgelerde önemlidir. Açık okyanusa bakan kıyılar, ada ülkeleri ve Atlantik kıyıları dalga enerjisi açısından daha avantajlı olabilir. Ancak dalga enerjisi teknolojilerinin deniz koşullarına dayanıklı olması gerekir. Fırtınalar, tuzlu su korozyonu, bakım zorlukları ve cihazların kıyıya veya şebekeye bağlanması bu teknolojinin başlıca zorlukları arasındadır.

Dalga enerjisi cihazları farklı tasarımlara sahip olabilir. Bazı sistemler su yüzeyinin salınım hareketini, bazıları dalgaların kıyıya çarpma basıncını, bazıları ise suyun ileri-geri hareketini kullanır. Bu çeşitlilik, dalga enerjisi teknolojisinin hâlâ gelişmekte olduğunu ve farklı kıyı koşulları için farklı çözümlerin denendiğini göstermektedir.

6.2.3. Gelgit ve Deniz Akıntısı Enerjisi

Gelgit enerjisi, Dünya, Ay ve Güneş arasındaki kütleçekim kuvvetlerinin neden olduğu deniz suyunun düzenli yükselme ve alçalma hareketinden yararlanır (Chowdhury et al., 2021). Gelgitler öngörülebilir doğal olaylardır; bu açıdan gelgit enerjisi güneş ve rüzgâr gibi daha değişken kaynaklara kıyasla daha kolay tahmin edilebilir (PNNL, 2026).

Gelgit enerjisi iki temel şekilde kullanılabilir. İlk yöntem, yüksek gelgit aralığına sahip koy veya haliçlerde set ya da baraj benzeri yapılar kullanarak su seviyesi farkından elektrik üretmektir. İkinci yöntem ise gelgit akıntılarının güçlü olduğu boğaz veya dar kanallarda su altı türbinleri kullanmaktır. Bu türbinler görünüş olarak rüzgâr türbinlerine benzese de hava yerine su akıntılarıyla döndürülür.

Deniz akıntısı enerjisi, gelgitlerden bağımsız olarak sürekli veya düzenli deniz akıntılarından yararlanır. Bu tür projeler planlanırken akıntı hızı,

su derinliği, deniz tabanı yapısı, deniz trafiği ve ekosistemler dikkate alınmalıdır.

Gelgit enerjisinin en önemli avantajı öngörülebilir olmasıdır. Ancak uygun doğal koşullar her yerde bulunmaz. Bu nedenle gelgit enerjisi yalnızca uygun gelgit aralığına, kıyı yapısına ve şebeke bağlantı olanaklarına sahip bölgelerde uygulanabilen özel bir yenilenebilir enerji türü olarak değerlendirilmelidir. Dalga, gelgit ve akıntı enerjisi arasındaki kaynak temeli, avantajlar, sınırlılıklar ve planlama gereksinimleri bakımından temel farklar Tablo 6.6'da özetlenmiştir.

Tablo 6.6. Dalga, gelgit ve akıntı enerjisinin karşılaştırılması

Teknoloji	Başlıca Kaynak / Çalışma İlkesi	Potansiyel Kullanım	Başlıca Sınırlılık
Dalga enerjisi	Deniz yüzeyindeki dalga hareketi mekanik enerjiye ve ardından elektriğe dönüştürülür.	Açık okyanus kıyıları, ada sistemleri ve güçlü dalga rejimleri.	Fırtınalar, korozyon, bakım ve şebeke bağlantısı zorlukları.
Gelgit seti veya lagün	Gelgit sırasında oluşan su seviyesi farklarını kullanır.	Yüksek gelgit aralığına sahip koylar ve haliçler.	Sediment taşınımı, ekosistem etkileri ve balık geçişi.
Gelgit akıntısı türbini	Gelgit akıntılarının kinetik enerjisini su altı türbinleriyle kullanır.	Dar boğazlar, kanallar ve güçlü akıntı bölgeleri.	Deniz yaşamı, balıkçılık, deniz taşımacılığı ve bakım.
Deniz akıntısı enerjisi	Sürekli veya düzenli akıntıların kinetik enerjisini kullanır.	Güçlü ve düzenli deniz akıntılarının bulunduğu alanlar.	Deniz tabanı bağlantısı, bakım ve çevresel izleme.
Okyanus termal enerjisi	Sıcak yüzey suyu ile soğuk derin su arasındaki sıcaklık farkını kullanır.	Tropikal bölgeler ve ada sistemleri.	Sınırlı bölgesel potansiyel ve yüksek altyapı ihtiyacı.
Tuzluluk gradyanı enerjisi	Tatlı su ve tuzlu su arasındaki yoğunluk/basınç farkını kullanır.	Nehir ağızları ve uygun kıyı alanları.	Araştırma ve pilot aşama; sınırlı teknoloji olgunluğu.

6.2.4. Okyanus Termal Enerjisi ve Tuzluluk Gradyanı Enerjisi

Okyanus termal enerjisi, okyanusların sıcak yüzey suları ile daha soğuk derin suları arasındaki sıcaklık farkından yararlanır. Bu teknoloji tropikal bölgelerde daha uygundur; çünkü yüzey ve derin su arasındaki sıcaklık farkı bu alanlarda daha belirgindir. Okyanus termal enerji sistemlerinde bu sıcaklık farkı bir çevrim sistemi aracılığıyla elektrik üretmek için kullanılabilir (DOE, 2026f).

Tuzluluk gradyanı enerjisi, nehir ağızları veya deltalar gibi tatlı su ile tuzlu suyun karşılaştığı yerlerde oluşan tuzluluk farkından yararlanır. Tatlı su ile deniz suyu arasındaki ozmotik basınç farkı enerji üretimi için kullanılabilir. Ancak bu teknoloji hâlen araştırma ve pilot uygulama aşamasındadır.

Bu teknolojiler, denizlerin yalnızca hareket açısından değil, sıcaklık ve kimyasal özellikler açısından da enerji potansiyeline sahip olduğunu göstermektedir. Bununla birlikte ekonomik uygulanabilirlik, teknolojik olgunluk ve çevresel değerlendirme süreçleri hâlen gelişmektedir.

6.2.5. Deniz ve Okyanus Enerjisinin Çevresel Etkileri

Deniz ve okyanus enerjisi teknolojileri, elektrik üretimi sırasında fosil yakıt yakmadıkları için sera gazı emisyonlarını azaltma potansiyeline sahiptir. Uygun biçimde planlandığında dalga, gelgit ve akıntı enerjisi sistemleri düşük karbonlu elektrik üretimine katkı sağlayabilir. Bununla birlikte bu teknolojilerin çevresel etkileri sıfır değildir.

Deniz enerjisi projeleri deniz ekosistemlerini, balıkları, deniz memelilerini, kuşları, deniz tabanı organizmalarını, kıyı kullanımını, balıkçılığı ve deniz taşımacılığını etkileyebilir. Su altı türbinleri bazı deniz canlılarının hareket alanlarını etkileyebilir. İnşaat ve bakım süreçleri gürültü, titreşim ve deniz tabanı bozulması yaratabilir. Kablolar ve altyapı sistemleri deniz tabanı habitatlarını değiştirebilir.

Bazı etkiler teknoloji türüne göre de değişir. Gelgit setleri su akışını, sediment taşınımını ve ekosistem dinamiklerini etkileyebilir. Dalga enerjisi cihazları kıyı dinamiklerini veya yerel deniz kullanımını etkileyebilir. Deniz üstü rüzgâr projeleri kuş göç yolları, deniz memelileri, balıkçılık ve görsel etki açısından değerlendirilmelidir.

Deniz ve okyanus enerjisi projelerinde çevresel etkileri azaltmak için iyi yer seçimi, deniz ekosistemi çalışmaları, balıkçılık ve turizm faaliyetleriyle uyum, deniz koruma alanlarının dikkate alınması ve sürekli izleme önemlidir. Bu nedenle deniz enerjisi projeleri yalnızca mühendislik bakış açısıyla değil, deniz ekolojisi ve kıyı yönetimi açısından da planlanmalıdır.

Tablo 6.7, deniz ekosistemleri, seyrüsefer, bakım ve kıyı planlaması dâhil olmak üzere deniz ve okyanus enerjisi teknolojilerinin başlıca çevresel etkilerini ve planlama gereksinimlerini özetlemektedir.

Tablo 6.7. Deniz ve okyanus enerjisinin çevresel etkileri ve planlama koşulları

Çevresel Boyut	Avantaj	Dikkat Gerektiren Nokta
Sera gazı emisyonları	Elektrik üretimi sırasında fosil yakıt yanması gerektirmez.	Cihaz üretimi, kurulumu ve bakımı yaşam döngüsü etkilerine sahiptir.
Hava kalitesi	Hava kirletici emisyonları düşüktür.	Kıyı ve liman faaliyetleri çevresel yönetim gerektirebilir.
Deniz ekosistemi	Düşük karbonlu enerjiyle iklim baskısını azaltabilir.	Balıklar, deniz memelileri, kuşlar ve deniz tabanı organizmaları etkilenebilir.
Kıyı kullanımı	Yerel enerji üretimi sağlayabilir.	Balıkçılık, turizm, deniz taşımacılığı ve kıyı peyzajı dikkate alınmalıdır.

Çevresel Boyut	Avantaj	Dikkat Gerektiren Nokta
Gürültü ve titreşim	Bazı sistemlerde işletme etkileri düşük olabilir.	İnşaat ve bakım sırasında su altı gürültüsü oluşabilir.
Deniz tabanı	Bazı yüzer sistemlerde deniz tabanına müdahale sınırlı olabilir.	Demirleme, kablo ve temel sistemleri habitatları etkileyebilir.
Toplumsal kabul	Kıyı toplulukları için ekonomik fırsatlar sağlayabilir.	Yerel halk, balıkçılar ve turizm sektörüyle iletişim önemlidir.

6.2.6. Deniz ve Okyanus Enerjisinin Eğitimde Kullanımı

Deniz ve okyanus enerjisi; yenilenebilir enerji, su hareketleri, Ay-Güneş-Dünya ilişkisi, dalga oluşumu, kıyı ekosistemleri ve teknoloji tasarımının birlikte öğrenilebileceği uygun bir örnektir. Bu konu fen, fizik, coğrafya, çevre eğitimi ve STEM etkinlikleriyle ilişkilendirilebilir.

Kutu 6.3. Sınıf içi etkinlik önerisi: Dalga enerjisi modeli tasarlama

Etkinlik Aşaması	Açıklama
Amaç	Dalga hareketinden enerji elde etme fikrini bir model üzerinden anlamak.
Malzemeler	Şeffaf su kabı, küçük yüzen nesne, pipet veya çubuk, basit kaldıraç düzeneği ve gözlem çizelgesi.
Uygulama	Öğrenciler su yüzeyindeki dalga hareketiyle hareket eden küçük bir mekanizma tasarlar.
Gözlem	Dalga yüksekliği ve frekansı değiştiğinde modelin hareketi incelenir.
Tartışma	Öğrenciler dalga enerjisi cihazlarının neden dayanıklı ve esnek tasarlanması gerektiğini değerlendirir.
Çevresel bağlantı	Deniz yaşamı, kıyı kullanımı ve balıkçılık üzerindeki olası etkiler tartışılır.

Sınıfta dalga enerjisi küçük bir su kabında oluşturulan dalga hareketleriyle, gelgit enerjisi ise Ay ile Dünya arasındaki kütleçekim ilişkisi üzerinden açıklanabilir. Öğrenciler basit model türbinler, dalga şamandıraları veya kıyı planlama haritaları kullanarak deniz enerjisi teknolojilerinin nasıl çalıştığını tartışabilir.

Bu etkinlik, öğrencilerin deniz enerjisini yalnızca kuramsal bir kavram olarak değil; hareket, tasarım, çevre ve sürdürülebilirlik ilişkisi içinde anlamalarına yardımcı olur (Kutu 6.3).

6.2.7. Enerji Okuryazarlığı Açısından Değerlendirme

Deniz ve okyanus enerjisi, enerji okuryazarlığı açısından önemli bir öğrenme alanıdır. Yenilenebilir enerji teknolojilerinin yalnızca teknik çözümler olarak değil; kıyı ekosistemleri, balıkçılık, turizm, deniz taşımacılığı, yerel toplum katılımı ve enerji güvenliğiyle birlikte ele alınmasını gerektirir. Bu bakımdan deniz enerjisi, öğrencilerin enerji sistemlerini çok boyutlu değerlendirmelerine yardımcı olabilir.

Enerji okuryazarlığı literatürü, enerji bilgisinin tutumlar, davranışlar, karar verme ve sorumlu eylemle birlikte ele alınması gerektiğini vurgular (DeWaters et al., 2013; Ramachandran et al., 2024; Santillán and Cedano, 2023). Rüzgâr enerjisi bu açıdan iyi bir örnektir: Bir bölgeye rüzgâr türbini kurulup kurulmayacağı sorusu teknik, ekonomik, çevresel ve toplumsal gerekçelerin birlikte tartışılmasını gerektirir.

Bu nedenle deniz ve okyanus enerjisi, sınıfta sosyobilimsel tartışmalar için güçlü bir örnek sunabilir. Öğrenciler bir kıyı bölgesinde dalga enerjisi veya deniz üstü rüzgâr projesi yapılıp yapılmaması gerektiğini enerji talebi, çevresel etki, turizm, balıkçılık, maliyet ve yerel kabulü dikkate alarak tartışabilir. Bu tür etkinlikler, enerji teknolojilerine ilişkin kararların yalnızca bilimsel bilgi değil; etik, toplumsal ve çevresel değerlendirme de gerektirdiğini gösterir (Sadler, 2004; Zeidler, 2014).

6.3. Biyoenerji Kaynakları: Biyokütle ve Biyoyakıtlar

Biyoenerji, bitkisel, hayvansal, tarımsal, ormancılık, endüstriyel veya kentsel kökenli organik malzemelerden enerji elde edilmesini ifade eder (Seminario-Córdova and Rojas-Ortega, 2023). Biyokütle doğrudan ısı ve elektrik üretimi için kullanılabilir; ayrıca biyogaz, biyometan ve sıvı biyoyakıtlar gibi farklı enerji ürünlerine dönüştürülebilir.

Biyoenerji kaynakları diğer yenilenebilir kaynaklardan farklıdır; çünkü yalnızca elektrik üretiminde değil, ısıtma, ulaştırma yakıtları, endüstriyel süreçler ve atık yönetiminde de kullanılabilir. Ancak biyokütle enerjisinin sürdürülebilirliği kullanılan hammaddeye, üretim yöntemine, arazi kullanımına, taşıma mesafesine, dönüşüm teknolojisine ve emisyon kontrolüne bağlıdır. Bu nedenle biyokütle enerjisi her koşulda temiz olan bir kaynak olarak görülmemeli; sürdürülebilir biçimde yönetildiğinde fosil yakıtlara alternatif sağlayabilen yenilenebilir bir enerji seçeneği olarak değerlendirilmelidir (IRENA, 2022).

6.3.1. Geleneksel ve Modern Biyokütle

Biyokütle kullanımı genel olarak geleneksel biyokütle ve modern biyokütle olarak ikiye ayrılabilir. Geleneksel biyokütle çoğunlukla odun, hayvan dışkısı, tarımsal artıklar ve benzeri kaynakların doğrudan yakılması yoluyla enerji elde edilmesini ifade eder. Bu kullanım biçimi özellikle kırsal alanlarda ve enerjiye erişimin sınırlı olduğu yerlerde yaygındır. Ancak verimsiz yanma, iç ortam hava kirliliği ve sağlıksız kullanım koşulları önemli sorunlar yaratabilir.

Modern biyokütle, biyokütle kaynaklarının daha verimli, kontrollü ve teknolojik yöntemlerle enerjiye dönüştürülmesini ifade eder. Biyogaz tesisleri, biyokütle enerji santralleri, pelet üretimi, sürdürülebilir biyoyakıtlar, atıktan enerji üretimi ve biyometan uygulamaları modern biyokütle örnekleridir. IEA, modern biyoenerjinin katı, sıvı ve gaz yakıt biçimlerinde kullanılabileceğini ve sanayi, ulaşım ve binalar gibi farklı sektörlerde rol oynayabileceğini belirtmektedir (IEA, 2024c).

Bu ayrım önemlidir; çünkü biyokütlenin yenilenebilir niteliği her kullanım biçiminin sürdürülebilir olduğu anlamına gelmez. Özellikle verimsiz ve kontrolsüz geleneksel biyokütle kullanımı hem çevre hem de insan sağlığı açısından sorunlar yaratabilir.

6.3.2. Biyokütle Kaynakları

Biyokütle kaynakları son derece çeşitlidir. Orman ürünleri, tarımsal artıklar, enerji bitkileri, hayvansal atıklar, gıda endüstrisi atıkları, kentsel organik atıklar ve arıtma çamuru enerji üretiminde kullanılabilir.

Biyokütle kaynaklarının seçimi bölgenin tarımsal yapısına, orman kaynaklarına, atık yönetim sistemine, endüstriyel faaliyetlerine ve enerji ihtiyaçlarına bağlıdır. Örneğin yoğun tarım yapılan bölgelerde saman, sap, kabuk ve hayvansal atıklar değerlendirilebilir. Ormanlık bölgelerde odun artıkları, budama artıkları ve talaş kullanılabilir. Büyük şehirlerde belediye organik atıkları ve atık su arıtma tesislerinden çıkan çamurlar biyogaz üretimi için uygun olabilir. Tablo 6.8, başlıca biyokütle kaynaklarını ve olası enerji kullanım alanlarını sunmaktadır.

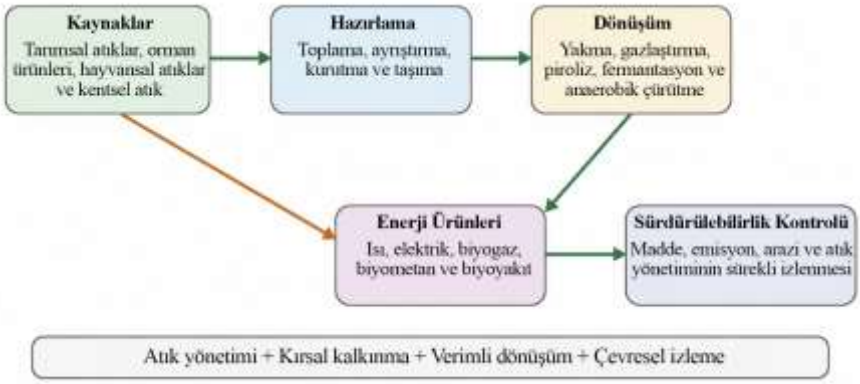
Bu kaynakların enerjiye dönüştürülmesi atık yönetimini destekleyebilir. Ancak tarımsal artıkların aşırı toplanması, orman ekosistemlerinin zayıflaması veya gıda üretimiyle rekabet eden enerji bitkileri uzun vadeli çevresel sorunlar yaratabilir. Bu nedenle biyokütle kaynakları yalnızca enerji potansiyellerine göre değil, sürdürülebilir kullanım koşullarına göre de değerlendirilmelidir.

Tablo 6.8. Biyokütle kaynakları ve sürdürülebilir kullanım koşulları

Kaynak Grubu	Örnekler	Sürdürülebilir Kullanım Koşulu
Ormancılık biyokütlesi	Odun artıkları, talaş, budama artıkları ve orman bakım artıkları.	Orman ekosistemini zayıflatmamak için sürdürülebilir hasat ve izleme gereklidir.
Tarımsal artıklar	Saman, sap, mısır koçanı, zeytin posası, fındık kabuğu ve ayçiçeği sapları.	Toprak organik madde dengesini bozmayacak miktarlarda toplanmalıdır.
Enerji bitkileri	Miscanthus, sorgum, şeker kamışı ve hızlı büyüyen ağaç türleri.	Gıda üretimi, su kullanımı ve arazi rekabeti açısından değerlendirilmelidir.
Hayvansal atıklar	Büyükbaş, küçükbaş ve kanatlı hayvan gübreleri.	Biyogaz ve gübre yönetimi için hijyen, koku ve sızıntı kontrolü gereklidir.
Kentsel organik atıklar	Gıda atıkları, park ve bahçe atıkları ve arıtma çamuru.	Kaynağında ayrıştırma, toplama ve kalite kontrol sağlanmalıdır.
Endüstriyel organik atıklar	Gıda sanayi atıkları, yağlı atıklar, posa ve yan ürünler.	Atığın kimyasal içeriği ve süreç güvenliği kontrol edilmelidir.

Şekil 6.5, biyokütle kaynaklarından ısı, elektrik, biyogaz, biyometan ve biyoyakıtlar gibi yararlı enerji ürünlerine giden genel yolu göstermektedir. Biyokütle enerjisinin tek bir hammaddeden elde edilmediğini; uygun

dönüşüm teknolojileri aracılığıyla farklı organik kaynakların kullanımına bağlı olduğunu ortaya koymaktadır.



Şekil 6.5. Biyokütle kaynaklarından enerji üretimine süreç.

6.3.3. Biyokütle Dönüşüm Teknolojileri

Biyokütleyi enerjiye dönüştürmek için farklı yöntemler kullanılabilir. Bu yöntemler fiziksel, termokimyasal ve biyokimyasal süreçler olarak sınıflandırılabilir. Fiziksel süreçler biyokütleyi enerji üretimine hazırlar. Kurutma, parçalama, öğütme, presleme, peletleme ve briketleme bu gruba girer. Bu süreçler biyokütlenin taşınmasını, depolanmasını ve daha verimli kullanılmasını kolaylaştırır.

Termokimyasal süreçler biyokütlenin yüksek sıcaklıkta kimyasal dönüşümüne dayanır. Doğrudan yakma, gazlaştırma ve piroliz bu gruba dahildir. Doğrudan yakmada biyokütle ısı veya elektrik üretmek için yakılır. Gazlaştırmada biyokütle sınırlı oksijen ortamında sentez gazına dönüştürülür. Pirolizde ise oksijensiz ortamda biyokömür, biyo-yağ ve gaz ürünler elde edilebilir.

Biyokimyasal süreçler mikroorganizmalar aracılığıyla gerçekleşir. Anaerobik çürütme organik atıklardan biyogaz üretir. Fermantasyon ise şeker veya nişasta içeren hammaddelerden biyoetanol gibi yakıtların üretilmesinde kullanılır.

Biyokütle dönüşüm teknolojisinin seçimi hammaddenin türüne, nem içeriğine ve amaçlanan kullanımına bağlıdır. Örneğin kuru odunsu biyokütle doğrudan yakma, peletleme veya gazlaştırma için uygun olabilirken, hayvansal atıklar ve gıda atıkları genellikle biyogaz üretimi için daha uygundur. Tablo 6.9, biyoenerji kaynaklarının başlıca dönüşüm yollarını özetlemekte ve biyokütlenin fiziksel hazırlık, termokimyasal dönüşüm ve biyokimyasal süreçler yoluyla yararlı enerji ürünlerine dönüştürülebileceğini göstermektedir.

Tablo 6.9. Biyokütle dönüşüm teknolojileri ve çıktıları

Dönüşüm Yöntemi	Temel Süreç	Elde Edilen Ürün	Örnek Kullanım
Kurutma ve peletleme	Nem azaltma ve yoğunlaştırma.	Pelet, briket.	Isıtma ve katı yakıt.
Doğrudan yakma	Biyokütlenin kontrollü yakılması.	Isı ve elektrik.	Biyokütle santrali, kazan sistemi.
Gazlaştırma	Sınırlı oksijenle yüksek sıcaklıkta dönüşüm.	Sentez gazı.	Elektrik, ısı ve yakıt sentezi.
Piroliz	Oksijensiz ortamda termal ayrışma.	Biyokömür, biyo-yağ ve gaz.	Toprak iyileştirme, yakıt ve enerji.
Anaerobik çürütme	Organik maddenin oksijensiz ortamda mikrobiyal ayrışması.	Biyogaz ve digestat.	Elektrik, ısı, biyometan ve gübre.
Fermantasyon	Şekerli veya nişastalı hammaddelerin mikrobiyal dönüşümü.	Biyoetanol.	Ulaştırma yakıtı karışımları.

6.3.4. Biyogaz ve Biyometan

Biyogaz, organik malzemelerin oksijensiz ortamda mikroorganizmalar tarafından ayrıştırılmasıyla üretilen bir gaz karışımıdır. Genellikle metan ve karbondioksitten oluşur. Hayvan gübresi, gıda atıkları, tarımsal artıklar, atık su arıtma çamuru ve belediye organik atıkları biyogaz üretiminde kullanılabilir.

Biyogaz doğrudan elektrik ve ısı üretimi için kullanılabilir. Arıtılıp metan içeriği artırıldığında biyometan elde edilir; biyometan doğal gaz şebekesine verilebilir veya ulaştırma yakıtı olarak kullanılabilir (Ali et al., 2023).

IEA Bioenergy'nin 2024 ülke raporları güncellemesinde biyoenerji; katı biyokütle, biyogaz/biyometan, sıvı biyoyakıtlar ve belediye atıklarının yenilenebilir fraksiyonu ana kategorileri altında ele alınmaktadır (IEA Bioenergy, 2024). Bu sınıflandırma biyokütle enerjisinin odun veya katı yakıtlarla sınırlı olmadığını göstermektedir.

Biyogaz tesisleri hayvancılık, gıda sanayisi ve belediye atık yönetimiyle birlikte planlandığında çevresel faydalar sağlayabilir. Ancak koku, sızıntı, metan kayıpları, hijyen ve atık yönetimi süreçleri dikkatle kontrol edilmelidir.

6.3.5. Biyokütle Enerjisinin Çevresel Etkileri

Biyokütle enerjisinin çevresel etkileri kullanılan hammaddeye ve teknolojiye göre değişir. Sürdürülebilir biçimde elde edilen biyokütle, fosil yakıtların yerine geçtiğinde sera gazı emisyonlarının azaltılmasına katkı sağlayabilir. Organik atıkların biyogaz tesislerinde değerlendirilmesi, kontrolsüz ayrışma yoluyla oluşabilecek metan emisyonlarını azaltabilir ve atık yönetimini iyileştirebilir.

Ancak kötü planlandığında biyokütle enerjisi çevresel sorunlar yaratabilir. Kontrolsüz odun kullanımı ormansızlaşmaya yol açabilir. Enerji bitkileri gıda üretimiyle rekabet edebilir. Tarımsal artıkların aşırı toplanması toprakların organik madde dengesini bozabilir. Biyokütle yanması sırasında partikül madde, karbon monoksit ve azot oksitler gibi hava kirleticileri oluşabilir.

Biyokütle enerjisinin sürdürülebilir olması için üç temel ilke önemlidir: hammadde sürdürülebilir biçimde elde edilmeli, dönüşüm teknolojisi verimli ve kontrollü olmalı ve çevresel etkiler tüm yaşam döngüsü boyunca izlenmelidir. Bu yaklaşım biyokütleyi yalnızca bir enerji kaynağı değil, aynı zamanda atık yönetimi ve döngüsel ekonomi aracı hâline getirir (Hameed et al., 2021).

6.3.6. Biyoyakıtlar ve Ulaştırma Yakıtları

Biyoyakıtlar, biyokütle kaynaklarından elde edilen ve ulaşım, ısıtma, elektrik üretimi veya endüstriyel süreçlerde yakıt olarak kullanılabilen enerji ürünleridir. Bitkisel yağlar, şeker ve nişasta bitkileri, tarımsal artıklar, orman artıkları, hayvansal atıklar, gıda atıkları ve algler biyoyakıt hammaddeleri arasındadır (Khan et al., 2021).

Biyoyakıtlar özellikle ulaşımda önemlidir; çünkü kara taşımacılığı, havacılık ve deniz taşımacılığındaki tüm enerji ihtiyaçlarını kısa vadede elektrikle karşılamak kolay değildir. Bu nedenle sürdürülebilir biyoyakıtlar fosil benzin, dizel ve jet yakıtına tamamlayıcı seçenekler sunabilir.

Bununla birlikte biyoyakıtların çevresel yararı kullanılan hammaddeye, üretim yöntemine, arazi kullanımına, taşıma mesafesine ve yaşam döngüsü emisyonlarına bağlıdır. Gıda bitkilerinden üretilen biyoyakıtlar gıda güvenliği ve arazi kullanımı tartışmalarını artırabilirken, atıklardan ve gıda dışı lignoselülozik hammaddelerden üretilen ileri biyoyakıtlar sürdürülebilirlik açısından daha avantajlı olabilir. Bu nedenle biyoyakıtlar her koşulda temiz kabul edilmemeli; sürdürülebilir hammadde, üretim yöntemi ve yaşam döngüsü emisyonlarıyla birlikte değerlendirilmelidir (IRENA, 2022).

6.3.7. Biyoyakıt Türleri ve Uygulamaları

Biyoyakıtlar fiziksel durumlarına göre katı, sıvı ve gaz biyoyakıtlar olarak sınıflandırılabilir. Bu sınıflandırma, biyoyakıtların otomobillerde kullanılan sıvı yakıtlarla sınırlı olmadığını göstermektedir (Mofijur et al., 2021).

Katı biyoyakıtlar odun, pelet, briket, biyokömür ve bazı tarımsal veya ormancılık artıkları gibi katı formdaki yakıtlardır. Genellikle ısıtmada, endüstriyel kazanlarda veya biyokütle enerji tesislerinde kullanılabilirler.

Sıvı biyoyakıtlar ulaşım sektöründe en iyi bilinen biyoyakıt grubudur. Biyoetanol, biyodizel, yenilenebilir dizel, biyometanol, biyo-yağ ve sürdürülebilir havacılık yakıtları bu grupta değerlendirilebilir. U.S. Energy

Information Administration, etanolün genellikle benzinle, biyodizelin ise petrol dizeliyle karıştırıldığını belirtmektedir (EIA, 2024).

Gaz biyoyakıtlar biyogaz, biyometan, sentez gazı ve biyohidrojen içerir. Biyogaz organik atıkların anaerobik ayrışmasıyla üretilir. Biyometan, metan içeriği artırılmış biyogazın arıtılmış biçimidir.

Biyoyakıtlar ısıtma, elektrik üretimi, ulaşım ve sanayide kullanılabilen geniş bir enerji ürünleri grubunu oluşturur. Bu nedenle özellikle ulaştırma yakıtları, havacılık yakıtları, endüstriyel uygulamalar ve harmanlanmış yakıt kullanımı açısından daha geniş biyoenerji tartışması içinde ayrıca ele alınmaları gerekir. Tablo 6.10, başlıca biyoyakıt türlerini ve kullanım alanlarını sunmaktadır.

Tablo 6.10. Biyoyakıt türleri ve kullanım alanları

Biyoyakıt Türü	Örnekler	Başlıca Kullanım Alanları
Katı biyoyakıtlar	Odun, pelet, briket, biyokömür ve tarımsal artıklar.	Isıtma, endüstriyel kazanlar, elektrik üretimi.
Sıvı biyoyakıtlar	Biyoetanol, biyodizel, yenilenebilir dizel, biyometanol, biyo-yağ ve sürdürülebilir havacılık yakıtı.	Karayolu taşımacılığı, havacılık, deniz taşımacılığı ve sanayi.
Gaz biyoyakıtlar	Biyogaz, biyometan, sentez gazı ve biyohidrojen.	Elektrik, ısı, ulaşım, doğal gaz şebekesi ve sanayi.
İleri biyoyakıtlar	Atık yağ, tarımsal artıklar, lignoselülozik kaynaklar, algler veya sentetik süreçlerden üretilen yakıtlar.	Özellikle havacılık, deniz taşımacılığı ve ağır hizmet taşımacılığı gibi elektrifikasyonu zor sektörler.

6.3.8. Başlıca Sıvı ve Gaz Biyoyakıtlar

Biyoetanol, şekerli veya nişastalı hammaddelerin fermantasyonu yoluyla üretilen alkol temelli bir biyoyakıttır ve çoğunlukla benzinle karıştırılır (Devi et al., 2022). Biyodizel bitkisel yağlardan, hayvansal yağlardan veya kullanılmış yemeklik yağlardan elde edilir ve dizel motorlarda fosil dizelle karıştırılarak kullanılabilir (Mittal and Lim, 2024). Yenilenebilir dizel benzer hammaddelerden üretilebilir; ancak kimyasal yapısı fosil dizele daha yakındır.

Gaz biyoyakıtlar biyogaz, biyometan, sentez gazı ve biyohidrojen içerir. Biyokütle bölümünde açıklandığı gibi biyogaz ve biyometan hem atık yönetimi hem de enerji üretimi açısından önemlidir. Bu yakıtların çevresel yararı kullanılan hammaddeye ve üretim yöntemine bağlıdır.

6.3.9. Kuşaklarına Göre Biyoyakıtlar

Biyoyakıtlar kullanılan hammaddeye ve teknoloji düzeyine göre kuşaklara ayrılabilir. Bu sınıflandırma, hangi yakıtların gıda üretimiyle rekabet ettiğini, hangilerinin atık ve artık kaynaklarına dayandığını ve

hangilerinin daha ileri teknolojiler gerektirdiğini göstermesi açısından yararlıdır.

Biyoyakıt teknolojileri sürekli gelişmektedir. Birinci kuşak biyoyakıtlar daha yaygın olsa da ileri biyoyakıtlar sürdürülebilirlik açısından daha fazla dikkat çekmektedir. IEA Bioenergy Task 39, ileri biyoyakıtların özellikle havacılık, deniz taşımacılığı ve ağır hizmet araçları gibi doğrudan elektrifikasyonu zor olan ulaştırma alanlarında tamamlayıcı rol oynayabileceğini belirtmektedir (IEA Bioenergy, 2024; Mofijur et al., 2021).

Tablo 6.11, biyoyakıt teknolojilerinin hammadde türüne, teknolojik olgunluğa, sürdürülebilirlik potansiyeline ve olası sınırlılıklara göre farklılık gösterdiğini ortaya koymaktadır. Ayrıca gıda bitkilerine, atık ve artıklara, alglere ve ileri biyolojik veya karbon yakalama temelli sistemlere dayalı yakıtlar arasındaki ayrımı yapmaya yardımcı olur.

Tablo 6.11. Kuşaklarına göre biyoyakıtlar ve sürdürülebilirlik koşulları

Kuşak	Hammadde	Örnek Yakıtlar	Avantaj	Başlıca Sınırlılık
Birinci kuşak	Gıda bitkileri.	Biyoetanol, biyodizel.	Mevcut teknolojiye ve altyapıya daha yakındır.	Gıda-arazi rekabeti ve su kullanımı tartışmaları yaratabilir.
İkinci kuşak	Tarımsal artıklar, orman artıkları ve lignoselülozik biyokütle.	İleri biyoetanol, ileri biyodizel ve biyoyakıt ara ürünleri.	Gıda üretimiyle rekabeti azaltabilir.	Teknoloji ve maliyet zorlukları vardır.
Üçüncü kuşak	Algler ve bazı ileri biyolojik kaynaklar.	Alg temelli biyodizel ve biyo-yağ.	Yüksek verimlilik potansiyeli sunabilir.	Büyük ölçekli üretim hâlen zordur.
Dördüncü kuşak	Geliştirilmiş mikroorganizmalar ve karbon yakalama destekli sistemler.	İleri biyoyakıtlar ve sentetik biyoyakıtlar.	Düşük karbonlu veya karbon negatif potansiyel taşıyabilir.	Teknoloji olgunluğu ve maliyet sorunları vardır.

6.3.10. Sürdürülebilir Havacılık Yakıtları ve İleri Biyoyakıtlar

Sürdürülebilir havacılık yakıtları (SAF), havacılık sektöründe fosil jet yakıtı yerine veya onunla karışım hâlinde kullanılabilen düşük karbonlu yakıtlardır. Atık yağlar, tarımsal artıklar, belediye atıkları, sentetik yakıt süreçleri ve diğer düşük karbonlu kaynaklar SAF üretiminde kullanılabilir.

Havacılık ve deniz taşımacılığı gibi sektörlerin elektriklendirilmesi kara taşımacılığına göre daha zordur. Bu nedenle ileri biyoyakıtlar, biyometan, SAF ve e-yakıtlar bu sektörlerin karbonsuzlaştırılmasında tamamlayıcı seçenekler olarak görülmektedir.

Ancak sürdürülebilir havacılık yakıtlarının yaygınlaşabilmesi için hammadde arzı, maliyet, rafineri kapasitesi, sertifikasyon, yaşam döngüsü emisyon hesaplamaları ve uluslararası standartlar önemlidir (Khoshnevisan et

al., 2021). Bu nedenle SAF, kısa vadede havacılık emisyonlarını tek başına çözebilecek bir teknoloji olarak görülmemeli; verimlilik, talep yönetimi, yeni uçak teknolojileri ve düşük karbonlu yakıtlarla birlikte değerlendirilmelidir.

6.3.11. Biyoenerji Kaynaklarının Çevresel Etkileri ve Sürdürülebilirlik Koşulları

Biyoenerji kaynaklarının çevresel etkileri doğrudan hammaddeye, üretim yöntemine ve kullanım alanına bağlıdır. Atık yağlar, organik atıklar ve tarımsal artıklar gibi kaynaklardan üretilen yakıtlar avantaj sağlayabilir; buna karşılık gıda bitkilerinin büyük ölçekli yakıt üretiminde kullanılması arazi rekabeti, su tüketimi ve biyoçeşitlilik kaybı gibi sorunlara neden olabilir.

Biyokütle ve biyoyakıtların gerçek iklim katkısı yaşam döngüsü analiziyle değerlendirilmelidir. Yetiştirme, hasat, gübre üretimi, taşıma, işleme ve yakıt kullanımı aşamalarındaki emisyonlar dikkate alınmadan karbon nötrlüğü varsaymak yanıltıcı olabilir. Bu nedenle biyoenerji uygulamaları atık ve artık kaynaklarına öncelik vermeli, gıda üretimiyle rekabeti azaltmalı, arazi kullanımı değişikliklerini önlemeli, emisyonları yaşam döngüsü boyunca hesaplamalı ve sertifikasyon sistemlerinden yararlanmalıdır.

6.3.12. Biyoenerji Kaynaklarının Eğitimde Kullanımı

Biyoenerji kaynakları, öğrencilerin enerji dönüşümü, fotosentez, karbon döngüsü, fermantasyon, atık yönetimi, tarım ve ulaştırma politikalarını birlikte öğrenebilecekleri güçlü bir örnek sunar. Bu konu biyoloji, kimya, coğrafya, çevre eğitimi ve STEM etkinlikleriyle doğrudan ilişkilidir.

Sınıfta öğrenciler biyoyakıt hammaddelerini sınıflandırabilir, gıda-atık-enerji ilişkisini tartışabilir veya biyoyakıtların avantajlarını ve sınırlılıklarını karşılaştırabilir. Güvenlik nedeniyle deneysel uygulamalarda yakıt üretimi yerine gözlem, modelleme ve tartışma etkinlikleri tercih edilmelidir.

Bu tür etkinlikler önemlidir; çünkü enerji okuryazarlığının kavramsal bilgiyle sınırlı olmadığını, tutumlar, davranışlar, karar verme ve sorumlu eylemi de içerdiğini gösterir (DeWaters et al., 2013; Ramachandran et al., 2024; Santillán and Cedano, 2023). Bu etkinlik, öğrencilerin biyoenerji kaynaklarını yalnızca "yenilenebilir" etiketiyle değil; hammadde seçimi, üretim süreci, çevresel etki, atık yönetimi ve sürdürülebilirlik ilişkileri içinde değerlendirmelerine yardımcı olur (Kutu 6.4).

Kutu 6.4. Sınıf içi etkinlik önerisi: Biyoenerji kaynaklarını değerlendirme

Etkinlik Aşaması	Açıklama
Amaç	Biyokütle, biyogaz ve biyoyakıt kaynaklarını sürdürülebilirlik açısından karşılaştırmak.
Malzemeler	Hammadde kartları, poster kâğıdı, renkli kalemler ve değerlendirme çizelgesi.
Uygulama	Öğrenciler tarımsal artıklar, hayvan gübresi, atık yağ, enerji bitkileri, algler ve gıda atıkları gibi kaynakları gruplandırır.
Değerlendirme	Her kaynak enerji çıktısı, gıda rekabeti, atık geri kazanımı, maliyet ve çevresel etki açısından tartışılır.
Sonuç	Öğrenciler en sürdürülebilir biyoenerji seçeneklerini gerekçeleriyle sunar.
Çevresel bağlantı	Yaşam döngüsü emisyonları, arazi kullanımı ve atık yönetimi kavramları ele alınır.

6.3.13. Enerji Okuryazarlığı Açısından Değerlendirme

Biyoenerji kaynakları enerji okuryazarlığı açısından güçlü bir öğrenme alanı sunar. Bu konu öğrencilerin yalnızca organik maddeden enerji elde etmeyi değil; gıda güvenliği, arazi kullanımı, atık yönetimi, kırsal kalkınma, ulaştırma politikaları ve yaşam döngüsü emisyonlarını birlikte düşünmelerini gerektirir. Bu bakımdan biyoyakıtlar sosyobilimsel bir tartışma konusu olarak ele alınabilir. Öğrenciler bir biyoyakıtın çevresel açıdan uygun olup olmadığını değerlendirirken yalnızca teknik verimliliği değil; kullanılan hammaddeyi, yerel koşulları, toplumsal etkileri ve uzun vadeli sürdürülebilirlik sonuçlarını da dikkate almalıdır (Sadler, 2004; Zeidler, 2014).

Enerji okuryazarlığı açısından en önemli kazanım, öğrencilerin "biyoyakıt temizdir" gibi tek yönlü yargılar yerine "hangi hammadde, hangi üretim yöntemi ve hangi kullanım alanı daha sürdürülebilirdir?" sorusunu sorabilmeleridir. Bu nedenle biyoyakıtlar karar verme, kanıt değerlendirme ve sistem düşüncesi becerilerini geliştirmek için etkili konulardır.

6.4. Jeotermal, Deniz-Okyanus ve Biyoenerji Kaynaklarının Karşılaştırmalı Değerlendirmesi

Jeotermal enerji, deniz ve okyanus enerjisi, biyokütle ve biyoyakıtlar yenilenebilir enerji sistemi içinde farklı işlevler üstlenir. Ortak özellikleri, yerel koşullara ve kullanım alanlarına güçlü biçimde bağlı olmalarıdır. Bu nedenle her kaynak tek bir ölçütle değil; kaynak potansiyeli, teknolojik olgunluk, çevresel etkiler, hammadde sürekliliği, maliyet, toplumsal kabul ve eğitsel değerle birlikte değerlendirilmelidir.

Tablo 6.12. Jeotermal, deniz-okyanus ve biyoenerji kaynaklarının karşılaştırılması

Ölçüt	Jeotermal Enerji	Deniz-Okyanus Enerjisi	Biyokütle ve Biyoyakıtlar
Kaynak karakteri	Yerkabuğundaki ısıya dayanır; coğrafi olarak sınırlıdır.	Dalgalar, gelgitler, akıntılar ve deniz koşullarına bağlıdır.	Organik maddelere, atıklara ve biyolojik hammaddelere dayanır.
Başlıca kullanım	Elektrik, ısıtma, sera yetiştiriciliği ve termal uygulamalar.	Özellikle kıyı ve ada sistemleri için potansiyel taşıyan elektrik üretimi.	Isı, elektrik, biyogaz, biyometan ve ulaştırma yakıtları.
Süreklilik	Uygun alanlarda sürekli ve öngörülebilir enerji sağlayabilir.	Bazı türleri öngörülebilirdir; ancak teknoloji ve saha koşullarına bağlıdır.	Hammadde arzı ve sürdürülebilir yönetim sürekliliği belirler.
Çevresel kaygı	Akışkan yönetimi, gaz emisyonları ve yerel su-toprak etkileri.	Deniz ekosistemleri, bakım süreçleri ve kıyı kullanımı.	Arazi kullanımı, gıda rekabeti, emisyonlar ve atık yönetimi.
Enerji okuryazarlığı değeri	Jeoloji, ısı transferi ve yerel kaynak yönetimini ilişkilendirir.	Su hareketlerini, kıyı ekosistemlerini ve teknoloji tasarımını birlikte ele alır.	Fotosentez, atık yönetimi, karbon döngüsü ve yaşam döngüsü analizini görünür kılar.

Tablo 6.12, bu kaynakların birbirinin yerine geçen basit alternatifler değil, farklı kullanım alanlarını tamamlayan enerji seçenekleri olduğunu göstermektedir. Bu nedenle biyoenerji, jeotermal enerji ve deniz-okyanus enerjisi değerlendirilirken yalnızca teknik potansiyel değil; çevresel sürdürülebilirlik, yerel uygunluk ve toplumsal kabul de birlikte dikkate alınmalıdır.

6.5. Bölüm Özeti ve Tartışma Soruları

Bu bölümde jeotermal enerji, deniz-okyanus enerjisi ve biyoenerji kaynakları yenilenebilir enerji sistemleri içindeki tamamlayıcı rolleri açısından incelenmiştir. Jeotermal enerji uygun bölgelerde sürekli ısı ve elektrik sağlayabilir; deniz ve okyanus enerjisi kıyı ve ada sistemleri için potansiyel sunar; biyoenerji ise atık yönetimi, ısı, elektrik ve ulaştırma yakıtlarıyla ilişkilidir.

Deniz ve okyanus enerjisi dalga, gelgit, akıntı, okyanus termal ve tuzluluk gradyanı enerjisi gibi farklı teknolojileri içerir. Bu kaynaklar özellikle kıyı ve ada sistemleri için potansiyele sahip olsa da teknolojik olgunluk, maliyet, bakım ve deniz ekosistemleri üzerindeki etkiler açısından dikkatli değerlendirme gerektirir.

Biyoenerji kaynakları organik atıkların, tarımsal artıkların, ormancılık ürünlerinin ve biyolojik hammaddelerin enerjiye dönüştürülmesine dayanır. Bu kaynaklar fırsatlar sunabilir; ancak

sürdürülebilir hammadde arzı, arazi kullanımı, gıda güvenliği, yaşam döngüsü emisyonları ve toplumsal etkiler dikkate alınmalıdır.

Enerji okuryazarlığı açısından bu kaynaklar, öğrencilerin yenilenebilir enerji teknolojilerini yalnızca teknik sistemler olarak değil; çevre, toplum, ekonomi, kaynak yönetimi ve karar verme süreçleriyle birlikte değerlendirmelerine yardımcı olur.

Tartışma Soruları

1. Jeotermal enerji hangi koşullarda sürdürülebilir bir enerji seçeneği olabilir?
2. Deniz ve okyanus enerjisinin gelişimini sınırlayan başlıca teknolojik ve çevresel faktörler nelerdir?
3. Biyokütle enerjisi ile biyoyakıtlar arasındaki temel farklar nelerdir?
4. Biyoyakıt üretiminde gıda-arazi rekabeti neden önemli bir tartışmadır?
5. Bir biyokütle veya biyoyakıt projesi yaşam döngüsü yaklaşımıyla nasıl değerlendirilmelidir?
6. Jeotermal, deniz-okyanus ve biyoenerji kaynakları enerji okuryazarlığı eğitiminde hangi becerileri geliştirebilir?

BÖLÜM 7: YENİLENEBİLİR ENERJİ TÜRLERİNİN KARŞILAŞTIRILMASI, YEŞİL HİDROJEN VE BÜTÜNLEŞİK ENERJİ SİSTEMLERİ

Bu bölüm, önceki bölümlerde ayrıntılı biçimde ele alınan yenilenebilir enerji türlerini birlikte değerlendiren bir sentez bölümüdür. Amacı, güneş, rüzgâr, hidroelektrik, jeotermal, deniz-okyanus enerjisi, biyokütle ve biyoyakıtların güçlü yönlerini ve sınırlılıklarını karşılaştırmak; ardından bu kaynakların bütünleşik enerji sistemleri ve yeşil hidrojenle nasıl ilişkilendiğini açıklamaktır (Kutu 7.1) (IRENA, 2024b).

Yenilenebilir enerji dönüşümü yeni üretim kapasitesi kurmakla sınırlı değildir. Kaynak çeşitliliği, depolama, akıllı şebekeler, enerji verimliliği, elektrifikasyon, sürdürülebilir ısıtma, biyoyakıtlar, yeşil hidrojen, yerel koşullar, toplumsal kabul ve adil geçiş ilkeleri birlikte dikkate alınmalıdır (IRENA, 2024).

Bölüm önce yenilenebilir enerji türlerini karşılaştırmakta, ardından kullanım alanlarını ve bütünleşik sistemler yaklaşımını tartışmakta, son olarak da yeşil hidrojenin bu sistemdeki tamamlayıcı rolünü değerlendirmektedir (IEA, 2025; IRENA, 2024a).

Kutu 7.1. Bu bölümde neler öğrenilecek?

Öğrenme Hedefi
Farklı kaynakları kullanım alanları, çevresel etki, süreklilik, maliyet, toplumsal kabul ve sürdürülebilirlik açısından değerlendirmek.
Enerji kaynaklarının elektrik, ısıtma-soğutma, ulaşım, sanayi ve depolamadaki rollerini ayırt etmek.
Depolama, akıllı şebekeler, talep yönetimi, elektrifikasyon, biyoyakıtlar ve yeşil hidrojeni birlikte planlamak.
Hidrojenin bir enerji kaynağı değil, yenilenebilir enerji sistemlerini tamamlayabilecek bir enerji taşıyıcısı olduğunu açıklamak.
Yenilenebilir enerji dönüşümünün yerel kaynaklara, altyapıya, politika hedeflerine ve toplumsal koşullara bağlı olduğunu yorumlamak.
Enerji seçeneklerini teknik, çevresel, ekonomik ve toplumsal boyutlarıyla değerlendirmek.

7.1. Yenilenebilir Enerji Türlerinin Karşılaştırmalı Değerlendirmesi

Yenilenebilir enerji kaynakları fosil yakıtlara bağımlılığı azaltmak, sera gazı emisyonlarını düşürmek, enerji güvenliğini geliştirmek ve sürdürülebilir kalkınmayı desteklemek için önemli fırsatlar sunar. Ancak yenilenebilir enerji türlerinin tümü aynı özelliklere sahip değildir. Güneş ve rüzgâr enerjisi elektrik üretiminde öne çıkan ve hızla yaygınlaşan teknolojilerdir. Hidroelektrik enerji elektrik sistemlerine esneklik sağlayabilen köklü bir kaynaktır. Jeotermal enerji uygun bölgelerde sürekli ısı ve elektrik sağlayabilir. Deniz-okyanus enerjisi, birçok teknolojisi hâlen gelişmekte olsa da uzun vadeli potansiyele sahiptir. Biyokütle ve biyoyakıtlar

özellikle atık yönetimi, ısı üretimi ve ulaşım için önemli seçenekler sunar. Yeşil hidrojen burada yenilenebilir enerji kaynağı olarak ele alınmamakta; yenilenebilir elektrik kullanılarak üretilebilen düşük karbonlu bir enerji taşıyıcısı olarak ayrıca tartışılmaktadır (IEA, 2025; IRENA, 2024b; NREL, 2021).

Bu nedenle yenilenebilir enerji kaynakları, tüm sorunları tek başına çözen bağımsız teknolojiler olarak değil, birbirini tamamlayan enerji seçenekleri olarak görülmelidir. Bir ülke veya bölge için en uygun yenilenebilir enerji karması coğrafi koşullara, iklim özelliklerine, su kaynaklarına, tarımsal ve ormancılık yapısına, teknolojik kapasiteye, enerji talebine, şebeke altyapısına ve toplumsal kabul düzeyine bağlıdır.

Tablo 7.1, yenilenebilir enerji teknolojilerinin sürdürülebilir enerji sistemleri içinde farklı roller üstlendiğini göstermektedir. Güneş ve rüzgâr enerjisi elektrik üretiminde hızla yaygınlaşırken, biyokütle ve biyoyakıtlar atık yönetimi ve ulaştırma yakıtları açısından önemlidir. Hidroelektrik ve jeotermal enerji daha sürekli veya dengeleyici üretim sağlayabilirken, deniz-okyanus enerjisi daha çok konuma özgü ve teknolojik olarak gelişmekte olan bir alandır. Yeşil hidrojen birincil enerji kaynağı olmadığı için tabloda yenilenebilir enerji türü olarak listelenmemiş; bunun yerine bütünleşik enerji sistemleri içinde tamamlayıcı bir enerji taşıyıcısı olarak ayrı bir bölümde değerlendirilmiştir (IEA, 2025; IRENA, 2022).

Tablo 7.1. Yenilenebilir enerji türlerinin genel ve sürdürülebilirlik odaklı karşılaştırması

Enerji Türü	Başlıca Kaynak ve Kullanım	Güçlü Yön	Sürdürülebilirlik Açısından Dikkat Gerektiren Nokta
Güneş enerjisi	Güneş ışınımı; elektrik üretimi, sıcak su ve ısı uygulamaları	Modülerdir, farklı ölçeklerde kurulabilir ve maliyetleri hızla düşmüştür.	Panel üretimi, hammadde kullanımı, arazi seçimi, geri dönüşüm ve depolama ihtiyaçları planlanmalıdır.
Rüzgâr enerjisi	Havanın hareketi; karasal ve deniz üstü elektrik üretimi	Uygun alanlarda verimli ve düşük karbonlu elektrik üretimi sağlar.	Yer seçimi, kuş-yarasa etkileri, gürültü, peyzaj, toplumsal kabul ve kanat geri dönüşümü önemlidir.
Hidroelektrik	Akan veya depolanan su; elektrik üretimi ve sistem esnekliği	Elektrik sistemi için esneklik ve bazı durumlarda depolama desteği sağlayabilir.	Nehir ekosistemleri, balık göçü, sediment taşınımı, kuraklık riski ve yerel topluluklar dikkate alınmalıdır.
Jeotermal enerji	Yerkabuğundaki ısı; elektrik, ısıtma, sera yetiştiriciliği ve termal kullanım	Uygun kaynakların bulunduğu yerlerde yıl boyunca sürekli enerji sağlayabilir.	Rezervuar yönetimi, reinjeksiyon, gaz salımları, mineral içeriği ve yerel çevresel etkiler izlenmelidir.

Enerji Türü	Başlıca Kaynak ve Kullanım	Güçlü Yön	Sürdürülebilirlik Açısından Dikkat Gerektiren Nokta
Biyokütle ve biyoyakıtlar	Organik madde; ısı, elektrik, biyogaz, biyometan ve ulaştırma yakıtları	Atık yönetimi, kırsal kalkınma ve bazı ulaşım/sanayi uygulamaları için seçenekler sunar.	Hammadde sürdürülebilirliği, gıda-arazi rekabeti, ormanlar üzerindeki baskı ve yaşam döngüsü emisyonları değerlendirilmelidir.
Deniz-okyanus enerjisi	Dalga, gelgit, akıntı ve okyanus temelli enerji kaynakları	Kıyı ve ada sistemleri için yerel potansiyel sağlayabilir; bazı biçimleri öngörülebilirdir.	Teknoloji olgunluğu, bakım maliyetleri, deniz ekosistemleri ve kıyı kullanımı dikkatle planlanmalıdır.

7.1.1. Sürdürülebilirlik Açısından Karşılaştırma

Yenilenebilir enerji kaynaklarının çevresel etkileri genel olarak fosil yakıtlardan daha düşük olsa da tamamen sıfır değildir. Bu nedenle sürdürülebilir enerji planlaması, her kaynağın yaşam döngüsü boyunca değerlendirilmesini gerektirir. Kaynak çıkarımı, üretim teknolojisi, tesis inşası, işletme, bakım, atık yönetimi ve geri dönüşüm süreçleri birlikte ele alınmalıdır (NREL, 2021).

Bu değerlendirme, enerji dönüşümünün yalnızca fosil yakıtları terk etmek anlamına gelmediğini göstermektedir. Gerçekten sürdürülebilir bir enerji sistemi için yenilenebilir enerji projelerinin çevresel, ekonomik ve toplumsal etkileri birlikte yönetilmelidir.

7.2. Kullanım Alanlarına Göre Yenilenebilir Enerji Kaynakları

Yenilenebilir enerji kaynakları kullanım alanları bakımından farklılaşır. Bazı kaynaklar elektrik üretimi için, bazıları ısıtma için, bazıları ulaşım için, bazıları ise endüstriyel süreçler için daha uygundur. Bu nedenle enerji dönüşümünde yalnızca bir kaynağın potansiyeli değil, farklı sektörlerde nasıl kullanılabileceği de dikkate alınmalıdır.

Tablo 7.2, yenilenebilir enerji kaynaklarının her kullanım alanında eşit derecede etkili olmadığını göstermektedir. Güneş ve rüzgâr enerjisi elektrik üretimi için güçlü seçeneklerdir; hidroelektrik ve jeotermal enerji uygun bölgelerde daha sürekli veya dengeleyici üretim sağlayabilir. Biyokütle, biyoyakıtlar ve biyometan ısıtma, atık yönetimi, ulaşım ve bazı endüstriyel uygulamalara katkı sağlayabilir. Ancak bazı yenilenebilir enerji kaynaklarının ağır sanayi veya uzun mesafeli taşımacılıkta doğrudan kullanımı sınırlı olabilir. Bu alanlarda biyoyakıtlar, biyometan ve yeşil hidrojen gibi enerji taşıyıcıları tamamlayıcı rol üstlenebilir. Bu nedenle yeşil hidrojen tabloda ayrı bir yenilenebilir enerji kaynağı olarak sunulmamış; daha sonra depolama, dengeleme ve elektrifikasyonu zor sektör uygulamaları içinde bir enerji taşıyıcısı olarak ele alınmıştır (IEA, 2024, 2025).

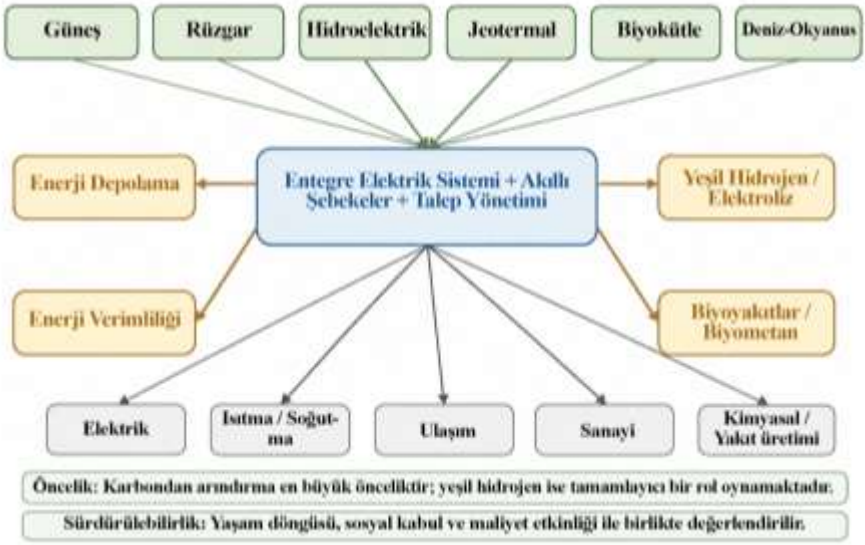
Tablo 7.2. Yenilenebilir enerji türlerinin kullanım alanlarına göre değerlendirilmesi

Enerji Türü	En Güçlü Kullanım Alanları	Tamamlayıcı Kullanımlar	Depolama/Dengeleme Rolü
Güneş enerjisi	Elektrik üretimi; sıcak su ve ısıtma	Sanayi ve ulaşımda dolaylı kullanım	Bataryalar ve hidrojenle desteklenebilir.
Rüzgâr enerjisi	Elektrik üretimi	Elektrik yoluyla ısıtma, ulaşım ve sanayide dolaylı kullanım	Batarya, hidrojen ve esnek şebeke gerektirir.
Hidroelektrik	Elektrik üretimi ve sistem dengeleme	Sulama, taşkın kontrolü ve bazı su yönetimi işlevleri	Pompaj depolama ile çok güçlü rol oynar.
Jeotermal	Kaynakların uygun olduğu yerlerde ısıtma, soğutma, sera yetiştiriciliği ve elektrik	Endüstriyel ısı uygulamaları	Sürekli üretim yoluyla sisteme katkı sağlar.
Deniz-okyanus enerjisi	Elektrik üretimi; özellikle dalga, gelgit ve akıntı potansiyeli	Kıyı ve ada sistemlerinde tamamlayıcı kullanım	Gelecekte tamamlayıcı hâle gelebilir.
Biyokütle	Isı, biyogaz, elektrik ve yerel enerji üretimi	Atık yönetimi, kırsal kalkınma ve endüstriyel ısı	Kontrol edilebilir üretim yoluyla dengeleme rolü oynayabilir.
Biyoyakıtlar	Ulaşım, deniz taşımacılığı, havacılık ve bazı endüstriyel süreçler	Isı ve elektrik üretiminde sınırlı kullanım	Yakıt olarak depolanabilir.

7.3. Bütünleşik Yenilenebilir Enerji Sistemleri

Geleceğin enerji sisteminin tek bir yenilenebilir enerji kaynağına dayanması olası değildir. Bunun yerine farklı kaynakların birbirini tamamladığı karma bir enerji yapısı söz konusu olacaktır. Güneş enerjisi gün ışığı saatlerinde güçlü üretim sağlayabilirken, rüzgâr enerjisi gece veya farklı mevsimlerde daha güçlü olabilir. Hidroelektrik ve jeotermal enerji daha sürekli veya dengeleyici üretim sağlayabilir. Biyokütle, biyogaz ve biyoyakıtlar depolanabilir enerji seçenekleri sunabilir. Yeşil hidrojen de fazla yenilenebilir elektriğin uzun süreli depolanması ve endüstriyel uygulamalar için önemli hâle gelebilir (IEA, 2024, 2025).

Şekil 7.1, sürdürülebilir enerji dönüşümünün yenilenebilir elektrik üretimiyle sınırlı olmadığını göstermektedir. Elektrik, ısıtma, ulaşım, depolama, şebeke esnekliği, enerji verimliliği, ulaştırmanın elektrifikasyonu, biyoyakıtlar, sürdürülebilir ısıtma çözümleri ve yeşil hidrojenin bütünleşik biçimde planlanmasını gerektirir. Bu nedenle bütünleşik yenilenebilir enerji sistemleri ayrı teknolojiler olarak değil, esnek ve birbirine bağlı sistemler olarak değerlendirilmelidir.



Şekil 7.1. Bütünleşik bir enerji sisteminde yenilenebilir enerji kaynaklarının rolü.

7.4. Bütünleşik Enerji Sistemlerinde Yeşil Hidrojenin Rolü

Bütünleşik enerji sistemlerinde yeşil hidrojen ayrı bir enerji kaynağı olarak değil, fazla yenilenebilir elektriği depolayabilen ve doğrudan elektrifikasyonun zor olduğu sektörleri destekleyebilen tamamlayıcı bir enerji taşıyıcısı olarak değerlendirilir. Hidrojen genellikle doğada saf moleküler formda bulunmaz; su, organik madde ve çeşitli kimyasal bileşikler içinde yer alır. Bu nedenle enerji sistemlerinde kullanılacak hidrojenin önce başka bir enerji kaynağı kullanılarak üretilmesi gerekir (IEA, 2025; IRENA, 2024b).

Bu nedenle hidrojen, birincil enerji kaynağından çok bir enerji taşıyıcısı olarak tanımlanmalıdır. Üretilir, depolanır, taşınır ve ardından yakıt hücrelerinde, sanayide, ulaşımda veya uzun süreli depolama uygulamalarında kullanılır.

Hidrojenin çevresel etkisi üretim yöntemine bağlıdır. Yenilenebilir elektrik kullanılarak suyun elektroliziyle üretilen hidrojen düşük emisyonlu olabilirken, karbon yakalama olmaksızın fosil yakıtlardan üretilen hidrojen yüksek sera gazı emisyonlarına yol açabilir (IEA, 2025; IRENA, 2024b).

Bu nedenle bütünleşik enerji sistemlerinde hidrojen; üretim yöntemi, depolama ve taşıma gereksinimleri, olası yakıt hücresi uygulamaları, çevresel etkileri ve enerji okuryazarlığı açısından eğitsel değeri bakımından değerlendirilmelidir. Tablo 7.3, hidrojenin bir enerji taşıyıcısı olarak teknik, çevresel ve sistem düzeyindeki avantajlarını ve sınırlılıklarını özetlemektedir.

Tablo 7.3. Hidrojenin teknik, çevresel ve sistem düzeyindeki avantajları ve sınırlılıkları

Boyut	Avantaj / Katkı	Sınırlılık veya Dikkat Gerektiren Nokta
Enerji taşıma	Farklı kaynaklardan üretilebilir, depolanabilir ve farklı sektörlerde kullanılabilir.	Üretimi için başka bir enerji kaynağı gerekir; üretim ve dönüşüm aşamalarında verim kayıpları oluşabilir.
Karbon emisyonları	Yeşil hidrojen kullanım noktasında doğrudan CO_2 üretmez ve fosil yakıtların yerini aldığında emisyon azaltımını destekleyebilir.	Üretim yöntemi fosil yakıt temelliyse yüksek emisyonlar oluşabilir; yaşam döngüsü emisyonları birlikte değerlendirilmelidir.
Depolama ve sistem esnekliği	Uzun süreli enerji depolama, mevsimsel dengeleme ve fazla yenilenebilir elektriğin kullanımı için değerlendirilebilir.	Düşük hacimsel enerji yoğunluğu nedeniyle sıkıştırma, sıvılaştırma veya kimyasal taşıyıcılar gibi özel altyapılar gerekir.
Kullanım alanı	Sanayi, ulaşım, elektrik sistemi ve kimya sektöründe tamamlayıcı rol oynayabilir.	Her uygulama ekonomik veya teknik olarak uygun değildir; doğrudan elektrifikasyonun mümkün olduğu yerlerde elektrikli çözümler öncelenmelidir.
Enerji güvenliği	Yerel yenilenebilir kaynaklardan üretildiğinde enerji ithalatına bağımlılığı azaltabilir.	Boru hatları, depolama, güvenlik ve son kullanım altyapısı için yüksek yatırım gerekebilir.
Çevresel etki	Düşük emisyonlu üretim koşullarında iklim hedeflerini ve sektörler arası enerji dönüşümünü destekleyebilir.	Su kullanımı, yenilenebilir elektrik ihtiyacı, malzeme gereksinimleri, sızıntı ve güvenlik dikkate alınmalıdır.

7.4.1. Enerji Taşıyıcısı Olarak Hidrojen

Hidrojen enerji sistemlerinde farklı amaçlarla kullanılabilir. İlk olarak sanayide hammadde olarak kullanılır. Hidrojen uzun süredir amonyak, metanol ve rafineri süreçlerinde kullanılmaktadır. İkinci olarak yakıt hücrelerinde elektrik üretmek için kullanılabilir. Üçüncü olarak, fazla yenilenebilir elektriğin daha sonra kullanılmak üzere depolanması için kimyasal bir enerji taşıyıcısı olarak değerlendirilebilir.

Hidrojenin birim kütle başına enerji içeriği yüksektir; ancak normal koşullarda düşük yoğunluklu bir gazdır ve bu nedenle birim hacim başına enerji yoğunluğu düşüktür. Bu nedenle sıkıştırma, sıvılaştırma veya kimyasal taşıyıcılarda depolama gibi ek altyapılar gereklidir (DOE, 2026g).

Hidrojenin enerji dönüşümündeki önemi özellikle doğrudan elektrifikasyonun zor olduğu alanlarda artmaktadır. IRENA, karayolu yük taşımacılığı, deniz taşımacılığı, havacılık, demir-çelik, kimya ve petrokimya sektörlerini dönüştürülmesi daha zor sektörler arasında göstermektedir (IRENA, 2024b).

Hidrojenin enerji sistemindeki başlıca rolleri ve kullanım alanları Tablo 7.4'te özetlenmiştir. Tablo, hidrojenin yalnızca endüstriyel bir

hammadde olarak değil; elektrik üretimi, uzun süreli depolama, ulaşım ve elektrifikasyonu zor endüstriyel süreçler için bir enerji taşıyıcısı olarak da işlev görebileceğini göstermektedir.

Tablo 7.4. Hidrojenin enerji sistemindeki rolleri ve kullanım alanları

Rol / Kullanım Alanı	Hidrojenin Rolü	Açıklama / Örnek
Endüstriyel hammadde	Kimyasal üretim için girdi	Amonyak, metanol ve rafineri süreçlerinde kullanılır; düşük emisyonlu hidrojen bu alanlarda emisyon azaltımına katkı sağlayabilir.
Enerji taşıyıcısı ve depolama	Yenilenebilir elektrikten üretilebilir ve daha sonra kullanılabilir	Fazla elektrik kimyasal enerji olarak depolanabilir ve uzun süreli dengeleme için kullanılabilir.
Ağır ulaşım	Yakıt veya sentetik yakıtlar için girdi	Batarya çözümlerinin sınırlı olduğu ağır karayolu taşımacılığı, deniz taşımacılığı ve havacılık yakıtları için tamamlayıcı seçenek olabilir.
Elektrik ve yedek güç	Yakıt hücreleri yoluyla elektrik üretimi	Yedek güç sistemlerinde, uzak bölgelerde veya özel uygulamalarda kullanılabilir.
Endüstriyel ısı ve azaltımı zor sektörler	Yüksek sıcaklık veya indirgeme süreçleri için düşük karbonlu seçenek	Çelik, kimya ve bazı endüstriyel süreçlerde fosil yakıtların kısmen yerini alabilir.
Yakıt ve kimyasal üretimi	E-yakıtların ve kimyasal ürünlerin sentezi	Karbon kaynağı, düşük emisyonlu elektrik ve uygun altyapı gerektirir.

7.4.2. Hidrojen Üretim Yöntemleri ve Renk Sınıflandırması

Hidrojen farklı yöntemlerle üretilebilir. Uzun süredir en yaygın üretim yöntemleri, doğal gazdan buhar metan reformasyonu ve kömür gazlaştırma gibi fosil yakıt temelli süreçler olmuştur (Xu et al., 2022). Bu yöntemler karbondioksit emisyonları yaratır. Hidrojenin düşük karbonlu veya yenilenebilir olarak değerlendirilebilmesi için üretim sırasında oluşan emisyonların azaltılması gerekir.

Hidrojen üretiminde renk temelli sınıflandırma yaygın olarak kullanılmaktadır. Ancak bu renkler tek başına yeterli değildir. Asıl önemli olan, üretim sürecinin yaşam döngüsü sera gazı emisyonudur. “Yeşil”, “mavi” veya “gri” gibi etiketler pratik bir açıklama sağlar; ancak hidrojenin gerçek çevresel etkisi üretim yöntemi, enerji kaynağı, karbon yakalama oranı ve tedarik zinciri emisyonlarıyla birlikte değerlendirilmelidir.

Tablo 7.5, hidrojenin çevresel açıdan tek tip bir yakıt olmadığını göstermektedir. Kullanım noktasında hidrojen molekülü aynı olsa da iklim üzerindeki etkisi üretim yöntemine, enerji kaynağına, karbon yakalama oranına ve tedarik zinciri emisyonlarına bağlıdır. Bu nedenle bu sınıflandırma, öğrencilerin hidrojenin sürdürülebilirliğinin yalnızca nasıl kullanıldığına değil, nasıl üretildiğine göre değerlendirilmesi gerektiğini anlamalarına yardımcı olabilir.

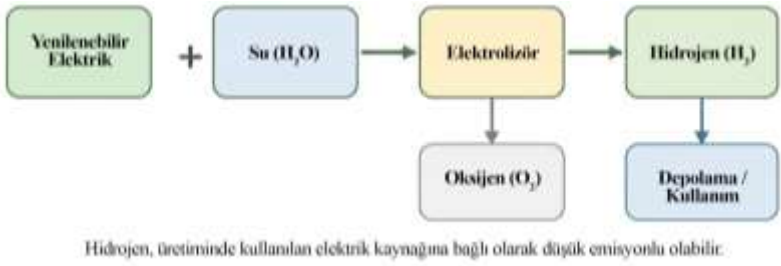
Tablo 7.5. Hidrojen üretiminde yaygın renk sınıflandırması

Hidrojen Türü	Üretim Yöntemi	Karbon Açısından Genel Değerlendirme
Gri hidrojen	Doğal gazdan üretilir; karbon yakalama uygulanmaz.	Yüksek CO_2 emisyonlarına neden olabilir.
Kahverengi/siyah hidrojen	Kömür veya linyit gazlaştırması yoluyla üretilir.	En yüksek emisyona sahip hidrojen türleri arasındadır.
Mavi hidrojen	Doğal gaz veya kömürden üretilir; CO_2'nin bir kısmı yakalanıp depolanır.	Emisyonları azaltabilir; ancak karbon yakalama oranı ve metan sızıntısı önemlidir.
Yeşil hidrojen	Yenilenebilir elektrik kullanılarak su elektroliziyle üretilir.	Düşük emisyonlu hidrojen için en önemli seçeneklerden biridir.
Pembe/mor hidrojen	Nükleer elektrik kullanılarak elektrolizle üretilir.	Düşük karbonlu olabilir, ancak yenilenebilir değildir.
Turkuaz hidrojen	Metan piroliziyle üretilir; katı karbon oluşur.	Teknoloji koşullarına ve karbon yönetimine bağlıdır.

7.4.3. Yeşil Hidrojen ve Elektroliz

Yeşil hidrojen, yenilenebilir elektrik kullanılarak suyun elektrolizi yoluyla üretilen hidrojendir. Elektroliz sırasında su molekülü elektrik enerjisi yardımıyla hidrojen ve oksijene ayrılır (Varsha and Nageswaran, 2020). Elektrik güneş, rüzgâr, hidroelektrik veya jeotermal enerji gibi yenilenebilir kaynaklardan sağlanırsa, üretim sırasında karbon emisyonları önemli ölçüde azaltılabilir.

Elektroliz, düşük emisyonlu hidrojen üretimi için kritik teknolojilerden biridir. IEA, elektrolizörleri yenilenebilir veya nükleer elektrikten düşük emisyonlu hidrojen üretmek için önemli bir teknoloji olarak değerlendirmektedir (IEA, 2024d).



Şekil 7.2. Yeşil hidrojen üretiminde elektroliz süreci.

Şekil 7.2, yeşil hidrojen üretiminde kullanılan elektroliz sürecini göstermektedir. Yenilenebilir elektriğin suyu hidrojen ve oksijene ayırmak için nasıl kullanılabileceğini ve hidrojenin bütünleşik yenilenebilir enerji sistemleri için tamamlayıcı bir enerji taşıyıcısı hâline nasıl gelebileceğini ortaya koyar. Şekil ayrıca yeşil hidrojenin doğrudan doğadan elde

edilmediğini; yenilenebilir elektrik, su, elektrolizör ve depolama altyapısı gerektirdiğini vurgular. Elektrolizör teknolojileri maliyet, verimlilik, esneklik ve malzeme gereksinimleri bakımından farklılık gösterir. Bu teknik ayrıntılar uygulamanın ölçeğine bağlı olarak önem kazansa da bu kitaptaki temel vurgu, yeşil hidrojenin yalnızca yenilenebilir elektrik, uygun su yönetimi, güvenli depolama ve uygun kullanım alanları sağlandığında düşük emisyonlu olabileceğidir.

7.4.4. Hidrojenin Depolanması ve Taşınması

Hidrojenin enerji sistemlerinde kullanılabilmesi için güvenli biçimde depolanması ve taşınması gerekir. Hidrojen sıkıştırılmış gaz olarak, çok düşük sıcaklıklarda sıvılaştırılarak veya amonyak, metanol ve metal hidritler gibi taşıyıcılar içinde depolanabilir (Hwang et al., 2023). Seçilecek yöntem kullanım alanına, mesafeye, maliyete, güvenlik gereksinimlerine ve altyapıya bağlıdır.

Hidrojen hafif bir gaz olduğu ve hacimsel enerji yoğunluğu düşük olduğu için depolanması basit değildir. Bu nedenle basınçlı tanklar, kriyojenik sıvılaştırma veya kimyasal taşıyıcılar gibi özel çözümler gereklidir (DOE, 2026g).

Tablo 7.6. Hidrojen depolama ve taşıma yöntemleri

Yöntem	Açıklama	Avantaj	Sınırlılık
Sıkıştırılmış gaz	Hidrojen yüksek basınç altında tanklarda depolanır.	Araçlar ve kısa-orta mesafeli uygulamalar için uygundur.	Yüksek basınçlı tanklar ve güvenlik önlemleri gerektirir.
Sıvı hidrojen	Hidrojen çok düşük sıcaklıkta sıvılaştırılır.	Daha yüksek hacimsel yoğunluk sağlar.	Sıvılaştırma enerji tüketir ve kriyojenik altyapı gerektirir.
Amonyak	Hidrojen amonyak molekülü içinde taşınabilir.	Uluslararası taşımacılık için değerlendirilebilir.	Toksisite, dönüşüm verimliliği ve güvenlik önemlidir.
Metanol ve sıvı organik taşıyıcılar	Hidrojen kimyasal taşıyıcılarda depolanır.	Mevcut sıvı yakıt altyapısıyla ilişkilendirilebilir.	Dönüşüm süreçleri enerji ve teknoloji gerektirir.
Metal hidritler	Hidrojen belirli metallerle katı formda depolanabilir.	Güvenli ve kompakt depolama potansiyeline sahiptir.	Ağırlık, maliyet ve ısı yönetimi sorun olabilir.
Boru hatları	Hidrojen gazı boru hattıyla taşınır.	Büyük hacimlerde sürekli taşıma için uygundur.	Malzeme uyumluluğu, sızıntı kontrolü ve altyapı yatırımı gerektirir.

Başlıca hidrojen depolama ve taşıma yöntemleri Tablo 7.6'da özetlenmiştir. Tablo, her yöntemin enerji yoğunluğu, güvenlik, maliyet, altyapı ihtiyacı ve kısa ya da uzun mesafeli taşımaya uygunluk açısından farklı avantaj ve sınırlılıklara sahip olduğunu göstermektedir. Depolama ve taşıma, hidrojen ekonomisinin en önemli zorlukları arasındadır. Hidrojen üretebilmek

tek başına yeterli değildir; hidrojenin üretim yerinden kullanım yerine güvenli, ekonomik ve düşük kayıplı biçimde ulaştırılması da gerekir (Ural and Karaca, 2016).

7.4.5. Yakıt Hücreleri ve Hidrojen Kullanımı

Yakıt hücreleri, hidrojenin kimyasal enerjisini doğrudan elektrik enerjisine dönüştüren sistemlerdir. Bir yakıt hücresinde hidrojen anot tarafına, oksijen veya hava ise katot tarafına verilir. Hidrojen molekülleri protonlara ve elektronlara ayrılır; elektronlar dış devreden geçerek elektrik akımı oluşturur, protonlar ise elektrolitten geçerek oksijenle birleşir ve su oluşturur (Li and Yu, 2021).

Yakıt hücreleri pillerle benzer biçimde elektrik üretir; ancak pillerden farklı olarak yakıt sağlandığı sürece çalışmaya devam eder. Bu özellik yedek güç, araçlar ve bazı sabit güç uygulamaları için önemlidir (DOE, 2026b).
Hidrojenin tüm sektörlerde aynı ölçüde kullanılması beklenmemelidir. Doğrudan elektrifikasyonun kolay ve verimli olduğu alanlarda elektrikli çözümler daha uygun olabilir. Hidrojen özellikle yüksek sıcaklıklı endüstriyel süreçler, kimyasal hammadde üretimi, uzun mesafeli ulaşım ve uzun süreli enerji depolama için daha stratejik bir seçenek olarak görülmelidir.

7.4.6. Hidrojen Enerjisinin Çevresel Etkileri

Hidrojenin çevresel etkileri üretim yöntemine bağlıdır. Hidrojen kullanım noktasında yakıldığında veya yakıt hücresinde kullanıldığında karbondioksit oluşmaz; ancak hidrojen fosil yakıtlardan üretilirse üretim aşamasında önemli sera gazı emisyonları ortaya çıkabilir. Bu nedenle hidrojenin "temiz" olup olmadığını belirleyen temel unsur üretim sürecidir.

Yeşil hidrojen yenilenebilir elektrikle üretildiğinde düşük emisyonlu bir seçenek olabilir. Ancak yeterli yenilenebilir elektrik, uygun bir su kaynağı, elektrolizör kapasitesi ve depolama-taşıma altyapısı gereklidir. IRENA ve Bluerisk tarafından hazırlanan bir rapor, hidrojen üretiminde su yönetiminin önemli olduğunu ve su kullanımının proje değerlendirmelerinde dikkate alınması gerektiğini vurgulamaktadır (IRENA and Bluerisk, 2023).

Hidrojen depolama ve taşımanın da çevresel ve güvenlik boyutları vardır. Hidrojen küçük ve yanıcı bir moleküldür; bu nedenle sızıntı kontrolü, havalandırma, sensörler, uygun malzeme seçimi ve güvenlik standartları önemlidir. Ayrıca hidrojen amonyak veya metanol gibi taşıyıcılara dönüştürüldüğünde bu maddelerin çevresel ve sağlık etkileri de değerlendirilmelidir.

Hidrojen enerjisinin sürdürülebilirliği için üç temel koşul önemlidir: hidrojen düşük emisyonlu yöntemlerle üretilmeli, doğrudan elektrifikasyonun daha uygun olduğu alanlarda gereksiz yere kullanılmamalı ve depolama-taşıma altyapısı güvenli biçimde planlanmalıdır.

Şekil 7.3, hidrojenin her durumda otomatik olarak en iyi çözüm olmadığını göstermektedir. Hidrojen özellikle doğrudan elektrifikasyonun zor olduğu ve düşük emisyonlu üretim, güvenli depolama-taşıma altyapısı ile

uygun kaynak koşullarının sağlanabildiği alanlarda daha anlamlı hâle gelir. Şekil ayrıca hidrojenin sürdürülebilirliğinin yalnızca kullanımına değil; nasıl üretildiğine, yönetildiğine ve daha geniş enerji sistemine nasıl entegre edildiğine de bağlı olduğunu vurgulamaktadır.

Şekil 7.3. Hidrojen kullanımı için sürdürülebilirlik karar akışı.

7.4.7. Hidrojen Enerjisinin Eğitsel Kullanımı

Hidrojen enerjisi, öğrencilerin enerji dönüşümü, kimya, elektrik, su elektrolizi, yakıt hücreleri, yenilenebilir enerji ve sürdürülebilirlik konularını birlikte öğrenmelerine yardımcı olan uygun bir örnektir. Bu konu fen, kimya, fizik, çevre eğitimi ve STEM etkinlikleriyle ilişkilendirilebilir.

Hidrojen sınıfta ele alınırken güvenliği önceleyen bir yaklaşım benimsenmelidir. Hidrojen gazı üretimi ve yanmasını içeren deneyler yalnızca uygun laboratuvar koşullarında ve öğretmen gözetiminde yapılmalıdır. Daha güvenli etkinlikler arasında elektroliz model çizimleri, yakıt hücresi çalışma diyagramları, hidrojen renk sınıflandırması ve sürdürülebilirlik tartışmaları yer alır.

Kutu 7.2. Sınıf içi etkinlik önerisi: Hidrojen renklerini sürdürülebilirlik açısından karşılaştırma

Etkinlik Aşaması	Açıklama
Amaç	Hidrojenin çevresel etkisinin üretim yöntemine bağlı olduğunu anlamak.
Malzemeler	Hidrojen türü kartları, renkli kalemler ve değerlendirme çizelgesi.
Uygulama	Öğrenciler gri, mavi, yeşil, pembe ve turkuaz hidrojen türlerini karşılaştırır.
Değerlendirme	Her tür emisyon, maliyet, altyapı, su kullanımı ve uygulanabilirlik açısından puanlanır.
Tartışma	"Hidrojen her zaman temiz midir?" sorusu sınıfta tartışılır.
Sonuç	Öğrenciler hidrojen kullanımının hangi alanlarda daha uygun olduğunu gerekçeleriyle açıklar.

Bu etkinlik, öğrencilerin hidrojeni yalnızca "temiz yakıt" olarak değil; üretim yöntemi, enerji kaynağı, altyapı, su kullanımı ve çevresel etkilerle ilişkili biçimde değerlendirmelerine yardımcı olur (Kutu 7.2).

7.4.8. Enerji Okuryazarlığı Açısından Değerlendirme

Hidrojen enerjisi, enerji okuryazarlığı açısından güçlü bir örnektir; çünkü öğrencilerin yalnızca bir teknolojiyi tanımasını değil, üretim yöntemi, kaynak seçimi, kullanım alanı, maliyet, güvenlik ve çevresel etki arasında ilişki kurmasını gerektirir. Enerji okuryazarlığı literatüründe enerji bilgisi, tutumlar, davranışlar, karar verme ve sorumlu eylem birlikte ele alınır (DeWaters et al., 2013; Ramachandran et al., 2024; Santillán and Cedano, 2023).

Hidrojen aynı zamanda sosyobilimsel bir tartışma konusudur. "Yeşil hidrojen nerede kullanılmalıdır?", "Hidrojen mi yoksa doğrudan elektrik kullanımı mı daha uygundur?" ve "Su stresi yaşayan bölgelerde hidrojen üretimi nasıl planlanmalıdır?" gibi sorular teknik bilginin yanı sıra etik, çevresel ve toplumsal değerlendirme gerektirir. Bu açıdan hidrojen, öğrencilerin kanıta dayalı karar verme ve sürdürülebilirlik odaklı düşünme becerilerini geliştirmek için kullanılabilir (Sadler, 2004; Zeidler, 2014).

Bu nedenle hidrojen eğitimi hidrojeni "temiz yakıt" olarak sunmakla sınırlı olmamalıdır. Öğrenciler gri, mavi ve yeşil hidrojen arasındaki farkları, yaşam döngüsü emisyonlarını, su kullanımını, depolama ve taşıma zorluklarını ve doğrudan elektrifikasyonla karşılaştırmaları öğrenmelidir. Böyle bir yaklaşım, hidrojenin enerji dönüşümündeki gerçekçi ve sınırlı fakat stratejik rolünü netleştirmeye yardımcı olur.

7.5. Seçilmiş Ülke Örneklerine Dayalı Genel Değerlendirme

Türkiye, Yunanistan, Portekiz ve Kuzey Makedonya yenilenebilir enerji kaynakları açısından farklı potansiyellere sahiptir (IEA, 2021, 2023, 2023a, 2026a). Bu farklılıklar enerji dönüşümünün her ülkede aynı şekilde gerçekleşmeyeceğini göstermektedir. Her ülkenin coğrafi yapısı, enerji talebi, ekonomik kapasitesi, sanayi yapısı, mevcut enerji altyapısı, enerji ithalatına bağımlılığı ve politika öncelikleri farklıdır. Bu nedenle yenilenebilir enerji dönüşümü her ülkenin kendi kaynak yapısı ve kalkınma hedefleri dikkate alınarak planlanmalıdır.

Bu ülke örnekleri içinde yeşil hidrojen de özellikle yenilenebilir elektrik potansiyelinin sanayi, ulaşım ve uzun süreli depolama gibi alanlara aktarılması için tamamlayıcı bir seçenek olarak değerlendirilebilir. Ancak hidrojenin bu rolü her ülkenin yenilenebilir elektrik arzı, su kaynakları, altyapısı, sanayi yapısı ve maliyet koşulları dikkate alınarak planlanmalıdır. Bu nedenle yeşil hidrojen, yenilenebilir enerji kaynaklarının yerine geçen ayrı bir kaynak olarak değil, bütünleşik enerji sistemlerini destekleyebilecek bir enerji taşıyıcısı olarak ele alınmalıdır.

Seçilmiş ülke örneklerinin yenilenebilir enerji potansiyeli, öne çıkan kaynaklar ve genel dönüşüm koşulları dikkate alınarak Tablo 7.7'de özetlenmiştir.

Tablo 7.7. Seçilmiş ülke örneklerinde yenilenebilir enerji potansiyelinin genel değerlendirmesi

Ülke	Öne Çıkan Yenilenebilir Kaynaklar	Genel Değerlendirme
Türkiye	Güneş, rüzgâr, hidroelektrik, jeotermal, biyokütle ve yeşil hidrojen potansiyeli	Geniş coğrafyası ve çeşitli kaynak tabanı nedeniyle karma bir yenilenebilir enerji sistemi için güçlü potansiyele sahiptir.
Yunanistan	Güneş, rüzgâr, deniz üstü rüzgâr, jeotermal ve biyokütle	Ada yapısı ve güneş-rüzgâr potansiyeli enerji dönüşümünü destekler; şebeke bağlantısı ve depolama önemlidir.
Portekiz	Rüzgâr, güneş, hidroelektrik, dalga enerjisi, biyokütle ve yeşil hidrojen	Atlantik kıyısı, yenilenebilir elektrik deneyimi ve liman altyapısı enerji dönüşümünde güçlü bir örnek oluşturur.
Kuzey Makedonya	Güneş, hidroelektrik, biyokütle, sınırlı jeotermal ve rüzgâr potansiyeli	Daha küçük enerji sistemi nedeniyle yerel ve bölgesel yenilenebilir enerji yatırımları önemlidir.

Tablo 7.7'de özetlenen ülke örnekleri, sürdürülebilir enerji dönüşümünün tek bir modelle açıklanamayacağını göstermektedir. Türkiye için güneş, rüzgâr, hidroelektrik, jeotermal ve biyokütle kaynaklarını birlikte değerlendirmek önemlidir; Yunanistan'da ise ada sistemleri, deniz üstü rüzgâr ve güneş enerjisi öne çıkmaktadır. Portekiz, rüzgâr, güneş ve deniz enerjisi gibi farklı yenilenebilir kaynakları enerji sistemine entegre etmesiyle dikkat çekmektedir. Kuzey Makedonya'da güneş ve hidroelektrik kaynaklar enerji arzını çeşitlendirmek ve dışa bağımlılığı azaltmak açısından önemli fırsatlar sunmaktadır.

Bu örneklerden çıkan ortak sonuç, başarılı bir yenilenebilir enerji dönüşümünün yalnızca teknik potansiyele bağlı olmadığıdır. Şebeke altyapısı, enerji depolama, finansman olanakları, yerel katılım, çevresel planlama, eğitim ve enerji okuryazarlığı da başarının temel belirleyicileridir. Bu nedenle ülkeler arasında tek bir doğru model aramak yerine, her ülkenin kendi kaynak yapısına, kalkınma önceliklerine ve toplumsal koşullarına uygun bütünleşik enerji stratejileri geliştirmesi daha gerçekçidir.

Bu değerlendirme, bölümün genel mesajını desteklemektedir: Yenilenebilir enerji kaynakları yerel koşullara göre seçilmeli, farklı teknolojiler birbirini tamamlayacak şekilde planlanmalı ve her enerji projesi teknik, çevresel, ekonomik ve toplumsal boyutlarıyla birlikte ele alınmalıdır.

7.6. Enerji Okuryazarlığı Açısından Genel Değerlendirme

Yenilenebilir enerji türlerini karşılaştırmak enerji okuryazarlığının gelişimi açısından önemlidir. Enerji okuryazarı bir birey yalnızca enerji kaynaklarının adlarını bilen kişi değildir; bu kaynakları çevresel etki, maliyet,

süreklilik, toplumsal kabul, altyapı gereksinimleri ve adil geçiş boyutlarıyla birlikte değerlendirebilen kişidir.

Bu bölümde yapılan karşılaştırmalar, okuyucuların yenilenebilir enerji kaynaklarını basit bir "iyi-kötü" ayrımıyla değil, çok ölçütlü bir karar verme süreci içinde değerlendirmelerine yardımcı olur. Güneş ve rüzgâr enerjisinin değişken üretimi, hidroelektrik ve jeotermal enerjinin sistem esnekliği, biyokütle ve biyoyakıtların hammadde yönetimi, deniz-okyanus enerjisinin teknolojik olgunluğu ve yeşil hidrojenin tamamlayıcı rolü birlikte ele alınmalıdır.

Bu nedenle yenilenebilir enerji eğitimi teknolojilerin tanıtımıyla sınırlı olmamalıdır. Öğrenciler ve okuyucular veri yorumlama, kaynakları karşılaştırma, yerel koşulları dikkate alma, yaşam döngüsü etkilerini sorgulama ve farklı paydaşların bakış açılarını değerlendirme becerileri geliştirmelidir. Böyle bir yaklaşım enerji kararlarının daha bilinçli, katılımcı ve sürdürülebilir biçimde tartışılmasına katkı sağlar.

7.7. Bölüm Özeti ve Tartışma Soruları

Bu bölümde yenilenebilir enerji türleri karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiş ve bütünleşik yenilenebilir enerji sistemleri yaklaşımı tartışılmıştır. Güneş, rüzgâr, hidroelektrik, jeotermal, deniz-okyanus enerjisi, biyokütle, biyoyakıtlar ve yeşil hidrojen farklı kullanım alanlarına, avantajlara ve sınırlılıklara sahiptir. Bu nedenle enerji kararları tek bir kaynağa değil, kaynakların birbirini nasıl tamamlayabileceğine odaklanmalıdır.

Bütünleşik yenilenebilir enerji sistemleri; kaynak çeşitliliği, enerji verimliliği, depolama, akıllı şebekeler, elektrifikasyon, sürdürülebilir ısıtma, biyoyakıtlar ve yeşil hidrojenin birlikte planlanmasını gerektirir. Bu yapı içinde yeşil hidrojen birincil enerji kaynağı olarak değil, yenilenebilir enerji sistemlerini tamamlayabilecek bir enerji taşıyıcısı olarak konumlandırılmalıdır.

Seçilmiş ülke örnekleri, yenilenebilir enerji dönüşümünün her ülkede aynı şekilde ilerlemediğini göstermektedir. Coğrafi kaynak potansiyeli, enerji altyapısı, ekonomik yapı, politika hedefleri, toplumsal kabul ve adil geçiş koşulları dönüşümün yönünü ve hızını belirler.

Enerji okuryazarlığı açısından bu bölüm, okuyucuların enerji kaynaklarını yalnızca teknik özellikleriyle değil; çevresel, ekonomik, toplumsal ve etik sonuçlarıyla birlikte değerlendirmelerine yardımcı olur.

Tartışma Soruları

1. Yenilenebilir enerji türleri karşılaştırılırken hangi ölçütler dikkate alınmalıdır?
2. Güneş ve rüzgâr enerjisinin değişken üretimi bütünleşik enerji sistemlerinde hangi ihtiyaçları ortaya çıkarır?
3. Hidroelektrik, jeotermal enerji ve biyokütle gibi kaynaklar sistem esnekliğine nasıl katkı sağlayabilir?
4. Yeşil hidrojen neden ayrı bir enerji kaynağı değil, bir enerji taşıyıcısı olarak değerlendirilmelidir?
5. Depolama, akıllı şebekeler ve enerji verimliliği bütünleşik enerji sistemlerinde neden birlikte ele alınmalıdır?
6. Seçilmiş ülke örnekleri, yenilenebilir enerji dönüşümünün yerel koşullara bağlı olduğunu nasıl göstermektedir?
7. Enerji okuryazarlığı yenilenebilir enerji seçenekleri arasında karar verme sürecine nasıl katkıda bulunur?

SONUÇ

Enerji, üretim ve ulaşımdan konut, iletişim, tarım ve sanayiye kadar modern yaşamın hemen her alanını şekillendiren temel bir unsurdur; ancak yalnızca teknik bir konu değildir. Enerji üretimi ve tüketimi iklim değişikliği, hava kirliliği, doğal kaynak kullanımı, ekonomik kalkınma, enerji güvenliği, toplumsal eşitsizlikler ve gelecek nesillerin yaşam koşullarıyla doğrudan bağlantılıdır. Bu nedenle enerji ile çevre arasındaki ilişkiyi anlamak, çağımızın en önemli bilimsel, toplumsal ve eğitsel gerekliliklerinden biridir.

Bu kitapta enerji ve çevre ilişkisi yalnızca enerji kaynaklarının tanıtımıyla sınırlı tutulmamıştır. Bunun yerine enerji okuryazarlığı, sürdürülebilirlik, karar verme, yaşam döngüsü düşüncesi, toplumsal kabul ve adil geçiş gibi kavramlarla birlikte incelenmiştir.

Enerji, Çevre ve Enerji Okuryazarlığı

Enerji okuryazarlığı bu kitabın ayırt edici kavramlarından biridir. Enerji okuryazarı birey yalnızca enerji kaynaklarının adlarını veya teknik özelliklerini bilen kişi değildir. Aksine böyle bir birey, enerji üretiminin çevresel sonuçlarını, enerji tüketiminin toplumsal etkilerini, kaynak seçiminin ekonomik boyutlarını ve enerji politikalarının gelecek nesiller açısından sonuçlarını birlikte değerlendirebilir.

Bu bağlamda enerji okuryazarlığı bilgi edinmenin ötesine geçer. Eleştirel düşünmeyi, kanıta dayalı karar vermeyi, farklı seçenekleri karşılaştırabilmeyi, belirsizlikleri değerlendirmeyi ve toplumsal sorumluluk geliştirmeyi içerir (DeWaters et al., 2013; Sadler, 2004). Enerjiyle ilgili kararlar yalnızca uzmanlara bırakılamayacak kadar toplumsal öneme sahip olduğundan, enerji okuryazarlığı demokratik katılım ve sürdürülebilir yurttaşlık açısından da önemlidir.

Enerji Kaynaklarını Değerlendirmede Çok Ölçütlü Yaklaşım

Enerji kaynakları çoğunlukla yenilenebilir ve yenilenemeyen kaynaklar olarak sınıflandırılır. Bu sınıflandırma öğretici ve gereklidir; ancak tek başına yeterli değildir. Kaynağın hangi teknolojiyle kullanıldığı, nerede ve hangi ölçekte uygulandığı, nasıl finanse edildiği, hangi toplumsal etkileri yarattığı ve yaşam döngüsü boyunca hangi çevresel sonuçları ortaya çıkardığı da dikkate alınmalıdır.

Bu nedenle kitap boyunca enerji kaynaklarını değerlendirmek için çevresel etki, yaşam döngüsü etkileri, sistem maliyeti, süreklilik, enerji güvenliği, teknolojik uygulanabilirlik, altyapı gereksinimleri, toplumsal kabul ve adil erişim gibi ölçütler birlikte kullanılmıştır. Bu ölçütler, enerji seçeneklerini basit bir "iyi-kötü" ayrımıyla değil, bağlama duyarlı ve kanıta dayalı biçimde değerlendirmeyi mümkün kılar (NREL, 2021; Ramachandran et al., 2024).

Güneş ve rüzgâr enerjisi düşük karbonlu elektrik üretimi için güçlü seçeneklerdir; ancak arazi kullanımı, malzeme gereksinimleri, değişken üretim, geri dönüşüm ve toplumsal kabul ile birlikte ele alınmalıdır. Hidroelektrik, jeotermal enerji, biyoenerji ve deniz-okyanus enerjisi de yerel koşullara bağlı olarak farklı avantajlara ve sınırlılıklara sahiptir. Bu nedenle sürdürülebilir bir enerji karması tek bir kaynağın mutlak üstünlüğüne değil, kaynakların birbirini tamamlayacak biçimde planlanmasına dayanır.

Yenilenemeyen Enerji Kaynaklarından Sürdürülebilir Dönüşüme

Yenilenemeyen enerji kaynakları tarihsel olarak modern sanayileşme ve ekonomik büyümenin en önemli girdileri arasında yer almıştır. Kömür, petrol, doğal gaz ve nükleer enerji elektrik üretimi, ulaşım, sanayi, ısınma ve teknolojik gelişmede belirleyici roller oynamıştır. Bununla birlikte fosil yakıtlara dayalı bir enerji sistemi iklim değişikliği, hava kirliliği, sağlık etkileri, ekosistem baskısı ve dışa bağımlılık gibi ciddi sorunlar üretmiştir.

Fosil yakıt kullanımının azaltılması yalnızca çevresel bir tercih değil, aynı zamanda uzun vadeli toplumsal ve ekonomik bir zorunluluktur. Ancak bu dönüşüm dikkatli planlanmalıdır. Kömür bölgelerindeki istihdam, düşük gelirli hanelerin enerjiye erişimi, sanayi sektörlerinin dönüşümü, enerji fiyatları ve arz güvenliği ihmal edilirse enerji dönüşümü toplumsal dirençle karşılaşabilir. Bu nedenle fosil yakıtlardan çıkış adil geçiş ilkesiyle birlikte ele alınmalıdır (ILO, 2016).

Nükleer enerji bu tartışmada daha özel bir konuma sahiptir. İşletme sırasında düşük karbonlu elektrik sağlayabilme potansiyeli önemli bir avantajdır. Ancak radyoaktif atık yönetimi, yüksek yatırım maliyetleri, uzun inşaat süreleri, güvenlik konuları ve toplumsal kabul nükleer enerjinin dikkatle değerlendirilmesini gerektirir. Bu durum, enerji kaynaklarının tek bir ölçüte göre değerlendirilemeyeceğini bir kez daha göstermektedir.

Yenilenebilir Enerji, Bütünleşik Sistemler ve Yeşil Hidrojen

Yenilenebilir enerji kaynakları düşük karbonlu enerji sistemlerine geçişin merkezinde yer almaktadır. Güneş, rüzgâr, hidroelektrik, jeotermal enerji, deniz-okyanus enerjisi, biyokütle ve biyoyakıtlar farklı koşullarda farklı roller üstlenir. Ortak özellikleri, fosil yakıtlara bağımlılığı azaltma ve enerji sistemlerini daha sürdürülebilir kılma potansiyeline sahip olmalarıdır.

Ancak yenilenebilir enerji dönüşümü yeni santraller kurmakla sınırlı değildir. Güneş ve rüzgâr gibi değişken kaynakların yüksek payı enerji depolama, akıllı şebekeler, talep tarafı yönetimi, ara bağlantılar ve sistem esnekliği gerektirir. Hidroelektrik ve bazı jeotermal uygulamalar daha sürekli veya dengeleyici roller üstlenebilir. Biyokütle, biyogaz ve biyoyakıtlar depolanabilir enerji ve atık yönetimi açısından tamamlayıcı katkılar sağlayabilir. Deniz-okyanus enerjisi ise özellikle kıyı ve ada sistemleri için uzun vadeli potansiyele sahiptir.

Bu kitapta vurgulanan noktalardan biri, hidrojenin birincil enerji kaynağı değil, bir enerji taşıyıcısı olduğudur. Hidrojenin çevresel değeri hidrojenin kendisinden çok nasıl üretildiğine bağlıdır. Yenilenebilir elektrik kullanılarak su elektroliziyle üretilen yeşil hidrojen, düşük karbonlu enerji sistemlerinde tamamlayıcı bir rol oynayabilir (IEA, 2025).

Yeşil hidrojen her sektörde kullanılabilecek evrensel bir çözüm olarak görülmemelidir. Özellikle demir-çelik, kimya, uzun mesafeli ulaşım, deniz taşımacılığı, havacılık ve uzun süreli enerji depolama gibi doğrudan elektrifikasyonun zor olduğu alanlarda stratejik değere sahip olabilir. Aynı zamanda hidrojen üretimindeki enerji kayıpları, maliyetler, su gereksinimleri ve depolama-taşıma ile ilgili zorluklar dikkatle değerlendirilmelidir.

Toplumsal Kabul, Adil Geçiş ve Yerel Koşullar

Enerji dönüşümünün başarısı yalnızca teknolojik gelişmelere bağlı değildir. Toplumsal kabul, yerel katılım, faydaların adil paylaşımı ve güvenilir bilgiye erişim enerji projelerinin uygulanabilirliğini doğrudan etkiler (Wüstenhagen et al., 2007). Bir proje teknik olarak uygun ve ekonomik olarak cazip olsa bile, yerel halkın yaşam alanlarını, geçim kaynaklarını, kültürel değerlerini veya çevresel beklentilerini dikkate almadığında toplumsal dirençle karşılaşabilir.

Bu nedenle şeffaflık, katılımcı planlama, çevresel etki değerlendirmesi, yerel fayda mekanizmaları ve adil geçiş politikaları enerji projelerinde temel ilkeler olmalıdır. Enerji dönüşümü yalnızca karbon emisyonlarını azaltma süreci değildir; aynı zamanda daha adil, daha kapsayıcı ve daha dirençli toplumlar kurma fırsatıdır.

Seçilmiş ülke örnekleri, enerji dönüşümünün her ülkede aynı biçimde ilerlemediğini göstermektedir. Türkiye, Yunanistan, Portekiz ve Kuzey Makedonya gibi ülkeler farklı kaynak potansiyellerine, enerji altyapılarına, ekonomik koşullara ve politika önceliklerine sahiptir. Bu nedenle tek ve standart bir model benimsemek yerine, enerji dönüşümü yerel koşullara duyarlı ve öğrenmeye açık yaklaşımlarla yönlendirilmelidir.

Eğitim ve Gelecek Açısından Sonuçlar

Enerji ve çevre eğitimi, öğrencilerin yalnızca enerji kaynaklarını tanımasını değil, bu kaynakların çevresel, ekonomik ve toplumsal sonuçlarını birlikte değerlendirmesini de amaçlamalıdır. Bu kitapta yer alan etkinlikler, karşılaştırma tabloları ve tartışma soruları, öğrencilerin farklı enerji seçeneklerini kanıta dayalı biçimde analiz etmelerini desteklemek için tasarlanmıştır.

Sürdürülebilir enerji eğitimi disiplinler arası bir yaklaşım gerektirir. Fizik, kimya, biyoloji, coğrafya, ekonomi, mühendislik, çevre bilimi ve sosyal bilimler enerjiyle ilgili konularda birbirini tamamlar. Bu nedenle enerji eğitimi yalnızca teknik hesaplamalar üzerinden değil; değerler, karar verme süreçleri, toplumsal etkiler ve etik sorumluluklar üzerinden de ele alınmalıdır.

Geleceğin enerji sistemi daha düşük karbonlu, daha dijital, daha esnek ve yerel katılıma daha açık olacaktır. Bu süreçte bireysel enerji tercihleri, kurumsal yatırım kararları, devlet politikaları ve uluslararası iş birliği birlikte belirleyici olacaktır. Enerji okuryazarlığı, bu dönüşümün bilinçli, adil ve sürdürülebilir biçimde gerçekleşmesini sağlamak için temel bir gerekliliktir.

Genel Değerlendirme

Sonuç olarak bu kitap, enerji ve çevre arasındaki ilişkinin yalnızca teknolojik çözümlerle açıklanamayacağını göstermektedir. Enerji sistemi doğal kaynaklar, iklim, ekonomi, toplum, eğitim ve etik değerler arasında karmaşık ilişkiler bütünüdür. Bu nedenle enerji sorunlarına yönelik çözümler de bütüncül, çok ölçütlü ve katılımcı olmalıdır.

Yenilenemeyen enerji kaynaklarının çevresel ve toplumsal maliyetleri düşük karbonlu enerji sistemlerine geçişi gerekli kılmaktadır. Yenilenebilir enerji kaynakları bu dönüşümün temelini oluşturur; ancak onların da dikkatle planlanması, yaşam döngüsü etkilerinin izlenmesi, toplumsal kabul süreçlerinin güçlendirilmesi ve enerji sistemine entegrasyonlarının bütüncül biçimde yönetilmesi gerekir.

Enerji dönüşümü yalnızca bugünün enerji talebini karşılama meselesi değildir. Aynı zamanda gelecek nesillere daha yaşanabilir bir çevre, daha güvenli bir enerji sistemi, daha adil bir toplum ve daha bilinçli bir yurttaşlık kültürü bırakma sorumluluğudur. Bu sorumluluğu yerine getirmek için enerji okuryazarlığı, bilimsel bilgi, toplumsal katılım ve sürdürülebilir politika tasarımı birlikte geliştirilmelidir.

Bu kitabın temel mesajı, enerji geleceğinin tek bir kaynağa, tek bir teknolojiye veya tek bir politikaya indirgenemeyeceğidir. Sürdürülebilir bir enerji geleceği; enerji verimliliği, yenilenebilir kaynaklar, depolama, akıllı şebekeler, yeşil hidrojen, adil geçiş, toplumsal kabul ve bilinçli yurttaşlık arasında dengeli bir bütünleşmeyle mümkündür. Böyle bir bütünleşme sağlandığında enerji, çevre üzerinde baskı yaratan bir unsur olmaktan çıkıp sürdürülebilir kalkınmanın ve daha adil bir geleceğin temel araçlarından biri hâline gelebilir.

KAYNAKÇA

Abas, N., Kalair, A., & Khan, N. (2015). Review of fossil fuels and future energy technologies. *Futures*, *69*, 31–49.

Abbasi, T., Premalatha, M., & Abbasi, S. A. (2011). The return to renewables: Will it help in global warming control? *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *15*, 891–894.

Adewuyi, A. O., & Awodumi, O. B. (2017). Renewable and non-renewable energy-growth-emissions linkages: Review of emerging trends with policy implications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *69*, 275–291.

AGIC Energy. (2024). *Geothermal energy: What it is, types and more*. https://agicenergy.com/geothermal-energy-what-it-is-types-more/

Al-Ghussain, L. (2019). Global warming: review on driving forces and mitigation. *Environmental Progress & Sustainable Energy*, *38*(1), 13–21.

Ali, S., Yan, Q., Razzaq, A., et al. (2023). Modeling factors of biogas technology adoption: A roadmap towards environmental sustainability and green revolution. *Environmental Science and Pollution Research*, *30*, 11838–11860.

Allegretti, G., Montoya, M. A., Bertussi, L. A. S., et al. (2022). When being renewable may not be enough: Typologies of trends in energy and carbon footprint towards sustainable development. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *168*, 112860.

Ayata, S., Oylumluoğlu, G., & Alpaslan, M. M. (2024). Contributions of epistemological beliefs on energy literacy in lower-secondary school students in Turkey. *Journal of Baltic Science Education, 23*(3), 421–431. https://doi.org/10.33225/jbse/24.23.421

Bhattarai, H. (2022). Renewable energy and energy storage systems. *Energy Conversion Methods, Technology and Future Directions*, 269–289.

Bilgili, F., Lorente, D. B., Kuşkaya, S., et al. (2021). The role of hydropower energy in the level of CO_2 emissions: An application of continuous wavelet transform. *Renewable Energy*, *178*, 283–294.

Cevasco, D., Koukoura, S., & Kolios, A. J. (2021). Reliability, availability, maintainability data review for the identification of trends in offshore wind energy applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *136*, 110414.

Chen, Y., Xu, Z., Wang, J., et al. (2022). Multi-objective optimization of an integrated energy system against energy, supply-demand matching and exergo-environmental cost over the whole life-cycle. *Energy Conversion and Management*, *254*, 115203.

Chowdhury, M. S., Rahman, K. S., Selvanathan, V., et al. (2021). Current trends and prospects of tidal energy technology. *Environment, Development and Sustainability*, *23*, 8179–8194.

Devi, A., Bajar, S., Kour, H., et al. (2022). Lignocellulosic biomass valorization for bioethanol production: A circular bioeconomy approach. *BioEnergy Research*, *15*, 1820–1841.

DeWaters, J. E., & Powers, S. E. (2011). Energy literacy of secondary students in New York State (USA): A measure of knowledge, affect, and behavior. *Energy Policy*, *39*(3), 1699–1710. https://doi.org/10.1016/j.enpol.2010.12.049

DeWaters, J. E., Qaqish, B., Graham, M. E., & Powers, S. E. (2013). Designing an energy literacy questionnaire for middle and high school youth. *The Journal of*

Environmental Education, *44*(1), 56–78. https://doi.org/10.1080/00958964.2012.682615
Ember. (2024). *Global electricity review 2024*. https://ember-energy.org/latest-insights/global-electricity-review-2024/
Energy Institute. (2024). *Statistical review of world energy*. https://www.energyinst.org/statistical-review
European Commission. (2023). *Renewable energy directive: Targets and rules*. https://energy.ec.europa.eu/topics/renewable-energy/renewable-energy-directive-targets-and-rules/renewable-energy-directive_en
Eurostat. (2024). *Renewables account for 24.5% of EU energy use in 2023*. https://ec.europa.eu/eurostat/web/products-eurostat-news/w/ddn-20241219-3
Furuncu, Y. (2016). Türkiye'nin enerji bağımlılığı ve Akkuyu Nükleer Enerji Santralı. *Cumhuriyet Science Journal*, *37*, 198.
Guo, B., & Ringwood, J. V. (2021). A review of wave energy technology from a research and commercial perspective. *IET Renewable Power Generation*, *15*, 3065–3090.
Hameed, Z., Aslam, M., Khan, Z., et al. (2021). Gasification of municipal solid waste blends with biomass for energy production and resources recovery: Current status, hybrid technologies and innovative prospects. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *136*, 110375.
Hiğde, E. (2022). The effects of STEM-based alternative energy activities on STEM teaching intention and attitude. *E-International Journal of Educational Research*, *13*(2), 126–141. https://doi.org/10.19160/e-ijer.1072141
Hwang, J., Maharjan, K., & Cho, H. J. (2023). A review of hydrogen utilization in power generation and transportation sectors: Achievements and future challenges. *International Journal of Hydrogen Energy*, *48*, 28629–28648.
Idroes, G. M., Hardi, I., Hilal, I. S., et al. (2024). Economic growth and environmental impact: Assessing the role of geothermal energy in developing and developed countries. *Innovation and Green Development*, *3*, 100144.
IEA Bioenergy. (2024). *Development and deployment of advanced biofuel demonstration facilities*. https://task39.ieabioenergy.com/
Igwe, C. I. (2021). Geothermal energy: A review. *International Journal of Engineering Research and Technology*, *10*, 655–661.
Intergovernmental Panel on Climate Change. (2023). *Climate change 2023: Synthesis report*. https://www.ipcc.ch/report/ar6/syr/
International Atomic Energy Agency. (2024). *Climate change and nuclear power 2024: Financing nuclear energy in low carbon transitions*. https://doi.org/10.61092/iaea.sgyh-rjoq
International Energy Agency. (2020). *CCUS in clean energy transitions*. https://www.iea.org/reports/ccus-in-clean-energy-transitions
International Energy Agency. (2021). *Türkiye*. https://www.iea.org/countries/turkiye
International Energy Agency. (2022). *Nuclear power and secure energy transitions*. https://www.iea.org/reports/nuclear-power-and-secure-energy-transitions
International Energy Agency. (2023). *Greece*. https://www.iea.org/countries/greece
International Energy Agency. (2023a). *North Macedonia*. https://www.iea.org/countries/north-macedonia
International Energy Agency. (2024). *World energy outlook 2024*. https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2024

International Energy Agency. (2024a). *Global methane tracker 2024*. https://www.iea.org/reports/global-methane-tracker-2024
International Energy Agency. (2024b). *Carbon capture, utilisation and storage*. https://www.iea.org/energy-system/carbon-capture-utilisation-and-storage
International Energy Agency. (2024c). *Bioenergy*. https://www.iea.org/energy-system/renewables/bioenergy
International Energy Agency. (2024d). *Electrolysers*. https://www.iea.org/energy-system/low-emission-fuels/electrolysers
International Energy Agency. (2025). *Global hydrogen review 2025*. https://www.iea.org/reports/global-hydrogen-review-2025
International Energy Agency. (2026). *Hydropower*. https://www.iea.org/energy-system/renewables/hydroelectricity
International Energy Agency. (2026a). *Portugal*. https://www.iea.org/countries/portugal
International Hydropower Association. (2024). *World hydropower outlook 2024*. https://www.hydropower.org/publications/2024-world-hydropower-outlook
International Labour Organization. (2015). *Guidelines for a just transition towards environmentally sustainable economies and societies for all*. https://www.ilo.org/publications/guidelines-just-transition-towards-environmentally-sustainable-economies
International Labour Organization. (2016). *Guidelines for a just transition towards environmentally sustainable economies and societies for all*. https://www.ilo.org/publications/guidelines-just-transition-towards-environmentally-sustainable-economies
International Renewable Energy Agency, & Bluerisk. (2023). *Water for hydrogen production*. https://www.irena.org/Publications/2023/Dec/Water-for-hydrogen-production
International Renewable Energy Agency. (2022). *Bioenergy for the energy transition: Ensuring sustainability*. https://www.irena.org/Publications/2022/Aug/Bioenergy-for-the-Transition
International Renewable Energy Agency. (2024). *World energy transitions outlook 2024: 1.5°C pathway*. https://www.irena.org/Publications/2024/Nov/World-Energy-Transitions-Outlook-2024
International Renewable Energy Agency. (2024a). *Renewable power generation costs in 2023*. https://www.irena.org/Publications/2024/Sep/Renewable-Power-Generation-Costs-in-2023
International Renewable Energy Agency. (2024b). *Green hydrogen strategy: A guide to design*. https://www.irena.org/Publications/2024/Jul/Green-hydrogen-strategy-A-guide-to-design
International Renewable Energy Agency. (2025). *Renewable capacity statistics 2025*. https://www.irena.org/Publications/2025/Mar/Renewable-capacity-statistics-2025
Ivanova, S., Vesnina, A., Fotina, N., et al. (2022). An overview of carbon footprint of coal mining to curtail greenhouse gas emissions. *Sustainability*, *14*, 1–22.
Justice, G., Nyantakyi, G., & Isaac, S. H. (2024). The effect of renewable energy on carbon emissions through globalization. *Heliyon*, *10*, e26894.
Jyothi, R. K., De Melo, L. G. T. C., Santos, R. M., et al. (2023). An overview of thorium as a prospective natural resource for future energy. *Frontiers in Energy Research*, *11*, 1–13.

Kataray, T., Nitesh, B., Yarram, B., et al. (2023). Integration of smart grid with renewable energy sources: Opportunities and challenges – A comprehensive review. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, *58*, 103363.

Khan, M. A. H., Bonifacio, S., Clowes, J., et al. (2021). Investigation of biofuel as a potential renewable energy source. *Atmosphere*, *12*. https://doi.org/10.3390/atmos12101289

Khoshnevisan, B., Duan, N., Tsapekos, P., et al. (2021). A critical review on livestock manure biorefinery technologies: Sustainability, challenges, and future perspectives. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *135*, 110033.

Kuriqi, A., Pinheiro, A. N., Sordo-Ward, A., & Garrote, L. (2021). Ecological impacts of run-of-river hydropower plants: Current status and future prospects on the brink of energy transition. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111060

Lee, R. P. (2016). Misconceptions and biases in German students' perception of multiple energy sources: Implications for science education. *International Journal of Science Education*, *38*, 1036–1056.

Leite, L., Dourado, L., Morgado, S., Afonso, A. S., Macedo, F., & Pereira, M. R. (2026). Energy literacy of prospective primary school teachers: A comparative study in a Portuguese university. *Education Sciences, 16*(4), 535. https://doi.org/10.3390/educsci16040535

Li, J., & Yu, T. (2021). Sensors integrated control of PEMFC gas supply system based on large-scale deep reinforcement learning. *Sensors*, *21*, 1–19.

Maka, A. O. M., & Alabid, J. M. (2022). Solar energy technology and its roles in sustainable development. *Clean Energy*, *6*, 476–483.

Masood, N., HudsoneEdwards, K., & Farooqi, A. (2020). True cost of coal: Coal mining industry and its associated environmental impacts on water resource development. *Journal of Sustainable Mining*, *19*, 135–149.

Mittal, V., & Lim, E. (2024). Aligning advances in biodiesel technology with the needs of the defense community. *Engineering*, *5*, 2709–2727.

Mofijur, M., Siddiki, S. Y. A., Shuvho, M. B. A., et al. (2021). Effect of nanocatalysts on the transesterification reaction of first, second and third generation biodiesel sources - A mini-review. *Chemosphere*, *270*. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.128642

Moore, C. W., Zielinska, B., Pétron, G., et al. (2014). Air impacts of increased natural gas acquisition, processing, and use: A critical review. *Environmental Science and Technology*, *48*, 8349–8359.

Muliadi, M., Sara, I. D., & Suriadi, S. (2021). The effect of bypass diode installation on partially covered solar panel output power. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, *1087*, 012077.

Mylonas, G., Paganelli, F., Cuffaro, G., Nesi, I., & Karantzis, D. (2021). Using gamification and IoT-based educational tools towards energy savings: Some experiences from two schools in Italy and Greece. *Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing*, *12*, 2341–2355. https://doi.org/10.1007/s12652-020-02838-7

National Renewable Energy Laboratory. (2021). *Life cycle greenhouse gas emissions from electricity generation: Update*. https://www.nlr.gov/docs/fy21osti/80580.pdf

Neha, & Rambeer, J. (2021). Renewable energy sources: A review. *Journal of Physics: Conference Series*, *1979*. https://doi.org/10.1088/1742-6596/1979/1/012023

Offshore Energy. (2026). *Innovation archives*. https://www.offshore-energy.biz/markets/marine-energy/page/20/?fwp_topic=infrastructure&topic=innovation

Pacific Northwest National Laboratory. (2023). *Environmental monitoring and wind-wildlife impacts*. https://www.pnnl.gov/projects/wind-wildlife-monitoring

Pacific Northwest National Laboratory. (2026). *Tidal energy*. https://www.pnnl.gov/explainer-articles/tidal-energy

Panagopoulou, F. (2023). *Renewable energy sources in Greece: Potential opportunities and challenges* [Master's thesis, University of Piraeus]. Dione Institutional Repository.

Parvez, I., Shen, J., Hassan, I., et al. (2021). Generation of hydro energy by using data mining algorithm for cascaded hydropower plant. *Energies*, *14*, 1–28.

Rabilloud, X. (2013). Prevented mortality and greenhouse gas emissions from historical and projected nuclear power. *Environmental Science and Technology*, *47*, 13896–13899.

Ramachandran, A., Ellis, N., & Gladwin, D. (2024). Energy literacy: A review in education. *The Journal of Environmental Education*, *55*(3), 191–202. https://doi.org/10.1080/00958964.2023.2283694

REN21. (2025). *Renewables 2025 global status report: Ocean power*. https://www.ren21.net/gsr-2025/technologies/ocean-power/

Reuters. (2023). *Fossil fuels still dominate global power systems*. https://www.reuters.com/markets/commodities/fossil-fuels-still-dominate-global-power-systems-2023-11-30/

Sadler, T. D. (2004). Informal reasoning regarding socioscientific issues: A critical review of research. *Journal of Research in Science Teaching*, *41*(5), 513–536. https://doi.org/10.1002/tea.20009

Santillán, O. S., & Cedano, K. G. (2023). Energy literacy: A systematic review of the scientific literature. *Energies*, *16*(21), 7235. https://doi.org/10.3390/en16217235

Schobert, H. H. (2002). *Energy and society: An introduction*. CRC Press.

Seminario-Córdova, R., & Rojas-Ortega, R. (2023). Renewable energy sources and energy production: A bibliometric analysis of the last five years. *Sustainability*, *15*. https://doi.org/10.3390/su151310499

Sharma, S. B., Jain, S., Khirwadkar, P., et al. (2013). The effects of air pollution on the environment and human health. *Indian Journal of Research in Pharmacy and Biotechnology*, *1*, 391–396.

Sharmin, T., Khan, N. R., Akram, M. S., et al. (2023). A state-of-the-art review on geothermal energy extraction, utilization, and improvement strategies: Conventional, hybridized, and enhanced geothermal systems. *International Journal of Thermofluids*, *18*, 100323.

Singh, H., Bhardwaj, N., Arya, S. K., et al. (2020). Environmental impacts of oil spills and their remediation by magnetic nanomaterials. *Environmental Nanotechnology, Monitoring and Management*, *14*, 100305.

Smith, P., Adams, J., Beerling, D. J., et al. (2019). Land-management options for greenhouse gas removal and their impacts on ecosystem services and the

sustainable development goals. *Annual Review of Environment and Resources*, *44*, 255–286.
Sovacool, B. K., & Dworkin, M. H. (2015). Energy justice: Conceptual insights and practical applications. *Applied Energy*, *142*, 435–444. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.01.002
Stocks, M., Stocks, R., Lu, B., et al. (2021). Global atlas of closed-loop pumped hydro energy storage. *Joule*, *5*, 270–284.
Tatar, E., & Oktay, M. (2007). Students' misunderstandings about the energy conservation principle: A general view to studies in literature. *International Journal of Environmental and Science Education*, *2*(3), 79–81.
Tsamenyi, M., & Herriman, M. (1998). Ocean energy and the law of the sea: The need for a protocol. *Ocean Development and International Law*, *29*, 3–19.
Tsegaw, G. T. (2018). Energy, entropy and exergy concepts: Thermodynamic approach, a critical review. *Abhinav National Monthly Refereed Journal of Research in Science and Technology*, *3*, 3–17.
U.S. Department of Energy, & American Association for the Advancement of Science. (2017). *Energy literacy: Essential principles and fundamental concepts for energy education*. https://www.energy.gov/cmei/education/articles/energy-literacy-framework-50-march-2017-english
U.S. Department of Energy. (2026). *Solar photovoltaic technology basics*. https://www.energy.gov/eere/solar/solar-photovoltaic-technology-basics
U.S. Department of Energy. (2026a). *Concentrating solar-thermal power basics*. https://www.energy.gov/eere/solar/concentrating-solar-thermal-power-basics
U.S. Department of Energy. (2026b). *Fuel cell basics*. https://www.energy.gov/eere/fuelcells/fuel-cell-basics
U.S. Department of Energy. (2026c). *Wind energy basics*. https://www.energy.gov/eere/wind/wind-energy-basics
U.S. Department of Energy. (2026d). *Hydropower basics*. https://www.energy.gov/eere/water/hydropower-basics
U.S. Department of Energy. (2026e). *Geothermal basics*. https://www.energy.gov/eere/geothermal/geothermal-basics
U.S. Department of Energy. (2026f). *Marine energy basics*. https://www.energy.gov/eere/water/marine-energy-basics
U.S. Department of Energy. (2026g). *Hydrogen storage*. https://www.energy.gov/eere/fuelcells/hydrogen-storage
U.S. Energy Information Administration. (2022). *Hydropower and the environment*. https://www.eia.gov/energyexplained/hydropower/hydropower-and-the-environment.php
U.S. Energy Information Administration. (2022a). *Geothermal power plants*. https://www.eia.gov/energyexplained/geothermal/geothermal-power-plants.php
U.S. Energy Information Administration. (2024). *Biofuels explained*. https://www.eia.gov/energyexplained/biofuels/
UNESCO. (2020). *Global education monitoring report 2020: Inclusion and education: All means all*. UNESCO Publishing.
United States Environmental Protection Agency. (2025). *Overview of greenhouse gases*. https://www.epa.gov/ghgemissions/overview-greenhouse-gases

Ural, T., & Karaca, G. (2016). Hydrogen economy. *Journal of Global Engineering Studies*, *3*, 145–154.

Uydur, C. C. (2024). *Impact of indoor lighting installations on carbon footprint: Textile factory case study*. https://doi.org/10.5281/zenodo.14011080

Varsha, M. V., & Nageswaran, G. (2020). Operando x-ray spectroscopic techniques: A focus on hydrogen and oxygen evolution reactions. *Frontiers in Chemistry*, *8*. https://doi.org/10.3389/fchem.2020.00023

Vasconcelos, V., Bigotte, E., Almeida, R., Amaro, J. P., & Marques, L. (2023). An integrated framework for STEM education experiments with focus on sustainability and renewable energies. *2023 32nd Annual Conference of the European Association for Education in Electrical and Information Engineering (EAEEIE)*. IEEE. https://doi.org/10.23919/EAEEIE55804.2023.10182178

Wahlund, M., & Palm, J. (2022). The role of energy democracy and energy citizenship for participatory energy transitions: A comprehensive review. *Energy Research and Social Science*, *87*, 102482.

World Commission on Environment and Development. (1987). *Our common future*. Oxford University Press.

Wüstenhagen, R., Wolsink, M., & Bürer, M. J. (2007). Social acceptance of renewable energy innovation: An introduction to the concept. *Energy Policy*, *35*(5), 2683–2691. https://doi.org/10.1016/j.enpol.2006.12.001

Xu, X., Zhou, Q., & Yu, D. (2022). The future of hydrogen energy: Bio-hydrogen production technology. *International Journal of Hydrogen Energy*, *47*, 33677–33698.

Yıldırım, B., & Selvi, M. (2016). Examination of the effects of STEM education integrated as a part of science, technology, society and environment courses. *Journal of Human Sciences*, *13*(3), 3684–3695. https://doi.org/10.14687/jhs.v13i3.3876

Zecca, A., & Chiari, L. (2010). Fossil-fuel constraints on global warming. *Energy Policy*, *38*, 1–3.

Zeidler, D. L. (2014). Socioscientific issues as a curriculum emphasis: Theory, research, and practice. In N. G. Lederman & S. K. Abell (Eds.), *Handbook of research on science education* (Vol. 2, pp. 697–726). Routledge.

Zeidler, D. L., Sadler, T. D., Simmons, M. L., & Howes, E. V. (2005). Beyond STS: A research-based framework for socioscientific issues education. *Science Education*, *89*(3), 357–377. https://doi.org/10.1002/sce.20048