

TÜRKİYE CUMHURİYETİ
ANKARA ÜNİVERSİTESİ
SOSYAL BİLİMLER ENSTİTÜSÜ
İŞLETME ANABİLİM DALI

**ENERJİ ETKİNLİĞİNİN VE SÜRDÜRÜLEBİLİRLİĞİNİN KARAR
YÖNTEMLERİ İLE KARŞILAŞTIRMALI ANALİZİ**

Doktora Tezi

Engin YALÇIN

Ankara, 2024

TÜRKİYE CUMHURİYETİ
ANKARA ÜNİVERSİTESİ
SOSYAL BİLİMLER ENSTİTÜSÜ
İŞLETME ANABİLİM DALI

**ENERJİ ETKİNLİĞİNİN VE SÜRDÜRÜLEBİLİRLİĞİNİN KARAR
VERME YÖNTEMLERİ İLE KARŞILAŞTIRMALI ANALİZİ**

Doktora Tezi

Engin YALÇIN

Prof. Dr. Fazıl GÖKGÖZ

Ankara, 2024

**TÜRKİYE CUMHURİYETİ
ANKARA ÜNİVERSİTESİ
SOSYAL BİLİMLER ENSTİTÜSÜ
İŞLETME ANABİLİM DALI**

**ENERJİ ETKİNLİĞİNİN VE SÜRDÜRÜLEBİLİRLİĞİNİN KARAR VERME
YÖNTEMLERİ İLE KARŞILAŞTIRMALI ANALİZİ**

DOKTORA TEZİ

**Tez Danışmanı
Prof. Dr. Fazıl GÖKGÖZ**

TEZ JÜRİSİ ÜYELERİ

Adı ve Soyadı

- 1- Prof. Dr. Fazıl GÖKGÖZ
- 2- Prof. Dr. Güven SAYILGAN
- 3- Prof. Dr. Kadir GÜRDAL
- 4- Prof. Dr. Güray KÜÇÜKKOCAOĞLU
- 5- Doç. Dr. Ayşe YILDIZ

Tez Savunması Tarihi: 09.01.2024

Ankara, 2024

T.C.
ANKARA ÜNİVERSİTESİ
Sosyal Bilimler Enstitüsü Müdürlüğü'ne,

Prof. Dr. Fazıl GÖKGÖZ danışmanlığında hazırladığım “Enerji Etkinliğinin ve Sürdürülebilirliğinin Karar Verme Yöntemleri ile Karşılaştırmalı Analizi” (Ankara.2024) adlı doktora tezindeki bütün bilgilerin akademik kurallara ve etik davranış ilkelerine uygun olarak toplanıp sunulduğunu, başka kaynaklardan aldığım bilgileri metinde ve kaynakçada eksiksiz olarak gösterdiğimi, çalışma sürecinde bilimsel araştırma ve etik kurallarına uygun olarak davrandığımı ve aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul edeceğimi beyan ederim.

Tarih: 12.01.2024

Engin YALÇIN

TEŞEKKÜR

Doktora eğitimime başladığım ilk günden bugüne kadar geçen süreçte hiçbir zaman desteğini esirgemeyen bu uzun süreçte daima beni olumlu yönde destekleyen motive eden ve geldiğim noktaya ulaşmamda en büyük destekçim olan kıymetli hocam Prof. Dr. Fazıl GÖKGÖZ'e ne kadar teşekkür etsem azdır. Bilgisi, deneyimi ve tecrübesiyle benim için daima çok kıymetli bir rehber olmuştur. Umutsuzluğa düştüğüm en zor anlarda bile bana inancını sürdürüp her zaman arkamda durdu. Kendisine minnettarım. Emeği üzerimde çok büyüktür.

Aynı zamanda bugünlere gelmemde emeği çok büyük olan anneme ve babama sonsuz teşekkürler.

İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR.....	i
İÇİNDEKİLER	ii
TABLolar LİSTESİ	iii
ŞEKİLLER LİSTESİ	iv
BİRİNCİ BÖLÜM.....	11
AB’NİN ÇEVRE VE ENERJİ ETKİNLİĞİNİ ARTIRMAYA YÖNELİK AMAÇLARI VE SEKTÖRE AİT BİLGİLER.....	11
1.1 AB’nin Çevre Ve Enerji Etkinliğini Artırmaya Yönelik Amaçları	11
1.2 AB’de Ulaştırma Sektörü İstihdam Dağılımı	12
1.3. AB’nin Ulaştırma Sektöründeki Enerji Tüketim Yapısı.....	14
1.4. AB’de Yenilebilir Enerji Yapısı ve Hedefleri	15
1.5 AB’de Gerçekleşen Sera Gazı Salınımının Yapısı ve Hedefleri	16
1.6. AB’de Ulaştırma Sektöründe Ciro ve Sermaye Oluşumunun Genel Yapısı.....	17
İKİNCİ BÖLÜM	21
KARAR VERME TEKNİKLERİYLE İLGİLİ GENEL KAVRAMLAR VE YAKLAŞIMLAR	21
2.1 Etkinlik Kavramı	21
2.2 Verimlilik Kavramı	23
2.3 Etkinlik Ölçme Yöntemleri	26
2.3.1 Veri Zarflama Analizi.....	27
2.3.1.1 CCR Modeli	32
2.3.1.2 BCC Modeli.....	34
2.3.1.3 Ölçek Etkinliği	37
2.4 Diğer VZA Modelleri	38
2.4.1 Aylak Tabanlı VZA Modeli.....	38
2.5. VZA’nın Temel Varsayımları	42
2.6 Çok Kriterli Karar Verme Yöntemleri	42
2.6.1 Çok Kriterli Karar Vermede Ağırlıklandırma Yöntemleri	50
2.6.1.1 AHP Ağırlıklandırma Yöntemi	51
2.6.1.2 Entropi Kriter Ağırlıklandırma Yöntemi	51
2.6.2 Analiz Kapsamındaki Kullanılan ÇKKV Yöntemleri	54
2.6.2.1 TOPSIS Yöntemi	54

2.6.2.2 MAUT Yöntemi	56
2.6.2.3 VIKOR Yöntemi	58
2.7 Etkinlik ve Performans Teknikleriyle Sektörde Gerçekleştirilen Çalışmalar	60
ÜÇÜNCÜ BÖLÜM	67
AMPİRİK ANALİZ	67
3.1 Değişkenler ve Tanımlayıcı İstatistikler	67
3.2 Analiz Sonuçları	68
DÖRDÜNCÜ BÖLÜM	85
SONUÇ VE DEĞERLENDİRME	85
KAYNAKÇA	91
ÖZET	108
ABSTRACT	109

TABLÖLAR LİSTESİ

Tablo 1. Sınır Yaklaşımlarının Sınıflandırılması.....	26
Tablo 2. ÇKKV Problemleri ve Yöntemler	46
Tablo 3. ÇKKV Yönteminin Uygunluğunu Belirleyen Değişkenler.....	47
Tablo 4. Aylak Temelli VZA Yönteminde Kullanılan Değişkenler.....	67
Tablo 5. Etkinlik ve Performans Ölçümünde Kullanılan Değişkenlerin Ortalama Tanımlayıcı İstatistikleri.....	68
Tablo 6. Gelişmiş AB Ülkelerinin Enerji Etkinliğinin Aylak Temelli VZA Yöntemiyle Elde Edilen Analiz Sonuçları	68
Tablo 7. Gelişmekte Olan AB Ülkelerinin Enerji Etkinliğinin Aylak Temelli VZA Yöntemiyle Elde Edilen Analiz Sonuçları.....	70
Tablo 8. AB Ülkelerinin Ulaştırma Sektöründeki Enerji Sürdürülebilirliği İçin Shannon Entropi Tekniği ile Elde Edilen Kriter Ağırlıkları.....	75
Tablo 9. Gelişmiş AB Ülkelerinin Ulaştırma Sektöründeki Enerji Sürdürülebilirliğinin TOPSIS Yöntemiyle Gerçekleştirilen Analiz Sonuçları	75
Tablo 10. Gelişmekte Olan AB Ülkelerinin Ulaştırma Sektöründeki Enerji Sürdürülebilirliğinin TOPSIS Yöntemiyle Gerçekleştirilen Analiz Sonuçları	77
Tablo 11. Gelişmiş AB Ülkelerinin Ulaştırma Sektöründeki Enerji Sürdürülebilirliğinin MAUT Yöntemiyle Gerçekleştirilen Analiz Sonuçları	78
Tablo 12. Gelişmekte Olan AB Ülkelerinin Ulaştırma Sektöründeki Enerji Sürdürülebilirliğinin MAUT Yöntemiyle Gerçekleştirilen Analiz Sonuçları	80
Tablo 13. Gelişmiş AB Ülkelerinin Sürdürülebilirlik Performansının VIKOR Yöntemiyle Gerçekleştirilen Analiz Sonuçları.....	81
Tablo 14. Gelişmekte Olan AB Ülkelerinin Sürdürülebilirlik Performansının VIKOR Yöntemiyle Gerçekleştirilen Analiz Sonuçları.....	83

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 1. 2017-2019 Yılları Arasında AB Ülkelerinde Ulaştırma Sektöründe Çalışan Kişi Sayısı	13
Şekil 2. 2017-2019 Yılları Arasında AB Ülkelerinde Ulaştırma Sektöründe Gerçekleşen Enerji Tüketim Miktarları.....	14
Şekil 3. 2017-2019 Yılları Arasında AB Ülkeleri Ulaştırma Sektöründe Gerçekleşen Yenilebilir Enerji Üretim Miktarı.....	15
Şekil 4. 2017-2019 Yılları Arasında AB Ülkelerinde Ulaştırma Sektöründe Sera Gazı Salınımı.....	17
Şekil 5. 2017-2019 Döneminde AB Ülkelerinde Ulaştırma Sektöründe Elde Edilen Ortalama Ciro Miktarları	19
Şekil 6. 2017-2019 Döneminde AB Ülkelerinde Ulaştırma Sektöründe Ortalama Brüt Sermaye Oluşum Seviyesi	20
Şekil 7. Teknik Etkinlik ve Tahsis Etkinliği	22
Şekil 8. Üretim Sınırı ve Teknik Etkinlik	24
Şekil 9. Verimlilik, Teknik Etkinlik ve Ölçek Ekonomisi	26
Şekil 10. Etkin Sınır ve Regresyon Doğrusu.....	29
Şekil 11. Ölçeğe göre Sabit ve Değişken Getiri Varsayımında Etkin Sınır	37
Şekil 12. 2017-2019 Yıllarında Gelişmiş AB Ülkeleri için Enerji Etkinliği Dağılım Grafiği	70
Şekil 13. 2017 yılı Gelişmekte Olan AB Ülkeleri için Enerji Etkinliği Dağılım Grafiği	72
Şekil 14. 2018 Yılı Gelişmekte Olan AB Ülkeleri için Enerji Etkinliği Dağılım Grafiği ...	72
Şekil 15. 2019 Yılı Gelişmekte Olan AB Ülkeleri için Enerji Etkinliği Dağılım Grafiği ...	73
Şekil 16. Gelişmiş AB Ülkeleri İçin Analiz Dönemi Boyunca Elde Edilen TOPSIS Performans Sonuçlarının Sıralaması	77
Şekil 17. Gelişmekte Olan AB Ülkeleri İçin Analiz Dönemi Boyunca Elde Edilen TOPSIS Performans Sonuçlarının Sıralanması	78
Şekil 18. Gelişmiş AB Ülkeleri İçin Analiz Dönemi Boyunca Elde Edilen MAUT Performans Sonuçlarının Sıralanması	80
Şekil 19. Gelişmekte Olan AB Ülkeleri İçin Analiz Dönemi Boyunca Elde Edilen MAUT Performans Sonuçlarının Sıralaması	81
Şekil 20. Gelişmiş AB Ülkeleri İçin Analiz Dönemi Boyunca Elde Edilen VIKOR Performans Sonuçlarının Sıralanması	82
Şekil 21. Gelişmekte Olan AB Ülkeleri İçin Analiz Dönemi Boyunca Elde Edilen VIKOR Performans Sonuçlarının Sıralanması	84

KISALTMALAR LİSTESİ

Analytic Hierarch Process	AHP
Avrupa Birliği	AB
Banker Charnes Cooper	BCC
Birleşmiş Milletler	BM
Combined Compromise Solution	CoCoSo
Charnes Cooper Rhodes	CCR
Çok Kriterli Karar Verme	ÇKKV
Doğrusal Programlama	DP
ELimination and Choice Expressing REality	ELECTRE
Gayri Safi Yurtiçi Hasıla	GSYH
Karar Verme Birimi	KVB
Karbondiyoksit	CO ₂
Multi-Attribute Utility Theory	MAUT
Organisation for Economic Co-operation and Development	OECD
Sera Gazları	SG
Stokastik Sınır Analizi	SSA
Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution	TOPSIS
Veri Zarflama Analizi	VZA
VIekriterijumsko KOmpromisno Rangiranje	VIKOR

GİRİŞ

Avrupa Birliği'nin tamamındaki ulaşım altyapısı, son yıllarda en hızlı gelişmeyi yaşamaktadır ve taşımacılığın sürdürülebilir kalkınma ve ekonomik büyüme üzerindeki etkisi, ekonomistler için olduğu kadar politika yapıcılar veya girişimciler için de bir merak konusu haline gelmektedir (Cigu vd. 2018). Ulaşım, AB'nin temel omurgalarından birisidir ve insanların, malların ve hizmetlerin kıta boyunca serbest dolaşımını sağlamak için gereklidir.

Sürdürülebilir ve enerji açısından verimli yolcu ve yük taşımacılığı, dünya çapında politika yapıcıların önemli bir endişesi haline gelmiştir (Letnik vd. 2018). Bu arada kentleşme ve sanayileşme düzenli bir şekilde adım adım ilerlemektedir. Gerekli hizmetleri sağlayan ulaştırma sektörü, enerji tüketimini hızlı bir şekilde artırma eğilimindedir. AB üye ülkeleri için emisyonların azaltılması ve özellikle enerji tasarrufu şu anda zorlu ve zaman alıcı faaliyetlerdir. Çevreyi korumak için enerji tüketimini ve karbondioksit (CO₂) salınımını azaltmak en önde gelen amaçlar olarak ortaya çıkmaktadır. (Liu ve Lin, 2018). İklim sorununu ele almak ve Avrupa Yeşil Anlaşması'nın hedeflerini gerçekleştirmek için sürdürülebilir ulaşım şarttır. Ulaştırma sektörü ise AB'deki CO₂ emisyonlarının yaklaşık %30'una sebep olmaktadır. Bu sebeplerden ötürü, enerji tasarrufu ve CO₂ salınımının azaltılması, enerji etkinliği ve sürdürülebilirlik enerji etkinliği ve performansı ile ilgili gerçekleştirilen çalışmaların önemli bir kısmını oluşturmaktadır. Ülkesel anlamda enerji etkinliğini araştırmak etkin olan ve olmayan ülkelerin ortaya konmasını sağlarken etkin olmayan ülkeler için politika geliştirilmesine imkân tanımaktadır.

Mobil olmak insanın hayatta kalması, ekonomik kalkınması ve sosyal etkileşimi için hayati önem taşımaktadır. Ayrıca insan ve yüklerin en ekonomik, hızlı ve etkin şekilde taşınmasını mümkün kılmaktadır. Ancak ulaşımın çevreye ve insan sağlığına yansıyan

olumsuz etkileri de göz ardı edilemez. Sürdürülebilir ulaşım sistemlerinin geliştirilmesi çok önemlidir ve 2030 Sürdürülebilir Kalkınma Gündemi tarafından belirlenen Sürdürülebilir Kalkınma Hedeflerinin çoğuna ulaşılmasına ilgili bir katkı sağlayabilir. Sanayileşme ve küreselleşme nedeniyle artık kaynakların ve malların büyük ölçekli, uzun mesafeli taşınması gerekmektedir. Özellikle gelişmiş dünyada binek otomobillerin boyutu, ağırlığı ve gücü aynı anda giderek artmıştır. Sonuç olarak ulaştırma sektörü hem sera gazı emisyonlarını hem de dünyanın enerji tüketimini önemli ölçüde etkilemektedir (Epicoco ve Falagario, 2022). Ekonomik faaliyetlerde temel bir girdi unsuru olan enerji, uluslararası ekonominin gelişimi için kritik öneme sahiptir. Enerji tüketimi son dönemde birçok ülkede küreselleşme ilerledikçe istikrarlı bir şekilde arttı. Fosil yakıtların, küresel olarak enerji tüketim payında hakim olmaya devam etmektedir. Fosil enerji kullanımı ve zararlı gazların salınımı, çevreye ciddi zararlar vererek sürdürülebilir kalkınmanın önündeki temel engeller yer almaktadır. Özellikle enerji etkinliği ve sürdürülebilirlik, yetkililerin temel odak noktası haline gelmektedir. Bu noktada, kaynakların etkin kullanımı ve etkinliği artırıcı politikalar geliştirilmesi ülkeler için olmazsa olmaz bir hal almıştır. Enerji etkinliği, en genel tanımıyla aynı işi yapmak için enerji israfının giderilip daha az enerji kullanılması anlamındadır. Enerji etkinliği, aynı zamanda enerji sayesinde elde edilen gelirin etkili kullanmamanın en temel yollarından biri olarak gösterilmektedir. Enerji etkinliğinin, SG salınımının azaltılması, enerji bağımlılığından kurtulma ve ekonomide enerjiyle ilgili maliyetleri azaltma gibi çok fazla avantajı bulunmaktadır. Yenilebilir enerji kaynakları da bu amaçlara katkı sunan etkin araçlar olmakla birlikte fosil yakıtlarının kullanımını en hızlı ve ucuz şekilde azaltacak temel yol enerji etkinliğinin artırılmasıdır (Keskin, 2021). Ayrıca, enerji etkinliği çabaları sürdürülebilir kalkınma çabalarında önemli rol oynamaktadır. Ucuz, temiz enerjiye erişim, BM tarafından belirlenen Sürdürülebilir Kalkınma Hedeflerinden biridir. Enerji etkinliği, iklim

değişikliğinin negatif etkilerinden kurtulmak tüm dünyanın uygulayabileceği politika yollarındandır. Bu sebeplerden ötürü, enerji ve çevre konuları toplumların bugün en önem verdiği konular haline gelmiştir. Ulaştırma sektörü de tüm dünyada en çok enerji tüketen ve çevreye SG salınımlarıyla zarar veren sektörlerden birisidir (Liu ve Wu, 2017). Ulaşım ve ekonomik büyümeden kaynaklanan en ciddi sorunlardan biri de ülke genelinde çevresel bozulma, özellikle karbon emisyon stoğunun artışıdır (Park vd. 2018). Bu sebeple, ekonominin temel taşlarından biri olan ulaştırma sektöründen enerji etkinliğinin ve sürdürülebilirliğin araştırılması büyük önem arz etmektedir.

Ulaşım, Avrupa Birliği'nde (AB) en yüksek ikinci SG emisyonu üreten sektördür (Bask ve Rajahonka, 2017). Ancak şu anda ulaşım araçları ve altyapı genellikle sürdürülebilirlik için önemli tehditler oluşturacak şekilde gelişmektedir. Bu nedenle, artan mobilitenin faydaları ile sosyal, çevresel ve ekonomik boyutlardaki maliyetler karşılıklı tartılmalıdır (Stefaniec vd. 2021). Mevcut çabalara rağmen yakın gelecekte enerji tüketimi ve sera gazı emisyonları artacaktır. Taşımacılıkla ilişkili sera gazı emisyonlarının azaltılmasının, doğru ve iyi koordine edilmiş eylemlerle mümkün olduğu görülmektedir (Hájek vd. 2021). Taşımacılık sektörü, fosil yakıtlara bağımlılığı nedeniyle CO₂ emisyonlarına önemli bir etkide bulunuyor. İstatistikler, AB üye ülkelerde ulaşım sektörünün şu anda tüm CO₂ emisyonlarının %23'üne sebep olduğunu gösteriyor. Mevcut eğilim devam ederse, ulaşımın AB'de emisyonun 2050 yılına kadar tüm CO₂'nin %50'sine sebep olması beklenmektedir. ulaşım sektöründeki talebin 40 yıllık süre (1990-2030) içinde yolcu taşımacılığında %80, yük taşımacılığında %100 artması beklenmektedir (Emberger, 2017). Günümüzde ulaşım sistemleri, yenilenemeyen fosil yakıtlara büyük ölçüde bağımlılık göstermektedir. Belirleyici politika eylemi gerçekleştirmenin büyük bir getirisi vardır. İnsanlığın sürdürülebilir bir şekilde genişleme durumu, dünya çapındaki aşırı CO₂

emisyonlarının çevre üzerindeki sonuçları sorunu nedeniyle ciddi şekilde tehdit altındadır. Sürdürülebilir kalkınmayı desteklemek amacıyla, birçok ülke CO₂ emisyonlarını sınırlandıran yasalar çıkarmış ve emisyonları azaltmak için önemli önlemler almıştır. Küresel ekonomik entegrasyon, küresel bir ekonomik birlik içinde paranın, ürünlerin ve hizmetlerin serbest dolaşımının yanı sıra ekonomik büyümeyi ve yeni bir artan karbon emisyonu döngüsünü zorunlu kılar. Gelişmekte olan ülkeler daha geniş çeşitlilikte birbiriyle bağlantılı, daha karmaşık sorunlarla ilgilenmektedir (Du et al. 2021).

Ulaştırma sektörü, diğer tüm ekonomik faaliyetlerle ilgili olup, üretim ve tüketim merkezleri arasındaki mesafeleri kısaltmayı hedefleyen ve vatandaşların hareketlilik taleplerine cevap veren ve bölge içinde iyi erişilebilirlik sağlayan bir sektördür (Usón vd. 2011). Özellikle, AB'nin artan enerji kullanımı, çevrenin korunması ve enerji verimliliğine ilişkin daha büyük resme ilişkin bir dizi önemli konuyu ve şüpheyi gündeme getirmiştir. Bunlardan biri ulaştırma sektörünün enerji tüketimi verimliliğinde zaman içindeki mutlak değişimin takip edilmesi ve verimliliğin hesaplanmasıdır.

Hızlı büyümesine ve en yüksek enerji tüketimi oranlarına rağmen, AB'nin ulaştırma sektörü hala çoğunlukla fosil yakıtlara bağımlıdır. Ayrıca sektör, diğer tüm sektörlerle (enerji, tarımsal işleme, atık ve diğer ürün endüstrileri) karşılaştırıldığında toplam sera gazı emisyonu üretimi açısından %20'lik bir farkla ikinci sırada yer almaktadır. Yüzde 60'ın üzerinde emisyon salımı yapan tek sektör enerji sektörüdür (Ziolkowska ve Ziolkowski, 2015). Ulaştırma sektörünün Sera gazını sınırlamaya yönelik çabalarda ve geri dönüşü olmayan iklim değişikliğinin hafifletilmesi küresel olarak şu anda yapılması gerekenlerden biridir. AB'de enerji sektörünün çoğunda SG tüketimi azaldığı gözlemlenirken ulaştırma sektöründe bu alanda artışın yaşandığı görülmektedir. Bu sebeple, enerjiye en çok ihtiyaç duyulan sektörlerden biri olan ulaştırma alanında enerjinin etkin kullanılması, çevrenin

korunması ve sürdürülebilirlik hedeflerine katkı yapılması büyük önem arz etmektedir (Kany vd. 2022).

Ulaşımı, Avrupa AB politikasının bir parçası haline getirmek 1980'lerin sonuna dayanmaktadır. Bu tarihten itibaren, daha hırslı ulaştırma politikaları için adımlar atılmaya başlanmıştır. Bu yolda en büyük engel, Avrupa devletlerinin koyulan hedeflere uyma yönünde gösterdiği isteksizlik olmuştur. 1983 yılında Avrupa Parlamentosu, Avrupa konseyine ulaştırma politikası konusundaki hareketsizliği dolayısıyla şikâyetinde bulunmuştur. Sonrasında, Avrupa mahkemesi, konseyin ortak bir politika yönetmesine karar vermiştir. 1985 Milan zirvesinde, ise Avrupa devletlerinin başındaki görevliler, bu politikaların AB'nin rekabet etmesi için temel politikalar haline gelmesini kabul etmişlerdir (Avrupa Mobilité Atlası, 2021).

Günümüzde ulaşım, dünyadaki CO₂ emisyonlarının yaklaşık %30'unu oluşturmaktadır. İklim değişikliği ile mücadele adına bu emisyonların azaltılması gerekirken bu alandaki ortak çabaların alternatif yakıtlar, dijitalleşme, elektrifikasyon ve istihdam dönüşümü gibi alanlara yoğunlaşması gerekmektedir. Bu dönüşüm, bütün AB ülkelerinde sürdürülebilir çabaların ortaya konmasına bağlıdır. Avrupa Yeşil Anlaşması, bu çabaların ve mücadelenin en ön planında yer almalıdır. 2020'de onaylanan Avrupa Yeşil Anlaşması, Avrupa Komisyonu'nun 2050'de AB'de sıfır salınımı olan bir iklim yapısı ve enerjiyi etkin bir şekilde kullanmayı amaçlayan bir dizi politika girişimidir. Avrupa Yeşil Anlaşması, şu konularda iyileştirme getirerek halkın ve gelecek nesillerin refahını ve sağlığını daha ileri bir seviyeye getirmeyi amaçlamaktadır: Temiz hava ve su, sağlıklı toprak ve biyolojik çeşitlilik, yenilenebilir enerji, enerji tasarruflu binalar, uygun fiyatlı ve sağlıklı gıda, öncelikli olarak toplu taşıma, onarılabilen, geri dönüştürülebilen ve yeniden kullanılabilen dayanıklı ürünler,

geleceğe yönelik işler olarak tanımlanabilir. Geçiş süreçlerinin tümü dayanıklı ve rekabetçi bir endüstrinin özellikleridir (Avrupa Komisyonu, 2023a; Avrupa Mobilite Atlası, 2021).

İnsanların, ürünlerin ve hizmetlerin kıta çapında serbest akışını sağlamak için ulaşım şarttır ve Avrupa entegrasyonunun temelini oluşturur. AB'nin ulaştırma sektörü, brüt katma değerinin yaklaşık %9'unu oluşturarak ekonomisine önemli ölçüde katkıda bulunmaktadır. AB'de ulaştırma hizmetleri tek başına 2016'da yaklaşık 664 milyar € brüt katma değere sahipti ve şu anda yaklaşık 11 milyon kişiyi istihdam etmektedir (Avrupa Birliği, 2023). Ekonominin temel yapı taşı sektörlerinden biri olan ulaştırma sektöründe yaşanan temel sıkıntı ise etkinlikten ödün vermeden fosil yakıtlara olan bağımlılığı azaltıp çevreyi korumaktır. AB 2020 Stratejisi ve yeni enerji planı dahilinde, AB ulaştırma sektörünün temel amacı, ekonomik gelişimi sağlamak, yüksek kalitede mobilite hizmetlerini sunarken aynı zamanda mevcut kaynakları da daha etkin kullanılmasıdır. Temelde, ulaştırma sektörünün daha az ve çevreci enerji kaynaklarını kullanması bu sayede çevreye olan negatif etkilerin minimum seviyeye çekilmesini amaçlamaktadır. Çünkü mobilitayı engellemek bir çözüm değildir. Mevcut yolcu ve yük taşımacılığında etkinliği artırıcı yeni yollar ortaya çıkması gerekmektedir. Gelecekteki etkinliği artırıcı bu yeni yolların şu temel ilkelere dayanması gerekmektedir: Enerji verimliliği ve performansının başta olmak üzere ayrıca dağıtma, sürdürülebilir yakıtlar ve tahrik sistemleri gibi konuların ulaşımında kullanılan her tür araçlar için iyileştirilmesi, AB'nin ulaştırma sektörüyle ilgili 2050'ye kadar gerçekleştirmeyi amaçladığı temel hedeflerdir (White Report, 2011). AB'nin ulaştırma politikasının temel amaçları “ Transport White Paper ”da yer almaktadır. Bu temel amaçlar, ekonominin ve toplumun ihtiyaçlarını karşılarken aynı zamanda benzin kıtlığı, artan tıkanıklık ve şehirlerde SG salınımlarında azaltma gibi gelecek kısıtlarını da karşılayan bir yapı öngörmektedir. 2050'ye kadar, AB 1990 seviyesine odakla SG salınımlarında %60 azaltmaya gitme ve enerji

bağımlılığında yaşanan problemlerin önüne geçmeyi amaçlamaktadır. Ayrıca, AB komisyonu, 2050'ye kadar iklime duyarlı bir ekonomi oluşturmak amacıyla Avrupa Yeşil Anlaşması'nı benimsedi. Bu amaçla, ulaşım sektöründeki emisyonlarda 2050'ye kadar %90'luk azalışa gitmeyi amaçlamaktadır. Avrupa Yeşil Anlaşması, sürdürülebilir ve akıllı mobilite çözümleri, ulaştırma maliyetlerinin daha etkin yönetilmesi, alternatif ulaştırma çözümlerinin devreye alınması ve ulaştırma salınımlarının azaltılması bu kasamdaki temel hedeflerdir. AB, yenilenebilir enerjinin payı (sıvı dahil biyoyakıtlar, hidrojen, biyometan, "yeşil" elektrik, vb.) 2020 yılına kadar ulaşımda kullanılacak %10'luk ortak bir hedef belirlemeyi kabul etti (Chiaramonti vd. 2021; Gryparis vd. 2020). Yenilenebilir enerjinin ulaşımdaki ortalama payı 2004'te %1,5'ten 2018'e kadar geçen süreçte %8,3'e arttı. Üye devletlerin ulaşımda kullanılan yenilenebilir enerjinin payı yüksek oranda sapma göstermektedir. Örneğin, İsveç'te kullanılan yenilenebilir enerjinin payı %29 civarındayken onu %15'lik oranla Finlandiya izlemektedir. Diğer taraftan Hırvatistan, Yunanistan ve Estonya'da bu oran %3'ler gibi düşük bir oranda kalmıştır. Lüksemburg, Malta, Hollanda, Finlandiya ve İsveç gibi bazı AB ülkelerinde yenilenebilir enerjinin ulaşım yakıtı kullanımının hızlı şekilde yaygınlaştığı ülkelerdir (Eurostat, 2020).

Yenilikçi ve sürdürülebilir ulaşım araçlarının benimsenmesi, AB'nin enerji ve iklim hedefleri açısından hayati öneme sahiptir. Toplumlar daha hareketli hale geldikçe, AB politikası ulaşım sistemlerinin trafik, sürdürülebilirlik, hava kalitesi, altyapı vb. gibi kritik sorunları çözmesine yardımcı olmaktadır (Avrupa Birliği, 2023). Sürdürülebilirlik söz konusu olduğunda ulaştırma sektörü çok önemlidir. İnsan yerleşimlerinin evrimi ve sosyal gelişmenin çevre üzerindeki kaçınılmaz etkileri ilk önce küresel topluluk tarafından ana boyutlar – ekonomik, sosyal ve çevresel – olmak üzere üçlü olduğu ilke kez Stockholm'deki İnsan Çevresi Konferansı'nda ortaya sürülmüştür. Sürdürülebilirlik kavramının temelleri bu

dönem uzanmaktadır. Sonuçlar ve dünya çapındaki ekonomik çevrelerle birlikte izlenecek bir hedef olarak şimdiki ve gelecek nesiller için insan ortamını ve koruma ihtiyacını iyileştirmek ve sosyal gelişimi sağlayacak bir yapı amaçlamıştır. Bu ilkelerin benimsenmesinden bu yana yönetimdeki paydaşlar ve karar vericiler sürdürülebilirliği birincil öncelik haline getirdi. (Alonso vd. 2015).

Sürdürülebilirliğin, sürdürülebilir kalkınmanın veya sürdürülebilirliğin ulaşımın evrensel olarak kabul edilmiş bir tanımı yoktur. Tanımlar şunları içerir: Sürdürülebilir kalkınma “bugünün gereksinimlerini, gelecek nesillerin ihtiyaçlarını karşılama yeteneğinden feragat etmeden karşılamak” ya da, sürekli olarak ekonomik çevreye ve doğal kaynaklara zarar vermeden kalkınmaktır.” şeklinde tanımlanabilmektedir. Son dönemlere kadar birçok iktisatçı, sosyal ve çevresel durumu ne olursa olsun, maliyetler, artan hareketlilik ekonomide ilerleme sağladığını ifade etmişlerdir (Litman and Burwell, 2006). İlk olarak, ulaşımın sürdürülebilirliğinin hedefleri çevresel, sosyal ve ekonomik kalitenin üç temel “sütununda” özetlenmektedir (Sultana vd. 2019).

Ulaştırmaya İlişkin Avrupa Komisyonu Genel Müdürlüğü tarafından yayımlanan Beyaz Kitap AB için şu vizyonu ortaya koydu. Rekabetçi ve sürdürülebilir ulaşım sistemi gelişen ulaşım ile mücadele edip mobilitiyi desteklerken aynı zamanda 1990’a kıyasla 2050’ye kadar %60 emisyon azalış hedefinin ulaşım ve enerji etkinliğinin artırılması ve alternatif sistemler kullanılması aracılığıyla gerçekleştirilmesi gerekmektedir. Bu bildirinin her biri ciddi şekilde dikkate alınması gereken farklı yönleri ele almaktadır (Emberger, 2017). Avrupa Komisyonu, politikaları ve eğilimleri izlemek ve geleceğe yönelik eylem planları geliştirmek için çeşitli ulaştırma istatistiklerini incelemektedir. Ulaşımın en önemli yönleri, yıllık olarak taşınan mal ve insan hacmi, kullanılan araba ve diğer altyapı sayısı ve ulaşım hizmetlerinin ekonomide bir araç olarak oynadığı rol dahil olmak üzere Eurostat’ın bu

alandaki verileriyle açıklanmaktadır. Veri toplama, ekstra veri sağlamaya yönelik gönüllü anlaşmaların yanı sıra, AB Üye Devletlerinden istatistiksel veri gerektiren birçok resmi çabanın bir sonucu olarak artmıştır. Eurostat'ın ulaştırma istatistikleri model araştırması, politika oluşturma ve mevzuat önerileri için faydalıdır (Eurostat, 2023a). Düzenleyici önlemler olmasa, taşımacılık sektörü kaynaklı enerji kullanımı ve SG emisyonlarının artacağı tahmin edilmektedir. Paris Anlaşması'nın bu yüzyıldaki dünya çapında sıcaklıkta yaşanan artışları sanayi gelişimi öncesindeki seviyelere kıyasla 2°C'nin oldukça altında tutmayı amaçlayan hedefine ulaşmasında da ulaşım en önemli faktörlerden biri olarak görülmektedir (Letnik vd. 2018). Ulaştırma sektörü ülkelerin ekonomisini destekleyen temel sektörlerden biridir. Sektör, ekonomiye katkı verirken enerji tüketimiyle birlikte çevreye de CO₂ salınımlarıyla ciddi bir zarara sebep olmaktadır. Bu sebeple, sektörün enerji etkinliği ve sürdürülebilirliğinin araştırılması AB gibi ulaştırmanın en önemli alanlardan biri olduğu grupta önem arz etmektedir. Bu sebeplerden ötürü, ulaştırma sektörünün enerji etkinliğini ve sürdürülebildiği performans ve etkinlik perspektifinden araştırıldığında AB ülkelerinde yüksek performans gösteren ülkeler ortaya konularak düşük performans gösteren ülkeler için yüksek performanslı ülkeler bir referans noktası oluşturmaktadır.

Bu çalışmada Eurostat veri tabanı üzerinden elde edilen veriler üzerinden Avrupa Birliği ülkelerinin ulaştırma sektörünün sürdürülebilirliği ve sektörün etkinliğinin Veri Zarflama Analizi (VZA) ve Çok Kriterli Karar Verme (ÇKKV) teknikleriyle araştırılması amaçlanmıştır. VZA, parametrik olmayan bir etkinlik ölçme tekniği iken ÇKKV teknikleri, maliyet ve fayda kriterlerine dayanan performans teknikleridir. Ulaştırma sektöründe etkinlik ve performans değerlendirme çalışmaları son dönemde popüler olmaya başlayan bir alandır. Bu bağlamda Avrupa Birliği'nde enerji sektöründen sonra en fazla SG salınımı ortaya çıkaran ikinci sektör olan ulaşım sektöründe etkinlik ve performans kıyaslaması çalışmanın

literatüre temel katkısıdır. Literatürde çoğu etkinlik ve performans analiz çalışması enerji sektörüne odaklanmışken ulaştırma sektöründe bu analizlerin son dönemde incelenmeye başlandığı görülmektedir. Bu kapsamda AB ülkelerinin ulaştırma sektörü performansın ÇKKV yöntemleriyle karşılaştırılmalı şekilde analiz edilmesi ve ayrıca ulaştırma sektörünün enerji etkinlik seviyelerinin istenmeyen çıktıyı da modele dahil eden aylak temelli VZA ile analizi de çalışmanın ulaştırma sektörüne diğer bir katkısı olarak ele alınabilir.

Çalışma kapsamında öncelikle ulaştırma alanında enerji etkinliği ve performansı ile gerçekleştirilmiş çalışmalarla ilgili kapsamlı bir literatür taramasına yer verilirken sonrasında çalışma kapsamında kullanılan analiz teknikleri detaylıca açıklanmaktadır. 3. Bölümde ise karar analiz teknikleri AB ülkelerinde uygulandıktan sonra elde edilen analiz sonuçları ortaya konulup sonuçlar tartışılmaktadır. 4. Bölümde ise sektörel temelde sonuçlar yorumlanıp politika önerileri sunulurken çalışma sonuçlandırılmaktadır.

BİRİNCİ BÖLÜM

AB’NİN ÇEVRE VE ENERJİ ETKİNLİĞİNİ ARTIRMAYA YÖNELİK

AMAÇLARI VE SEKTÖRE AİT BİLGİLER

1.1 AB’nin Çevre Ve Enerji Etkinliğini Artırmaya Yönelik Amaçları

Taşımacılık, AB ekonomisinin önemli bir sektörüdür ve günümüzün mobil toplumunda hayati bir rol oynamaktadır. Ulaşım ve hareketlilik de sürdürülebilir kalkınmanın merkezinde yer alır. Sürdürülebilir ulaşım, çevreyi korumanın ve erişilebilirliği ve ekonomik büyümeyi artırmanın yanı sıra kentsel-kırsal bağlantıyı, şehirlerdeki dayanıklılığı ve kırsal üretimi de artırabilir. AB'nin ulaştırma politikasının amacı, verimli, güvenli ve temiz ulaşımı teşvik ederek hem mallara yönelik iç pazarı hem de bireylerin AB içinde hareket özgürlüğünü desteklemektir (Eurostat, 2023b).

AB ulaştırma politikası AB’nin Beyaz Kitabında ana hatlarıyla belirtilmiştir. Kitap, gelecekteki kısıtlamaları karşılamak ve kamuya ve ekonomiye yönelik mevcut hizmet düzeyini korumak için sürdürülebilir bir ulaştırma endüstrisi geliştirmeye çalışmaktadır. CO₂ emisyonlarının azaltılması, özellikle kentsel alanlarda hava kalitesinin artırılması ve petrol sıkıntısının çözülmesi bu bağlamda önemli hedeflerdir. AB, 2050 yılına kadar ulaşımındaki sera gazı emisyonlarını 1990'a kıyasla %60 oranında azaltmak ve ithal enerjiye bağımlılığı azaltmak hedefleri enerji etkinliğini artıracak temel hedefler olarak ortaya çıkmaktadır.

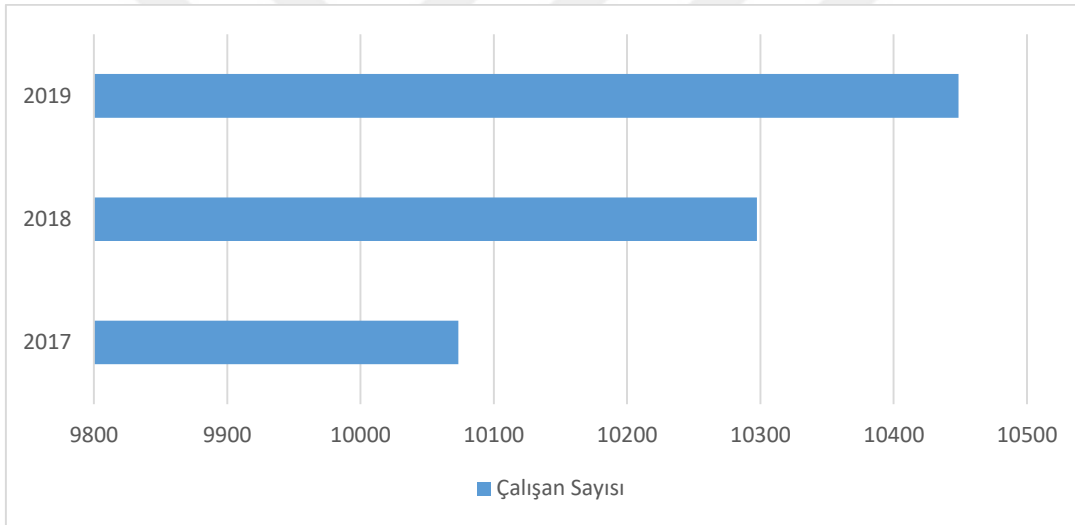
Komisyon, 2050 yılına kadar karbon nötr bir AB ekonomisi için bir çerçeve oluşturan Avrupa Yeşil Anlaşması'nı da kabul etmiştir. Bu çerçevede, ulaşım ile bağlantılı emisyonların 2050 yılına kadar %90 oranında azaltılmasını zorunlu hale getirmektedir. Sürdürülebilir ve akıllı hareketlilik şu şekilde tanımlanabilir: sürdürülebilir alternatif ulaşım yakıtlarının geliştirilmesini ve dağıtımını hızlandırmak; yollar arasında mobilite çözümlerinin

konuslandırılmasının kolaylaştırılması; fiyatlandırma yoluyla ulaşım faaliyetlerinin dış maliyetlerinin daha iyi karşılanması; ve özellikle ulaşım kaynaklı kirliliğin azaltılmasını içermektedir. Mart 2011'de Avrupa Komisyonu, kaynakları etkin kullanan bir ulaşım yapısını oluşturmak adına (COM(2011) 144 finali) Tek Avrupa Taşımacılık Alanına Yönelik Yol Haritası adlı bir teknik incelemeyi kabul etti. Bu strateji, hareketliliği artırmayı, büyük engelleri kaldırmayı ve büyümeyi ve istihdamı teşvik etmeyi amaçlayan rekabetçi bir ulaşım sistemi oluşturmak için 40 özel girişim içermektedir. Planın öncelikli hedefleri, enerjide dışa bağımlılığı azaltmak ve ulaşım kaynaklı CO₂ emisyonlarını 2050 yılına kadar (1990 seviyelerine göre) %60 oranında azaltmaktır. Bunu yapabilmek için, şehir içi ulaşımında kullanılan geleneksel yakıtlı otomobillerin miktarının 2030 yılına kadar yarıya indirilmesi ve 2050 yılına kadar kademeli olarak kullanımdan kaldırılması gibi çeşitli hedeflerin yerine getirilmesi gerekiyor; Gemi yakıtının CO₂ emisyonlarını 2050 yılına kadar en az %40 azaltmak; uçaklarda %40 sürdürülebilir, düşük karbonlu yakıt kullanımına geçiş; vb. 2030 yılına kadar önemli şehirlerde CO₂'siz şehir lojistiğine ulaşmak. AB'nin ulaşımında enerji ve çevre verimliliğini garanti altına alma hedefleri aşağıda kısaca belirtilmiştir. (Eurostat, 2023b). AB'nin genel amaçlarına yer verildikten sonra bu kısımda sektörle ilgili genel bilgiler paylaşılmaktadır.

1.2 AB'de Ulaştırma Sektörü İstihdam Dağılımı

2021 yılında AB'deki tüm istihdamın %3,1'i ulaştırma sektöründeydi ve 15 ile 64 yaşları arasında 6,0 milyon kişi istihdam ediliyordu. Bunların büyük çoğunluğunu yaklaşık olarak %83'ünü erkekler oluşturmuştur. Ulaştırma sektöründe çalışanların yaklaşık % 90'ı kara taşımacılığı (demiryolu veya kara yolu gibi), %5,7'si havacılık, %4,7'si ise su taşımacılığı (iç sular ya da deniz) ile iştigal etmektedir. 2021'de ulaştırma sektöründe en fazla işçi Fransa'da (842 bin veya toplam AB çalışanı sayısının %13,9'u), Polonya (792 bin veya

%13,1), Almanya (689 bin veya 11) bulunuyordu. Bunu İspanya ve İtalya (sırasıyla 627 bin ve 626 bin; her biri tüm işlerin yaklaşık %10'u) takip etmektedir. En az çalışan sayısı Kıbrıs ve Malta'dadır (sırasıyla 5 ve 6 bin; her bir ülkede toplam istihdamın oran olarak 0,1%'i tekabül etmektedir). Malta (%25,2), Güney Kıbrıs (%24,6) ve Almanya (%24,4) ulaştırma sektöründe kadın işçi oranının en yüksek olduğu ülkelerdir. Öte yandan Bulgaristan (%12,1), Hırvatistan (%11,5) ve Romanya (%9,7) en düşük yüzdelere sahip olan ülkeler olmuştur (Eurostat, 2021). Şekil 1 'de analiz periyodu boyunca AB'de ulaştırma sektöründe çalışan kişi sayısı verilmektedir.



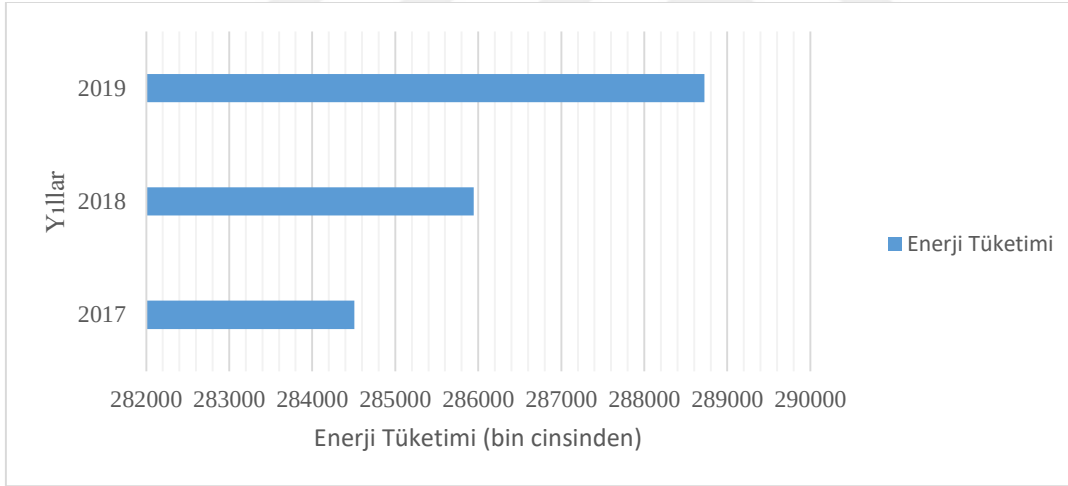
Kaynak: (Eurostat, 2023c).

Şekil 1. 2017-2019 Yılları Arasında AB Ülkelerinde Ulaştırma Sektöründe Çalışan Kişi Sayısı

Ulaşım çalışanları, otobüs, araba, kamyon, tren, uçak ve tekne işletmekten trafiği koordine etmeye ve müşteri hizmetleri sağlamaya kadar çeşitli görevlere sahiptir. Ayrıca karayolu, demiryolu ve su yollarında malzeme ve ürün taşıyabilirler (Mighty Recruiter, 2023). Şekil 1 'de görüleceği üzere, AB ülkelerinde ulaştırma sektöründe çalışan kişi sayısı analiz edilen dönemde %3'lük artış göstermektedir. Bu artış yıllar içerisinde ulaştırma talebindeki artışa bağlı olarak gerçekleşmiş olabilir.

1.3. AB'nin Ulaştırma Sektöründeki Enerji Tüketim Yapısı

Ulaştırma sektöründe “enerji kullanımı”, tüm endüstriyel bileşenlerin kullanım noktasında tükettiği toplam enerjiyi ifade etmektedir. Bu, bir sektörün tükettiği tüm enerjinin bir ölçüsü olan genel nihai tüketimini artırır. Ulaşım, enerjiyi birçok farklı şekilde kullanabilir; en baskın olarak yakıt yakarak arabaları ve diğer araçları çalıştırmaktadır, aynı zamanda araçların kendilerinin üretiminde ve yolların, havaalanlarının, deniz limanlarının ve boru hatlarının oluşturulmasında da kullanılmaktadır. Taşımacılığın nihai enerji tüketimindeki payı %31,7'dir ve bu da onu en büyük son kullanım sektörlerinden biri haline getirmektedir (Energy Education, 2023). AB ülkelerinde incelenen dönemde bin ton cinsinden toplam olarak gerçekleşmiş enerji tüketimi seviyelerine Şekil 2’de yer verilmiştir.



Kaynak: (Eurostat, 2023c).

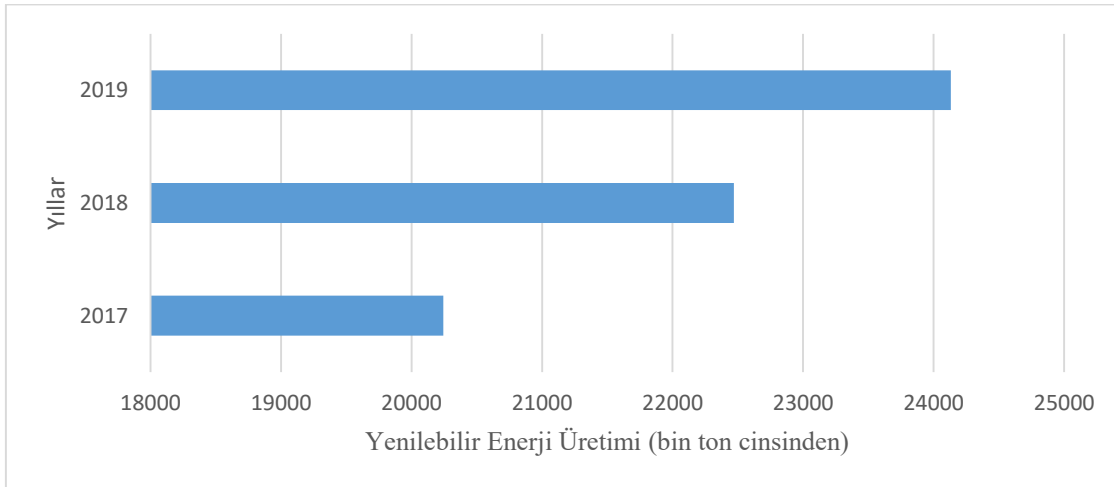
Şekil 2. 2017-2019 Yılları Arasında AB Ülkelerinde Ulaştırma Sektöründe Gerçekleşen Enerji Tüketim Miktarları

Şekil 2’de görüleceği üzere, analiz edilen dönemde toplam enerji tüketim seviyesinde artış gerçekleştiği gözlemlenmektedir. Ulaştırma sektöründe yıllar içerisinde gerçekleşen talep artışının bu ulaştırma sektöründeki enerji tüketimindeki artışa yansıdığı düşünülmektedir.

Sektörde kullanılan yakıtın büyük bir kısmı fosil yakıtlardan gelmektedir. Aralık 2020'de Avrupa Komisyonu, uygulanacak 82 girişimden oluşan bir Eylem Planı ile birlikte "Sürdürülebilir ve Akıllı Hareketlilik Stratejisi"ni sundu. 2050 yılına kadar, ulaştırma sektöründeki temel hedefler şunları içerecektir: Artık şehirlerde geleneksel yakıtlı arabalar olmaması amaçlanmaktadır. Havacılıkta %40 sürdürülebilir düşük karbonlu yakıt kullanımı; nakliye emisyonlarında en az %40 azalma, orta mesafeli şehirlerarası yolcu ve yük yolculuklarında karayolundan demiryolu ve denizyolu taşımacılığına %50 geçiş gibi hedefler bulunmaktadır.

1.4. AB’de Yenilebilir Enerji Yapısı ve Hedefleri

Enerji azaltışıyla ilgili tüm bu hedeflerin, yüzyılın ortasına kadar ulaşım emisyonlarında %60'lık bir azalmaya katkıda bulunması beklenmektedir. Sektörde yenilenebilir enerji kullanımının artırılması bu hedeflere ulaşmanın en genel yöntemlerinden biridir. Şekil 3’de analiz döneminde ulaştırma sektöründe üretilen toplam yenilebilir enerji miktarları bin ton cinsinden verilmiştir.



Kaynak: (Eurostat, 2023c).

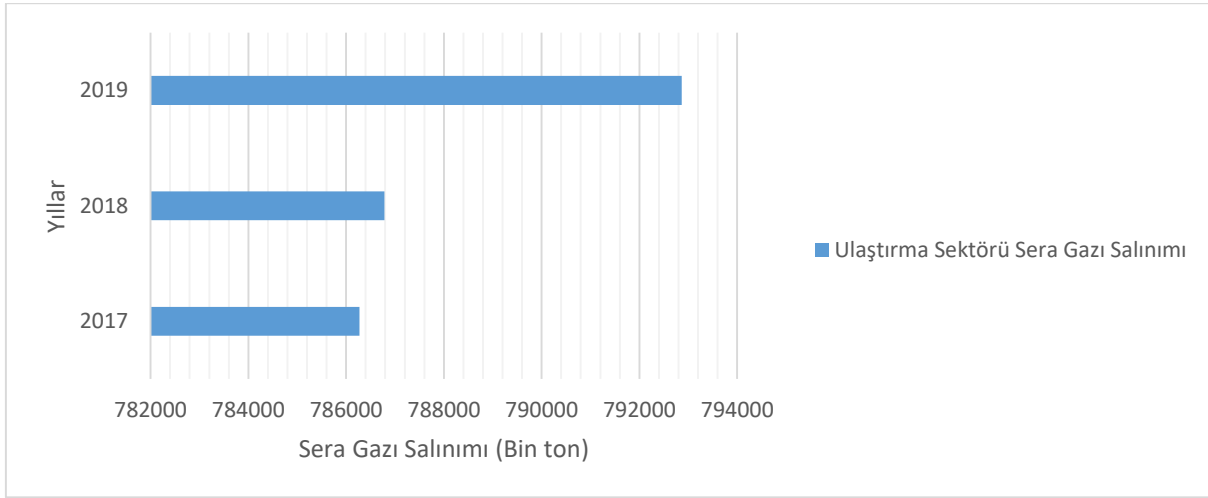
Şekil 3. 2017-2019 Yılları Arasında AB Ülkeleri Ulaştırma Sektöründe Gerçekleşen Yenilebilir Enerji Üretim Miktarı

2009 yılında, Yenilenebilir Enerji Direktifi (RED; 2009/28/EC) her üye devlet için, 2020 yılına kadar ulaşımda kullanılan tüm enerjinin %10'unun yenilenebilir kaynaklardan sağlanması gerektiği hedefini belirledi. 2005'ten bu yana yaşanan artış, esas olarak Avrupa genelinde biyoyakıt kullanımındaki genişlemenin sonucuydu: 2011 ile 2020 arasında, Yenilenebilir Enerji Direktifi uyumlu biyoyakıtlardan gelen ve ulaşımda kullanılan enerji miktarı iki kattan fazla arttı. Yalnızca bu kriterlere uyan biyoyakıtlar yenilenebilir enerji payına dahil edilmiştir. AB'de ulaşım için kullanılan yenilenebilir kaynaklardan elde edilen enerjinin payı ulaşım sektöründe 2005'te %2'nin altındayken 2020'de %10,2'ye yükseldi, 2021'de AB'de ulaşım için kullanılan yenilenebilir kaynaklardan elde edilen enerjinin payının aynı seviyede (%10,2) sabitlendiğini gösteriyor. AB devletleri arasındaki ilerleme, Yunanistan'da %5,6'dan İsveç'te %34'e kadar önemli farklılıklar göstermektedir (Avrupa Çevre Ajansı, 2023a).

1.5 AB'de Gerçekleşen Sera Gazı Salınımının Yapısı ve Hedefleri

Ulaşım sektörünün ekonominin temel taşı olmasına rağmen önemli bir dezavantajı bulunmaktadır. Ulaştırma sektörünün çevre ve halk sağlığı üzerinde olumsuz etkileri bulunmaktadır. Ulaşım, AB'deki sera gazı emisyonlarının yaklaşık olarak dörtte birini oluşturmaktadır ve Yerleşim alanlarının yok olmasına, gürültü ve hava kirliliğine neden olur. Örneğin, 1990'dan bu yana sera gazı salınımı Avrupa'daki diğer önemli sektörlerden daha fazla artış göstermektedir. Ayrıca bölgedeki nitrojen oksit emisyonlarının da birincil kaynağıdır ve hem çevreye hem de halk sağlığına zararlıdır. Taşımacılık faaliyetinin büyük hacmi, sera gazı emisyonlarını etkilemektedir ve her tür taşımaya yönelik taleplerin artması beklenmektedir. AB, 2050 yılına kadar iklim-nötr olmayı hedeflemektedir. Daha aktif ulaşım, daha temiz yakıtlar ve mümkünse hareketlilik talebinin azaltılması üzerine kurulu sürdürülebilir bir hareketlilik sistemi olmadan bu hedefe ulaşamaz (Avrupa Çevre Ajansı,

2023c).Şekil 4’de AB ülkelerinde 2017-2019 döneminde ulaştırma sektöründe gerçekleşen sera gazı salınım miktarlarına yer verilmiştir.



Kaynak: (Eurostat, 2023c).

Şekil 4. 2017-2019 Yılları Arasında AB Ülkelerinde Ulaştırma Sektöründe Sera Gazı Salınımı

AB'nin yurt içi taşımacılık emisyonları, (ekonomik büyüme eğilimleriyle yakından ilişkili olan) yolcu taşımacılığı ve ülke içi yük hacimlerindeki büyüme nedeniyle 2013 ile 2019 arasında istikrarlı bir şekilde artış göstermiştir. AB tahminleri, gelecek dönemler için ulaşım emisyonlarında bir artış beklediklerini ifade etmektedir. Ek önlemler uygulanmadan 2025 yılına kadar bir artış gözlemlenebilirken, sonraki öngörülen azalmalar 2030'da ulaşım emisyonlarını 1990 seviyelerinin yaklaşık %9 üzerinde bırakacaktır. Bu ek önlemlerle 2030 emisyonlarının 1990 seviyelerine göre %6 daha düşük olması bekleniyor. Ulaştırma sektörünün ortaya koyduğu politika ve çabaların büyük bir kısmı, toplu taşımanın yanı sıra düşük karbonlu veya elektrikli araç teknolojilerinin kullanımının artırılmasına odaklanmaktadır (Avrupa Çevre Ajansı, 2023b).

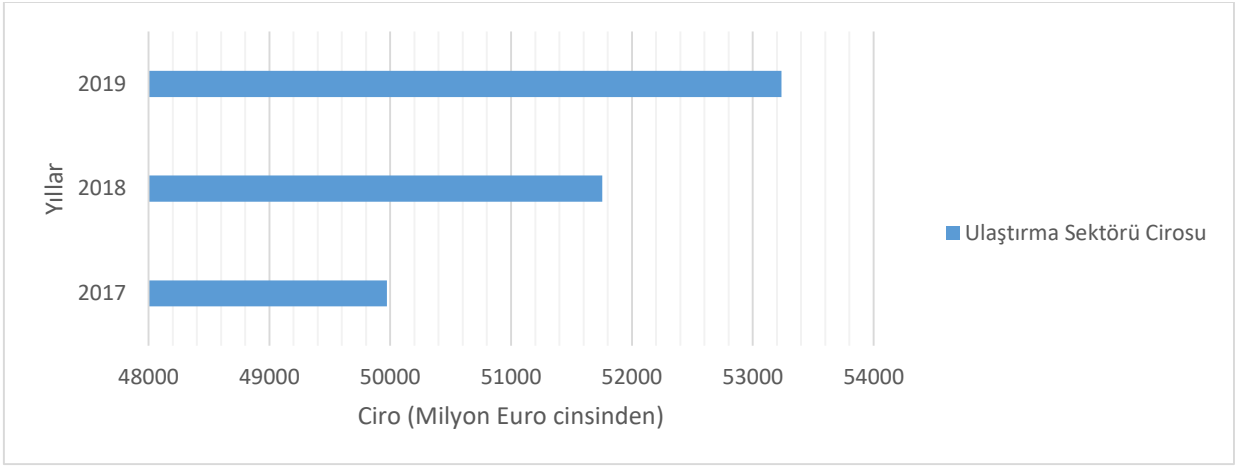
1.6. AB’de Ulaştırma Sektöründe Ciro ve Sermaye Oluşumunun Genel Yapısı

Ulaştırma sektörü, tedarik zincirine değer katan bir unsurdur. Taşıma, tedarik zincirinde önemli bir bağlantıdır ve tedarikçilerden müşterilere mal akışını kolaylaştırmaya

yardımcı olur. Örneğin, bir şirketin ürünlerini üretebilmesi için tedarikçilerinden aldığı hammaddeleri üretim tesislerine taşıması gerekebilir. Etkili bir ulaştırma sektörü, malzeme ve zaman israfını minimize ederek tedarik zincirini geliştirir. Bu gelişim, işletmelerin ürünleri zamanında ve doğru menzillere teslim etmesine imkân tanır ki bu, bütün yüksek performans gösteren firmalar için olmazsa olmaz bir gerekliliktir (AACB, 2023).

Taşımacılık ve depolama hizmetlerine ilişkin beş alt sektörün üçünde Almanya, AB üyeleri arasında birinci sırada yer aldı. Kara taşımacılığı ve boru hattı taşımacılığı alt sektöründe Fransa, AB katma değerinin en büyük yüzdesini (%8,9) oluştururken, su taşımacılığı alt sektöründe Danimarka'nın katılımı %1,5 oldu. Katma değer açısından Baltık Üye Devletleri nakliye ve depolama hizmetleri alanında öne çıkmaktadır. 2020 yılında Litvanya (%15,1) ve Letonya (%9,5) diğer AB Üye Devletleriyle karşılaştırıldığında bu sektörde çok daha yüksek katma değer payı elde etti. Litvanya öncelikle kara taşımacılığı ve boru hatları yoluyla taşımacılık alt sektöründe uzmanlaşmıştır (finansal olmayan ticari ekonomi katma değerinin %10,9'u). Danimarka su taşımacılığı alt sektöründe (% 3,9), Macaristan hava taşımacılığı alt sektöründe (% 0,3), Kıbrıs depolama ve taşımacılık için destek faaliyetlerinde (% 5,1) en yüksek uzmanlaşma derecesini bildirirken, Almanya en uzman AB üyesi olmuştur. Posta ve kurye faaliyetlerinde Almanya'nın ticari ekonomi katma değerinin %1,2'si bu alt sektörden gelmektedir. Almanya, Avrupa'daki merkezi konumu nedeniyle istihdam (%21,6) ve katma değer (%24,5) açısından AB üyeleri arasında en yüksek seviyelere ulaştı. Bunu Fransa (%16,0 katma değer; %14,5 istihdam) ve İtalya (%11,9 katma değer; %10,9 istihdam) izledi.

Şekil 5'de 2017-2019 döneminde AB ülkelerinde ulaştırma sektöründe gerçekleşen ortalama ciro miktarlarına yer verilmektedir.

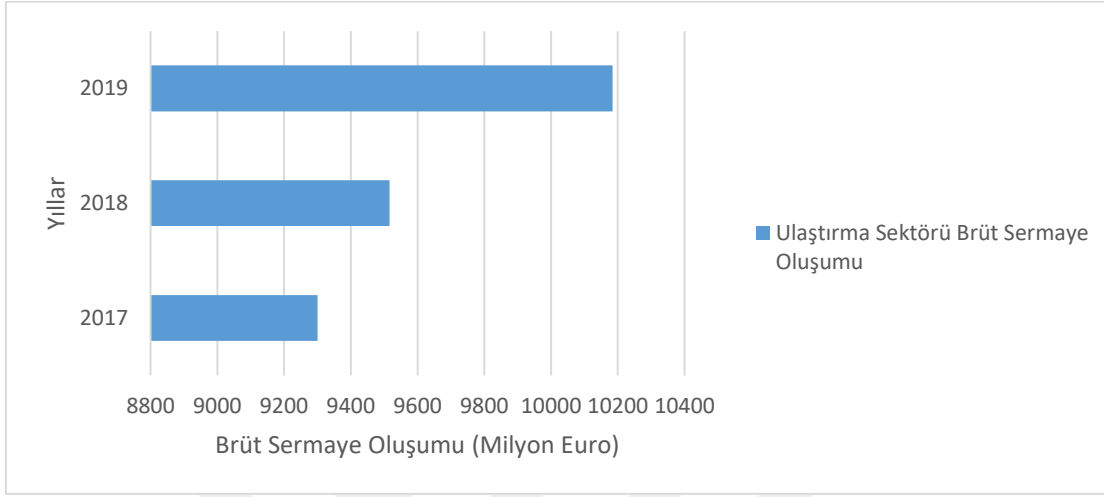


Kaynak: (Eurostat, 2023c).

Şekil 5. 2017-2019 Döneminde AB Ülkelerinde Ulaştırma Sektöründe Elde Edilen Ortalama Ciro Miktarları

Şekil 5’de görüleceği üzere, artan ulaştırma sektöründeki faaliyetlere eşgüdümlü olarak aynı dönemde ciro miktarlarının benzer şekilde arttığı gözlemlenmektedir. Yaklaşık 135 ulaştırmayla ilgili proje, AB’den toplam 5,4 milyar Avro tutarında finansman almak üzere seçildi. Finansman, tüm AB Üye Devletlerinde kıta genelinde eksik ulaşım bağlantılarının inşasına, sürdürülebilir ulaşımın desteklenmesine, güvenliğin ve birlikte çalışabilirliğin geliştirilmesine ve istihdam yaratılmasına katkıda bulunacak. AB’nin ulaştırma altyapısına yönelik hedeflenen yatırımlara yönelik mali aracı olan Avrupa’yı Bağlama Projesi, seçilen projelerin yanıt verdiği fikir talepleri yayınladı. Finansman için seçilen projelerin tümü, AB Üye Devletlerini ve diğer bölgeleri otoyollar, demiryolları, iç su yolları, kısa deniz taşımacılığı rotaları, limanlar ve havalimanlarından oluşan bir ağ aracılığıyla birbirine bağlayan Trans-Avrupa Ulaştırma Ağı üzerinde yer almaktadır. Komisyonun hedefi, Trans-Avrupa Ulaştırma çekirdek ağını 2030 yılına kadar ve kapsamlı ağı 2050 yılına kadar tamamlamanın yanı sıra, altyapısının AB’nin Avrupa Yeşil Mutabakatında belirtildiği gibi iklim hedeflerine ulaşmasına yardımcı olmasını sağlamaktır (Avrupa Komisyonu, 2023b).

Şekil 6’da AB ülkelerinde 2017-2019 döneminde ulaştırma sektöründe ortalama brüt sermaye oluşum miktarlarına yer verilmektedir.



Kaynak: (Eurostat, 2023).

Şekil 6. 2017-2019 Döneminde AB Ülkelerinde Ulaştırma Sektöründe Ortalama Brüt Sermaye Oluşum Seviyesi

Şekil 6’da görüleceği üzere, analiz edilen dönemde AB brüt sermaye oluşum miktarları gerçekleştirilen yatırımlarla paralel olarak artış gözlemlenmektedir.

Bu bölümde AB birliği ülkelerinde sektör bazlı bilgiler ayrıntılı şekilde sunulduktan sonra çalışmanın bir sonraki kısımda analiz ile ilgili temel kavramlara yer verdikten sonra analizde kullanılan karar verme yöntemleri ayrıntılı bir şekilde tanıtılmaktadır.

İKİNCİ BÖLÜM

KARAR VERME TEKNİKLERİYLE İLGİLİ GENEL KAVRAMLAR VE YAKLAŞIMLAR

2.1 Etkinlik Kavramı

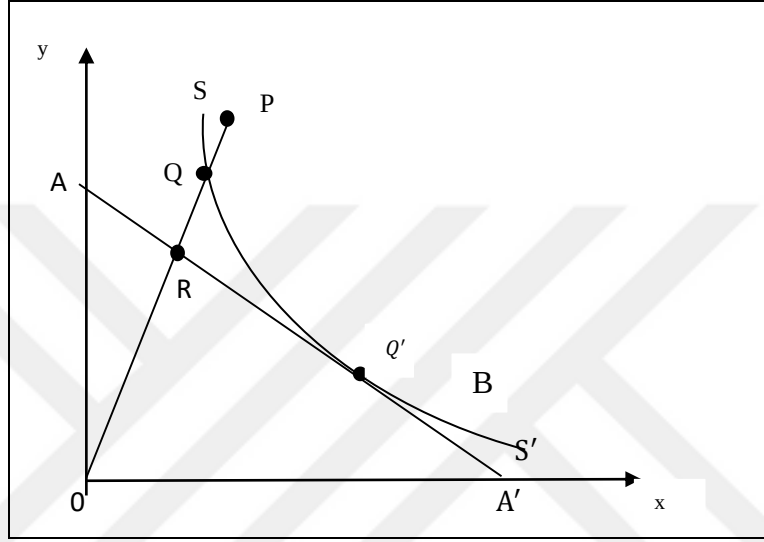
Debreu (1951)'e göre, etkinlik kaynakların doğru kullanılması şeklinde ifade edilebilecek ekonomik bir terimdir. Bu çerçevede bir organizasyon üretim faaliyetinde mümkün olan maksimum çıktıyı elde ediyorsa ya da üretim sürecinde mümkün olan minimum girdiyi kullanıyorsa etkindir denilebilir. Etkinliği ampirik olarak ölçebilme amacıyla Farrell (1957) eş ürün mesafesini karar verme birimleri (KVB) için etkinlik ölçüsü olarak ortaya atmıştır. Farrell aynı zamanda etkinlik analizinin homojen KVB üzerinden gerçekleştirilmesini önermiştir. Farrell tarafından etkin sınır olarak adlandırılan eş ürün, örnekleme en iyi faaliyet gösteren KVB üzerinden hesaplanmaktadır. Ayrıca, etkinlik analizinin başarısı için üretim fonksiyonunun doğru olarak belirlenmesi gerekir (Zambon Ferraresi vd. 2017: 293).

VZA kapsamında etkinlik ise çıktıların ağırlıklı toplamının girdilerin ağırlıklı toplamına oranlanmasıyla elde edilmektedir. Bir KVB'nin etkinliği, Eşitlik (1)'de gösterildiği gibidir (Hwang vd, 2016: 123).

$$h_0 = \frac{\sum_{r=1}^s u_r y_{r0}}{\sum_{i=1}^m v_i x_{i0}} \quad (1)$$

Burada, s çıktı sayısını, u_r r çıktısının ağırlığını, y_{r0} çıktı r miktarı, m girdi miktarı, v_i girdi i miktarı, x_{i0} girdi i miktarını ifade etmektedir. Farrell 1957 yılındaki çalışmasında üretim etkinliğinin yapısını incelemiştir. Farrell çalışmasında üretim etkinliğini, teknik etkinlik ve tahsis etkinliği olarak iki bölümde ele almıştır (Färe vd. 1984: 281). Etkinliğin,

girdilerin çıktılara dönüştüğü üretim sürecindeki uzmanlık olarak nitelendirildiği durum teknik etkinliği ifade etmektedir. Etkinliğin minimum maliyetle üretim gerçekleştirme ya da maksimum getiriye sağlaması gibi ekonomik amaçların gerçekleştirilmesi durumunda ise tahsis etkinliği olarak ifade edilmektedir (Lovell vd. 1994:176).



Kaynak: (Farrell, 1957: 254)

Şekil 7. Teknik Etkinlik ve Tahsis Etkinliği

Şekil 7’de Farrell ölçeğe göre sabit getiri varsayımı altında iki girdi kullanılarak tek çıktı üretildiği bir üretim sürecini ifade etmektedir. **SS'** eş ürün eğrisiyle ifade edilen etkin firmaların teknik etkinliğinin ölçümüne imkân tanımaktadır. Eğer belirli bir firma P noktasıyla ifade edilen girdileri kullanırsa QP mesafesi çıktıda herhangi bir değişikliğe gitmeden girdilerin oransal olarak azaltılabileceği mesafe QP mesafesi olarak ifade edilebilir. Bir firmanın teknik etkinliği OQ / OP oranıyla ölçülmektedir. Teknik etkinlik 0 ile 1 arasında değerler almaktadır. 1 değeri firmanın tamamen teknik etkin olduğunu ifade etmektedir. Şekil 7’de Q noktası eş ürün eğrisi üzerinde yer aldığı için teknik etkindir (Coelli vd. 2005: 52).

Teknik etkinlik, firmanın mevcut girdi demetiyle elde edilebilecek en çok çıktı ya da belirli seviyede çıktı üretmek için gerekli en düşük seviyede girdi kullanmasıyla ilgilidir. Teknik etkinlik tanımları, sırasıyla çıktı ve girdi odaklı etkinlik ölçümü olarak bilinmektedir. Bu iki etkinlik ölçüsü ölçeğe göre sabit getiri varsayımı altında aynı olmaktadır. Eğer girdi fiyat bilgisi mevcutsa tahsis etkinliği Q noktasında eğriye teğet olan eş maliyet eğrisi kullanılarak ölçülebilir. Eğer bütün KVB'ler bu eğri tarafından yansıtılan fiyatlar ile karşılaşılıyorsa Q' noktasında faaliyet gösteren KVB en düşük maliyetle faaliyet göstermektedir. Q noktasında faaliyet gösteren KVB teknik olarak etkin olarak etkin olmasına rağmen maliyet etkinliği yoktur çünkü tahsis etkinliği yoktur. Bu KVB'ler girdilerini optimal oranlarda kullanmamaktadır bu sebeple de mümkün olan minimum maliyetle faaliyet gösterememektedir (Coelli vd, 2002: 610). Eğer fiyat bilgisi mevcutsa ve maliyet minimizasyonu ya da kar maksimizasyonu gibi varsayımlar uygunsa bu tür durumlarda teknik etkinliğin yanında tahsis etkinliğini de göz nünde bulundurmak gerekir. Tahsis etkinliği belirli girdi fiyatı seviyesinde belirli çıktıyı en düşük maliyetle üretilmesini ifade eder. Tahsis ve teknik etkinliğinin birlikte gerçekleştirilmesi ise toplam etkinliği ortaya koyacaktır (Coelli vd, 2005: 5).

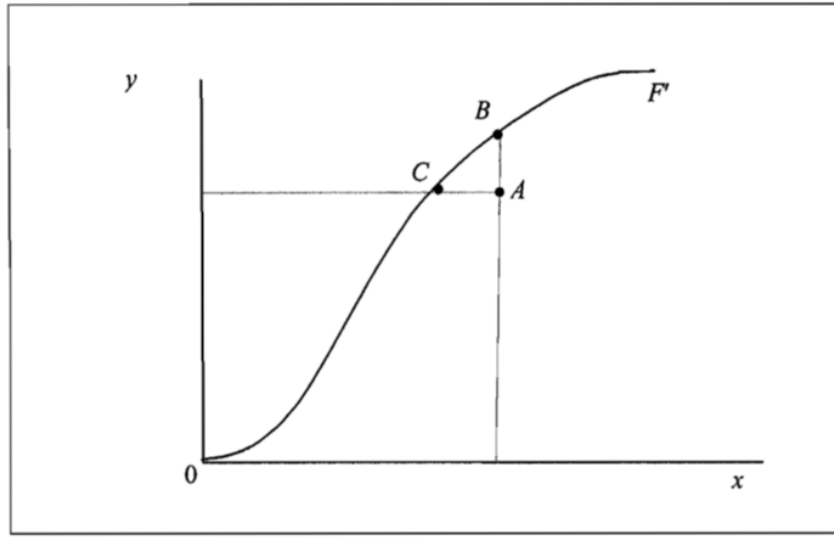
2.2 Verimlilik Kavramı

Verimlilik kavramı en genel ifadeyle çıktıların girdilere oranlanması şeklinde ifade edilmektedir (Coelli vd. 2005: 2).

$$Verimlilik = \frac{Çıktılar}{Girdiler}$$

Tek girdi ve tek çıktıdan oluşan bir üretim sürecinde bu hesaplama kolaydır. Ancak, üretim süreçleri genellikle birden fazla girdiden oluşmaktadır. Bu üretim süreçlerinde girdileri tek bir girdi endeksine birleştirecek bir yöntem kullanılması gerekmektedir. Bu kapsamda kullanılan verimlilik ölçütü toplam faktör verimliliğidir.

Verimlilik ve etkinlik kavramları sürekli birbirinin yerine kullanılsa da farklı kavramlardır. Bu iki kavramı ayırt edebilmek için tek girdinin (x) tek çıktıyı (y) ürettiği bir süreç ele alınacak olursa Şekil 2’de girdi ve çıktı arasındaki ilişkiyi gösteren üretim sınırı görülebilecektir. OF eğrisi x girdisi kullanılarak elde edilen y çıktısının üretim sınırını göstermektedir. Üretim sınırı her girdi seviyesinde elde edilebilecek maksimum çıktı seviyesini ifade etmektedir. Bu sebeple, üretimdeki mevcut teknolojiyi yansıtmaktadır. Karar verme birimleri (KVB), teknik etkin ise bu sınırın üzerinde değilse altında faaliyet göstereceklerdir. Şekil 8’de A noktası etkin olmayan, B ve C noktaları etkin noktaları ifade etmektedir. Şekil 8 ayrıca uygulanabilir üretim kümesini göstermektedir. Uygulanabilir üretim kümesi, x eksenine OF’ üretim sınırı arasında kalan bütün noktaları içermektedir. Üretim sınırı boyunca görülen bu noktalar, uygulanabilir üretim sınırının etkin alt kümelerini ifade etmektedir (Coelli vd, 2005: 3).

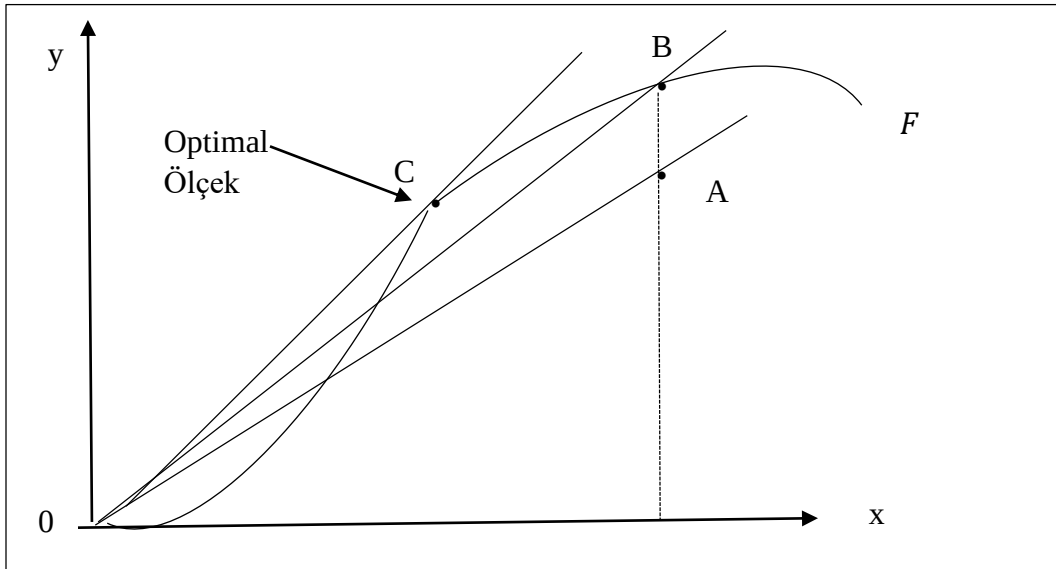


Kaynak: (Coelli vd. 2005)

Şekil 8. Üretim Sınırı ve Teknik Etkinlik

Teknik etkinlik ve verimlilik arasındaki farkı göstermek için Şekil 9 ele alınmaktadır. Şekil 9’da OF eğrisi verimlilik kavramını göstermek için kullanılmaktadır. Şekil 3’de OF

eğrisinde y/x oranı verimliliği ifade etmektedir. A noktasındaki KVB teknik etkin olan B noktasına gelirse eğrinin eğimi artış gösterecektir ve daha yüksek verimlilik oranı ortaya çıkacaktır. Ancak C noktasına hareket ettiğinde orijinden çıkan ve eğrinin üretim sınırına teğet olduğu C noktası mümkün olan en yüksek verimliliği ifade etmektedir. Bu hareket ölçek ekonomisini kullanmayı ifade etmektedir. Üretim sınırında başka bir noktada faaliyet göstermek daha düşük verimliliğe yol açacaktır. Bu noktadan hareketle, bir KVB'nin teknik olarak etkin olabileceğini ancak ölçek ekonomisini kullanarak verimliliğini artırabileceği çıkarımında bulunulabilir. Ölçek değişimi çok hızlı bir şekilde yapılamayacağı düşünüldüğünde teknik etkinlik ve verimliliğin kısa ve uzun önem yorumlanması gerekmektedir. Şu ana kadar yapılan açıklamalarda zaman boyutu ele alınmamıştır. Zaman içerisinde verimlilik kıyaslaması ele alındığında bu durum üretim sınırında yukarı yönlü kayma ile ifade edilmektedir. Bir KVB'nin verimliliğinin bir yıldan diğer yıla artış gösteriyorsa bu artış sadece etkinlik artışından kaynaklanmıyor olabilir. Bu durum, teknik değişiklikten ya da ölçek ekonomisinden ya da bütün bu üç faktörlerin bileşiminden kaynaklanabilir (Coelli vd, 2005: 5).



Kaynak: (Coelli vd. 2005)

Şekil 9. Verimlilik, Teknik Etkinlik ve Ölçek Ekonomisi

2.3 Etkinlik Ölçme Yöntemleri

Literatürde etkinlik ölçme yöntemleri temelde iki kategoride ele alınmaktadır. Bunlar parametrik yöntemler ve parametrik olmayan yöntemlerdir. En bilinen parametrik etkinlik ölçme yöntemi Stokastik Sınır Analizidir (SSA). Parametrik yöntemler belirli fonksiyon yapılarının ortaya konulmasını gerektirmektedir. Ayrıca seçilen fonksiyonun yapısı, hata teriminin dağılımıyla ilgili varsayımlar gerektirmektedir. (Charnes vd, 1997). Diğer etkinlik ölçüm yöntemleri ise parametrik olmayan yöntemlerdir. Parametrik olmayan yöntemler ön varsayımlara çok daha az bağlı olmasıyla bilinmektedir. Parametrik olmayan yöntemlerin en bilineni ise VZA'dır (Ding ve Sickles, 2018: 263). SSA ve VZA arasında seçim yaparken temel nokta, karar vericinin ortalama yapı üzerinde esneklik ya da gürültü ayırımında hassaslık beklentisiyle ilgilidir. Kıyaslama yöntemlerinin önemli özelliklerinden bir tanesi, endüstrinin özelliklerini taşıyabilme becerisidir. Bu durum, esnek bir yöntemin varsayımlara dayanmasından ziyade etkin sınırın veriye adapte olmasını ifade etmektedir. Parametrik olmayan yöntemler, doğası gereği esneklik yönünden daha avantajlı yöntemlerdir. Etkinlik yöntemlerini kıyaslamada diğer önemli bir kıyaslama noktası gürültülü veriyle mücadele etme becerisidir. Stokastik modeller, gürültü bileşenini modele dahil edebildiklerinden dolayı ise bu yönden daha avantajlıdır (Bogetoft ve Otto, 2010: 19). Sınır yaklaşımlarının sınıflandırılması Tablo 1'de gösterilmiştir (Bogetoft ve Otto, 2010: 18).

Tablo 1. Sınır Yaklaşımlarının Sınıflandırılması

Etkinlik Yöntemleri	Deterministik	Stokastik
Parametrik Yöntemler	Düzeltilmiş En Küçük Kareler Yöntemi	SSA

Literatürde sıklıkla kullanılan SSA ve VZA yöntemlerinin birbirlerine göre çeşitli avantaj ve dezavantajları bulunmakla birlikte bu iki tür yaklaşımın ortak özelliği ise öncelik, fiyat ve tercih seçimiyle ilgili önkoşullar gerektirmemeleridir (Bogetoft ve Otto, 2010: 20).

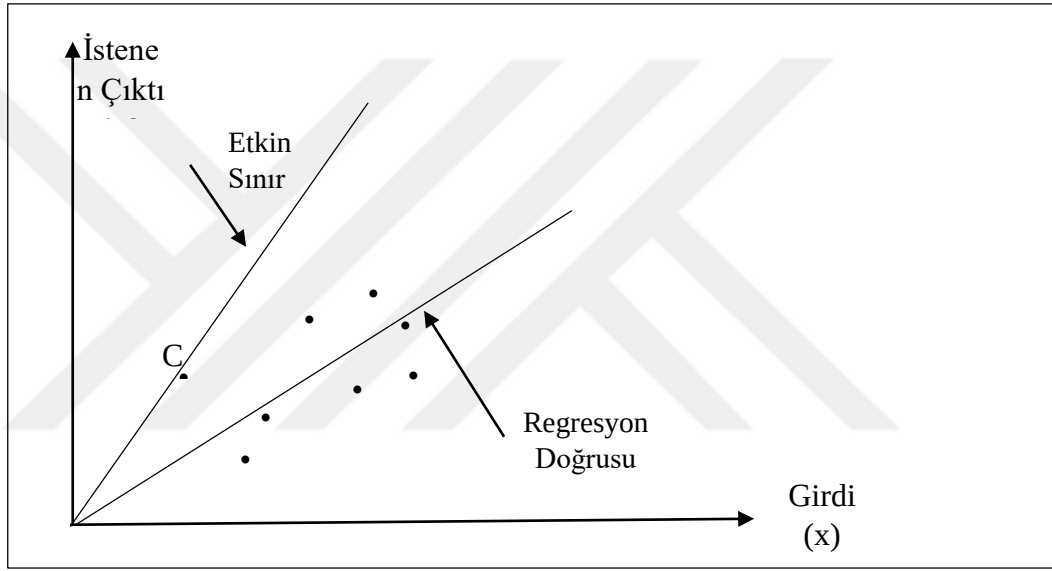
2.3.1 Veri Zarflama Analizi

VZA'nın temeli 1957 yılında Farrell'in gerçekleştirdiği etkinlik çalışmasına dayanmaktadır (Mardani vd, 2017: 1300). Homojen KVB'lerin teknik etkinliğini ölçmek amacıyla Farrell (1957) parametrik olmayan bir yöntem ortaya atmıştır. Sonrasında Førsund and Hjalmarsson (1974) etkinlik kavramını mikro ve makro düzeyde ele alıp üretim sınırı ile etkinlik arasındaki farkı gösterdiler. Veri zarflama analizi, ilk kez Charnes, Cooper, Rhodes tarafından benzer ekonomik üretim sistemlerinin göreceli etkinliğini ölçmek amacıyla 1978 yılında ortaya atılmış doğrusal programlama temelli bir yaklaşımdır (Khezrimotlagh ve Chen, 2018: 227). Charnes ve diğerleri tarafından tanıtılan VZA, çok girdili ve çok çıktılı homojen karar verme birimlerinin (KVB'ler) göreceli etkinliğini ölçmek için doğrusal programlamayı kullanan, parametrik olmayan, veriye dayalı bir modeldir (Sotoudeh-Anvari, 2022). Bütün işletmelerin faaliyetleri katma değer üreten ve mal ve hizmetlerin bir dönüşüm sürecini içerir. Yöneticiler, çoklu girdi ve çoklu çıktı üreten yapıların bu süreçte ne derece etkin olduğunu görmek istemektedirler (Gökgöz ve Erkul, 2019). Performans değerlendirmesi ve kaynakların etkin kullanılması rekabetçi kalabilmek için vazgeçilmez bir şarttır. Bu amaçla kullanılan VZA, performans değerlendirmesinde kullanılan etkin bir yöntemdir (Zhu, 2014: 1; Gökgöz ve Güvercin, 2018). 1978 yılından itibaren VZA çok çeşitli alanlarda uygulanmıştır. Hastane, üniversite, enerji konuları, ticari şirketlerin etkinliği gibi çok girdili ve çok çıktılı üretim süreçlerinde yaygın şekilde kullanılmaktadır. VZA'nın

yaygın şekilde kullanılmasının temel nedenleri ise hesaplama kolaylığı ve ölçek etkinliğini, tahsis ve teknik etkinlik olarak ayırabilme imkânı tanınması gösterilebilir (Gorton ve Davidova, 2004: 6). Charnes vd. en etkin KVB'yi etkin sınır olarak alırken diğer KVB'lerin bu etkin sınıra mesafesini etkinlik skoru olarak belirlemektedir. Etkin sınırdaki KVB 1 etkinlik değerini alırken diğer KVB'lerin etkinliği, etkin KVB'ye olan mesafesiyle ölçülmektedir (Liu vd, 2016a). VZA, doğrusal programlama temelli olarak girdilerin çıktılarına dönüştürülmesiyle KVB'lerin etkinliklerinin karşılaştırılmasına imkân sağlamaktadır. VZA'da her KVB, göreceli etkinliğini artırmak için olası girdi ve çıktı karmasını seçebilir. VZA'da etkinlik skoru ise toplam ağırlıklı çıktının toplam ağırlıklı girdiye oranlanması şeklinde bulunmaktadır. Başka bir ifadeyle, belirli bir çıktıyı üreten KVB'nin kullandığı girdiyi diğer KVB'lere göre ne derece etkin kullandığını göstermektedir (Mardani vd, 2017: 1298). Bir KVB'nin ürettiği çıktıyı eğer veri setinde başka bir KVB aynı girdileri kullanarak üretemiyorsa o KVB etkindir (Soteriou ve Zenios, 1999: 236). VZA veri noktaları üzerinde parametrik olmayan etkin sınır oluşturmaktadır. Böylelikle bütün gözlemler sınırın üzerinde veya altında yer almaktadır (Latruffe vd, 2005: 283).

VZA'nın diğer bir özelliği ise etkin olmayan KVB'ler için iyileştirme hedefleri belirlemesidir. Benchmark (referans nokta) olarak alınan etkin sınır, bir veya daha fazla KVB'nin doğrusal kombinasyonu olarak tanımlanır (Paradi vd, 2017). Matematiksel olarak VZA, KVB'lerin girdi ve çıktıları için çarpanları (ağırlıklar) elde eder, böylece kısıtlamalara uyarak verimlilikleri maksimize edilir. Basitçe ifade edilirse, VZA, belirli bir KVB'nin etkinliğini, KVB'nin girdileri çıktılarına ne kadar iyi dönüştürdüğünü karşılaştırarak ortaya koymaktadır. Geleneksel VZA'nın bazı özellikleri şu şekilde ifade edilebilir: Normalizasyon gerektirmez, ağırlıklar karar verici tarafından tahsis edilmemektedir, ortak bir ağırlık seti kullanmaz (Sotoudeh-Anvari, 2022).

VZA merkezi eğilimin aksine sınırlara yönelmiş bir metodolojidir. Regresyon benzeri yaklaşımların verilerin merkezinden geçen bir düzlem aramasının aksine, VZA yaklaşımı böyle bir eğilim göstermemektedir. Bu bakış açısı, VZA'ya diğer yöntemlerde gizli kalan ilişkilerin ortaya çıkmasına imkân tanıyabilir. Bir KVB'nin diğer bir KVB'ye göre etkin olarak kabul edilmesi formül halideki varsayımlara ihtiyaç duyulmadan kolay bir şekilde gerçekleştirilmektedir (Cooper vd, 2011).



Kaynak: (Sueyoshi ve Goto, 2018: 29)

Şekil 10. Etkin Sınır ve Regresyon Doğrusu

Şekil 10'da etkin sınır C noktasından geçmektedir ve bu KVB etkin iken diğer KVB'ler etkin değildir. Regresyon doğrusu ise bütün KVB'lerin merkezine yerleşmektedir. C noktası esas alınarak oluşturulan etkin sınır sayesinde diğer KVB'lerin göreceli etkinliği C noktasına olan mesafelerin ölçümüyle belirlenmektedir. Etkin sınır, performans analizi için bir temel oluştururken bütün KVB'lerin ortalamasından geçen regresyon doğrusu ise bağımsız değişken (x) değeri üzerinden bağımlı değişken (g)'nin tahmini değeri belirlenmeye çalışılmaktadır (Sueyoshi ve Goto, 2018: 29).

Charnes, Cooper ve Rhodes, Farrell'in ölçüsünü çoklu girdi ve çoklu çıktı durumuna adapte etmiştir. Ayrıca, VZA parametrik olmayan bir yöntem olması ve üretim teknolojisinde belirli varsayımlar gerektirmemesinden dolayı avantajlı bir yöntemdir (Gökgöz, 2010). VZA'nın dezavantajı ise her bir KVB'ne atfedilen etkinlik değerinin göreceli olmasıdır. Eğer etkin KVB örneklemden çıkarılırsa VZA iç üretim sınırına dayandığı için VZA etkinlik ölçümünü fazla hesaplayabilir. VZA, istatistiksel analize tabi bir yöntem olmadığı için deterministik bir etkinlik ölçüm yöntemi olarak bilinmektedir (Lombardi vd, 2019: 1038). Deterministik etkinlik ölçüm yöntemleri, etkin sınırdan bütün sapmaları etkinsizlik olarak kabul etmektedir. Bu sebepten dolayı, hata terimi ve diğer rassal faktörleri göz ardı etmektedir. Diğer taraftan, SSA rassal etkileri modele dahil etmektedir (Gorton ve Davidova, 2004: 6). VZA'nın bir diğer özelliği ise girdi ve çıktıların atfedilen ağırlıkların önceden belirlenmemiş olmasıdır. Bu ağırlıklar DP probleminin çözümünde ortaya koyulabilmektedir (Hwang vd, 2016: 189). VZA, kıyaslanabilir şartların olduğu ortamlarda daha uygun sonuç vermektedir. VZA, piyasa fiyatlarına odaklanmış olan ekonomik etkinliği ölçmek yerine temelde çıktıların göre girdilere odaklanan teknik etkinliği ölçmektedir. VZA'nın bir diğer özelliği ise ölçümde kullanılan girdi ve çıktıların kendi birimlerinde kullanılıyor olup başka bir birime dönüştürme gereksinimi duymamasıdır (Paradi vd, 2017: 4).

VZA uygulanmasının en temel bazı sebepleri şu şekilde sıralanabilir (Golany ve Roll 1989: 238):

- Kaynakların ve her bir kıyaslanan birimde göreceli etkisizliklerin belirlenmesi
- Birimlerin etkinlik sonuçlarına göre sıralanması
- Kaynakları kullanan yönetimin değerlendirilmesi
- Program ve politikaların etkinliğinin değerlendirilmesi

- Değerlendirilen birimlerin yeniden tahsisi konusunda nicel bir temel oluşturmak

VZA yönteminin uygulanma aşamaları şu şekilde ifade edilebilir (Golany ve Roll 1989: 238):

- Analize tabi tutulacak KVB'lerin belirlenmesi
- Belirlenen KVB'lerin göreceli etkinliğini yansıtacak girdi ve çıktı faktörlerinin belirlenmesi

- VZA modellerinin uygulanması
- Analizin gerçekleştirilmesi ve sonuçların yorumlanması

VZA'da girdi yönlü ve çıktı yönlü ve yönelimsiz olmak üzere üç yönelim bulunmaktadır. Girdi yönlü modellerde, çıktı düzeyinde etkinlik sınırına ulaşamayan karar birimlerinin, girdi değişkenlerini ne kadar düşürmesi gerektiğini gösteren modellerdir. Bu modellerde ulaşılmaya çalışılan amaç çıktı miktarı sabit iken girdi miktarını minimize etmektir. Çıktı yönlü modellerde ise, girdi düzeyinde etkin sınırında olmayan karar birimlerinin etkin sınıra gelebilmesi için çıktı değişkenlerinde nasıl değişiklik yapılması gerektiğini gösteren modellerdir. Bu modellerde ulaşılmaya çalışılan amaç, girdi miktarı sabit iken çıktı miktarını maksimize etmektir (Ramanathan, 2003: 60 & Latruffe vd, 2005: 283). Girdi ve çıktı yönlü modeller, ölçeğe göre sabit getiri varsayımı altında aynı sonucu vermektedir. Ölçeğe göre değişken getiri durumunda sonuçlar farklılaşmaktadır. Bazı çalışmalarda girdi odaklı yaklaşım kullanılmaktadır. Özellikle elektrik firmaları gibi belirli siparişleri olan sektörlerde su sebeple girdi değişkenleri asıl odak noktası olmaktadır. Bazı endüstrilerde ise firmaya sabit miktarda kaynak sağlanıp bu kaynaklarla olabildiğince fazla çıktı üretilmesi beklenmektedir. Böyle durumlarda çıktı yönelimi daha mantıklıdır. Temelde karar vericinin hangi noktaya odaklanması gerektiği ile ilgilidir (Coeli vd, 2005: 180).

Üçüncü yönelim olan yönelimsizliği toplamsal model ve aylak temelli model temsil etmektedir. Bu modeller, aynı anda hem girdi fazlalıklarını hem de çıktı eksikliklerini maksimize ederek iki amacı da sağlamayı hedefler (Cooper, 2006: 105). VZA'nın avantajlarından birisi de endüstrinin şartlarına göre uygun yönelim imkânını tanınmasıdır (Osei-Bryson ve Ngwenyama, 2014: 142).

Literatürde etkinlik genellikle VZA ve SSA yöntemleriyle analiz edilmektedir. SSA yönteminin VZA'ya görece olarak temel avantajları gürültü bileşenini göz önünde bulundurması ve hipotez testlerine imkân tanıyabilmesi gösterilebilir. SSA'nın dezavantajları ise etkinsizlik terimi için dağılımsal yaklaşım gerektirmesi ve üretim fonksiyonu için fonksiyonel yapıya ihtiyaç duyması gösterilebilir (Coelli vd, 2005: 312).

2.3.1.1 CCR Modeli

CCR modeli, üretim olanaklarının girdideki oransal artışın çıktıda oransal artışa sebep olacağını belirten ölçeğe göre sabit getiri varsayımına dayanan klasik bir VZA yöntemidir (Marchetti ve Wanke, 2017: 31). Charnes, Cooper ve Rhodes tarafından ilk kez 1978 yılında ortaya atılan ve sonrasında baş harflerinin kısaltılmasıyla CCR modeli olarak bilinen model en temel şekilde çıktıların ağırlıklı toplamının girdilerin ağırlıklı toplamına oranlanmasıyla elde edilmektedir (Osei-Bryson ve Ngwenyama, 2014: 140). CCR modelinde bütün KVB'ler için sanal girdi ve sanal çıktıları, ağırlıklar (v_i) ve (u_r) yardımıyla oluşturularak etkinlik ölçülmektedir (Cooper vd, 2006: 21).

$$\text{Sanal Girdi} = v_1x_{10} + \dots + u_mx_{m0} \quad (2)$$

$$\text{Sanal Çıktı} = u_1y_{10} + \dots + u_sy_{s0} \quad (3)$$

Bu modelde Sanal çıktı/ Sanal girdi oranı maksimize edilerek ağırlık belirlenmek amaçlanmaktadır. Optimal ağırlıklar KVB'den KVB'ye değişkenlik gösterebilmektedir. Bu sebeple ağırlıklar VZA'da önceden belirlenmek yerine veri üzerinden elde edilmektedir.

Girdi yönlü oran şeklinde ele alınan CCR modeline ise Eşitlik (4-6)'da yer verilmektedir (Cooper vd. 2006: 23):

$$\max h_0 = \frac{\sum_{r=1}^s u_r y_{r0}}{\sum_{i=1}^m v_i x_{i0}} \quad (4)$$

Kısıtlar;

$$\frac{\sum_{r=1}^s u_r y_{rj}}{\sum_{i=1}^m v_i x_{i0}} \leq 1 \quad (j = 1, 2, \dots, n) \quad (5)$$

$$u_r, v_i \geq 0; \quad r = 1, \dots, s \quad i = 1, \dots, m \quad (6)$$

Burada; y_{rj} , x_{ij} çıktı ve girdileri u_r, v_i değişken ağırlıklarını ifade etmektedir. Kısıtlar sanal çıktının sanal girdiye oranının 1'i geçmemesini ifade etmektedir. Amaç ise incelenen KVB'nin oranının maksimize edecek ağırlığı belirlemektir. Bu kısıt sayesinde h_0 değeri en fazla 1 değerini almaktadır. CCR modeli, çok çıktı ve çok girdili bir yapının tek girdi ve tek çıktı bir yapıya indirgenmesi olarak ifade edilebilir. Eşitlik (1-3)'de girdi yönlü oran formülü CCR modeli ele alınmaktadır. Eşitlik (1-3)'de ele alınan VZA modelinin sınırsız sayıda çözümü vardır. Bu problemten kaçınmak için, model doğrusal programlama modeli haline getirilmektedir (Hwang vd. 2016: 123).

$$\max h_0 = \sum_{r=1}^s u_r y_{r0} \quad (7)$$

Kısıtlar;

$$\sum_{r=1}^s u_r y_{rj} - \sum_{i=1}^m v_i x_{ij} \leq 0 \quad (8)$$

$$\sum_{i=1}^m v_i x_{i0} = 1 \quad (9)$$

$$u_r, v_i \geq \varepsilon \geq 0 \quad (10)$$

Girdi veya çıktının etkinlik hesaplamasında göz ardı edilmesini önlemek için u ve v ağırlıklarına ε şeklinde 0'dan büyük pozitif çok küçük değerler verilmektedir.

Çıktı yönlü CCR modelinin kesirsel formu ise şu şekilde ifade edilebilir (Cooper vd. 2011).

$$\min h_0 = \frac{\sum_{r=1}^s v_i x_{i0}}{\sum_{i=1}^m u_r y_{r0}} \quad (11)$$

Kısıtlar;

$$\frac{\sum_{r=1}^s v_i x_{ij}}{\sum_{i=1}^m u_r y_{rj}} \leq 1 \quad (j = 1, 2, \dots, n) \quad (12)$$

$$u_r v_i \geq 0; \quad r = 1, \dots, s \quad i = 1, \dots, m \quad (13)$$

Çıktı yönlü CCR modelinin doğrusal programlama şekli Eşitlik (14-17)'de yer verilmiştir (Hwang vd. 2016: 124).

$$\min h_0 = \sum_{i=1}^m v_i x_{i0} \quad (14)$$

Kısıtlar;

$$\sum_{i=1}^m v_i x_{ij} - \sum_{r=1}^s u_r y_{rj} \geq 0 \quad (15)$$

$$\sum_{i=1}^m u_r y_{r0} = 1 \quad (16)$$

$$u_r, v_i \geq \varepsilon \geq 0 \quad (17)$$

CCR modelinin dual formu ise Eşitlik (18-20)'de gösterildiği gibidir (Cooper vd, 2006: 69).

$$\min h_0 \quad (18)$$

Kısıtlar;

$$h_0 x_{i0} = \sum_{j=1}^n x_{ij} \lambda_j + s_i^- \quad i = 1, \dots, m \quad (19)$$

$$y r_0 = \sum_{j=1}^n y_{rj} \lambda_j - s_r^+ \quad r = 1, \dots, s \quad (20)$$

Charnes Cooper ve Rhodes tarafından ortaya atılan geleneksel CCR modeli, h_0 skoru aracılığıyla teknik etkinliği hesaplamıştır. Bir KVB eğer h_0 skoru 1'e eşitse ve bütün aylaklar 0'a eşitse etkindir. Etkinlik skoru teknik etkinsizliği ortaya koyarken aylak değişkenler tahsis ve yönetsel eksikliklerden kaynaklanan teknik etkinsizliği ifade etmektedir. Herhangi bir KVB için kesirli programlama modeli çözülerek girdi ve çıktı ağırlıkları elde edilebilmektedir (Zhao vd, 2017: 905).

2.3.1.2 BCC Modeli

Ölçeğe göre sabit getiri varsayımı bütün KVB'ler optimal ölçekte faaliyet gösterdiğinde uygundur. Ancak yasal düzenlemeler, finansal kısıtlamalar vb. sebeplerle KVB etkin olmayan ölçekte faaliyette bulunabilir. Bu durumda ölçeğe göre sabit getiri varsayımı

teknik etkinliğin ölçek etkinliğiyle karışması durumunu ortaya çıkarmaktadır. Ölçeğe göre değişken getiri özelliği, teknik etkinliğin ölçek getirisinden arındırılmış şekilde ölçüm imkânı sağlamaktadır (Coelli vd, 2005: 172). CCR modelinin etkinlik literatürüne katılmasından sonra bu alanda çeşitli çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Bu gelişim sırasında ölçeğe göre getiri durumu ele alınmıştır (Cooper vd, 2011). Banker, Charnes, Cooper 1984 yılında CCR modelinin sabit ölçeğe getiri varsayımını gevşetip artan veya azalan ölçeğe getiri durumunu getirmişlerdir. CCR modeline, ek bir konveksite kısıtı eklemişlerdir ve böylelikle daha esnek bir model elde etmişlerdir (Osei-Bryson ve Ngwenyama, 2014: 143). BCC modeli saf teknik etkinliği ölçmektedir. Saf teknik etkinlik, yönetimin başarısını gerçekleştirme becerisini ifade etmektedir (Marchetti ve Wanke, 2017: 32). Bir KVB, CCR modeline göre etkin olarak kabul edilmesi yalnızca ölçek ve teknik etkinliğe sahip olması durumunda mümkündür. BCC modelinde ise bir KVB'nin etkin olması teknik etkin olması ile mümkündür. Bir KVB CCR modelinde etkin ise BCC modelinde de etkin olacaktır. Ancak tam tersi her zaman geçerli bir durum değildir BCC modelinin kullanılmasında en uygun durum, yeni ürün tanıtımı ve ya optimal üretim kapasitesinin üstünde üretimde yapma vb. durumlarda uygundur (Osei-Bryson ve Ngwenyama, 2014: 144).

n KVB ($j = 1, 2, \dots, n$)'nin m ($i = 1, 2, \dots, m$) adet girdiyi s ($r = 1, 2, \dots, s$) adet çıktı üretmek için tükettiğini varsayalım. Girdi yönlü BCC modeli aşağıdaki doğrusal programlama modeli çözülerek elde edilmektedir (Toloo ve Nalchigar, 2009: 598).

$$\max u_r y_{rj} - u_0 \quad (21)$$

Kısıtlar;

$$\sum_{i=1}^m w_i x_{io} = 1 \quad (22)$$

$$\sum_{r=1}^s u_r y_{rj} - u_0 - \sum_{i=1}^m w_i x_{ij} \leq 0 \quad j=1, 2, \dots, n \quad (23)$$

$$w_i, u_r \geq \varepsilon \geq 0 \quad (24)$$

Burada, x_{ij} ve y_{rj} j. KVB'nin girdi ve çıktılarıdır, w_i, u_r girdi ve çıktı ağırlıklarıdır. x_{io} ve y_{ro} KVB₀'ın girdi ve çıktılarıdır. ε hesaplama kolaylığı için kullanılan 0'dan büyük oldukça küçük bir sayıdır.

Girdi yönlü BCC modelinin kesirsel şekli Eşitlik (25-27)'de verilmiştir (de Mello vd, 2013: 2).

$$\max \frac{\sum_{r=1}^s \mu_{ro} y_{ro} + \mu_{*0}}{\sum_{i=1}^m v_{io} x_{io}} \quad (25)$$

Kısıtlar;

$$\frac{\sum_{r=1}^s \mu_{ro} y_{rj} + \mu_{*0}}{\sum_{i=1}^m v_{io} x_{ij}} \leq 1 \quad (26)$$

$$v_{io}, \mu_{ro} \geq 0 \quad (27)$$

BCC modelinin doğrusal programlama şekli aşağıdaki gibidir (de Mello vd, 2013: 2).

$$\max \sum_{r=1}^s \mu_{ro} y_{rj} + \mu_{*0} \quad (28)$$

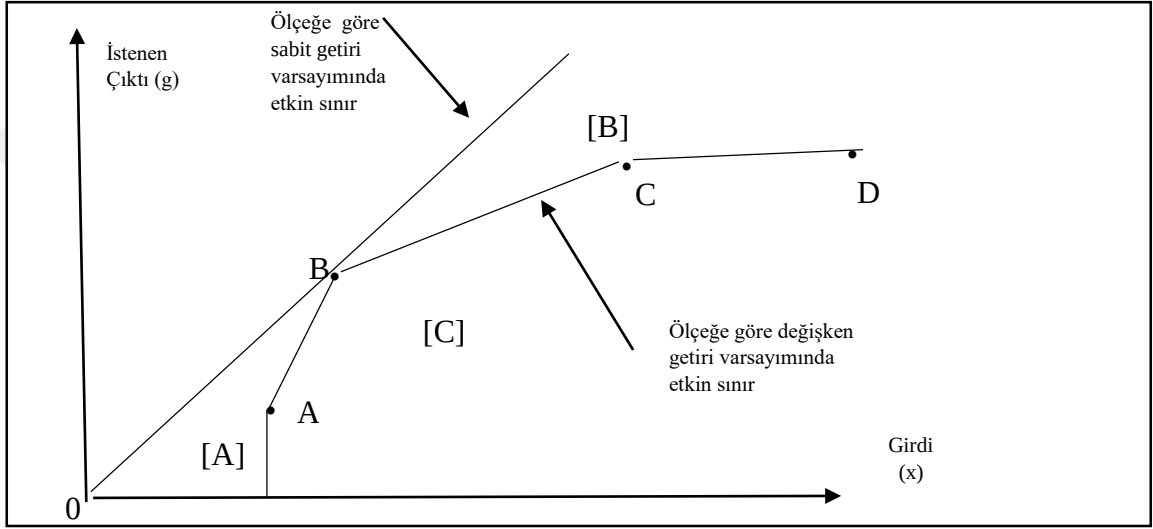
Kısıtlar;

$$\sum_{i=1}^m v_{io} x_{ij} = 1 \quad (29)$$

$$\sum_{r=1}^m \mu_{ro} y_{rj} + \mu_{*0} - \sum_{i=1}^m v_{io} x_{ij} \leq 0 \quad (30)$$

$$v_i, \mu_{ro} \geq 0 \quad (31)$$

μ_{ro}, v_i , sırasıyla çıktı ve girdi çarpanları ve model karar değişkenleri, y_{rj} KVB j'nin r. çıktısı, x_{ij} KVB j'nin i. girdisi, μ_{*0} ise ölçeğe göre getiriye ifade eden değişkendir. BCC modelinde dahil edilen konveksite kısıtı sebebiyle etkin sınır konveks bir yapı haline dönüşmektedir. Konveksite kısıtı sayesinde etkin olmayan bir KVB'nin benzer ölçekteki bir KVB ile kıyaslanmasına imkân tanımaktadır. CCR modelinde konveksite kısıtı yer almadığı için bir KVB kendisinden oldukça büyük ya da küçük olabilmektedir (Coelli vd, 2005: 172). Şekil 11'de sırasıyla ölçeğe göre sabit ve değişken getiri varsayımını temsil eden CCR ve BCC modellerinde etkin sınır arasındaki farklar gösterilmektedir.



Kaynak: (Sueyoshi ve Goto, 2018).

Şekil 11. Ölçeğe göre Sabit ve Değişken Getiri Varsayımında Etkin Sınır

İlk üretim olanakları kümesi, ölçeğe göre sabit getiri varsayımını ifade ederken ikinci sınır ölçeğe göre değişken getiri varsayımı altında etkin sınırı ifade etmektedir. İki etkin sınır arasındaki temel fark, ölçeğe göre değişken varsayımındaki etkin sınıra $\sum_{j=1}^n \lambda_j = 1$ konveksite kısıtının modele dahil edilmesinden kaynaklanmaktadır. Ölçeğe göre değişken getiri durumundaki sınır [C] ile gösterilen alanı kapsarken ölçeğe göre sabit getiri varsayımı altındaki sınır [A], [B] ve [C] ile gösterilen alanların birleşiminden oluşmaktadır (Sueyoshi ve Goto, 2018: 79).

2.3.1.3 Ölçek Etkinliği

Bir KVB'nin ölçek etkinliği, CCR ve BCC modellerinin etkinlik sonuçlarının birbirine oranlanmasıyla elde edilmektedir (Toma vd. 2015: 706):

$$\text{Ölçek Etkinliği} = \frac{\text{Teknik etkinlik}}{\text{Saf teknik etkinlik}} \quad (32)$$

CCR modeli yetersiz teknoloji ve uygunsuz ölçeğin etkisi belirlenebilirken BCC modelinde yalnızca yetersiz teknoloji belirlenebilmektedir. CCR ve BCC modellerinden elde edilen etkinlik sonuçlar kıyaslanarak KVB'lerden kaynaklanan etkinsiz ölçek belirlenebilmektedir. Kaynakların belirlenen etkinsizliği sayesinde KVB'lerin performansının geliştirilmesine imkân tanınmaktadır (Cook ve Zhu, 2017: 120). Ölçek etkinliğinin eksigi ise elde edilen değerin artan veya azalan ölçeğe göre getiri durumu hakkında fikir vermemesidir (Coelli vd, 2002: 613).

2.4 Diğer VZA Modelleri

Temel VZA modelleri dışında çeşitli VZA modelleri varyasyonları bulunmaktadır. Zaman içinde etkinlik değişimini hesaplayan modeller, istenmeyen çıktının modele dahil edilmesi, girdi ve çıktının kullanılabilirliği ile ilgili modellerle farklılaşmaktadır (Hwang vd, 2016: 189). Hangi VZA modeli uygulanması gerektiği, araştırma konusunun kapsamına, amacına ve kullandıkları varsayımlara dayalı olarak elde etmek istedikleri sonuçlara göre değişkenlik göstermektedir.

2.4.1 Aylak Tabanlı VZA Modeli

Aynı anda istenen ve istenmeyen çıktı faktörlerini içeren VZA modelleme yaklaşımlarıyla etkinliği tutarlı bir şekilde tahmin etmek araştırmacıların ilgisini çeken konulardan birisi olmuştur (Amowine vd. 2020). VZA'da temelde radyal ve radyal olmayan olmak üzere iki tür bulunmaktadır. Radyal modeller, girdi ve çıktıda orantısal değişimi hesaplamaktadır. Geleneksel VZA modeli, bütün girdi ve çıktılara mahsus olan orantısal artış ya da azalışları ifade etmektedir. Ancak gerçek üretim sürecinde bütün girdi ya da çıktılar orantısal olarak değişmemektedir. Örneğin bazı girdiler birbirinin ikamesi olabilir ve orantısal olarak değişmeyebilir. Radyal modellerin bir diğer eksikliği ise etkinlik skorunu

raporlarken aylakları göz ardı etmesidir. Yönetimsel etkinliği değerlendirirken bu aylakların etkisi önemli olursa radyal yaklaşımlar yanlış sonuçlara yol açabilir. Diğer taraftan, radyal olmayan yani Tone'nin 2001 yılında ortaya koyduğu aylak tabanlı VZA modeli, toplamsal modelin devamı olarak girdi ve çıktındaki oransal değişimi bir kenara koyup doğrudan aylakları temel almaktadır. Bu etkinlik ölçümünde, girdideki azalışın ve çıktıda gerçekleşecek artışın orantısal olma zorunluluğunu ortadan kaldıran radyal olmayan ölçüm yöntemi kullanılmaktadır. Bu yöntemde istenen çıktıların daha fazla elde edilmesi amaçlanırlarken aynı zamanda istenmeyen çıktılarının da minimize edildiği bir denklem yapısını ortaya koyabilmektedir. Girdi veya çıktının birden çok yönü varsa değerlendirme KVB'lerinin, radyal VZA modeli açısının kullanılması verimlilik ölçüm sonuçlarında sapmalara neden olabilir (Shang vd. 2020).

n KVB, m girdi $X = x_{ij} \in Rm * n$ ve s çıktıdan $Y = y_{ij} \in Rs * n$ oluşan aylak temelli VZA modeli Eşitlik (32-35)'de gösterilmiştir (Kumar vd. 2010: 1750 ve Tone, 2017: 11; Amowine vd. 2020).

$$\min p = \frac{1 - \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m S_i^- / x_{io}}{1 + \frac{1}{s} \sum_{i=1}^s S_i^+ / y_{io}} \quad (38)$$

Kısıtlar;

$$X\lambda + s^- = x_0 \quad (39)$$

$$Y\lambda - s^+ = y_0 \quad (40)$$

$$\lambda, s^-, s^+ \geq 0 \quad (41)$$

Bu modelde bir KVB $p=1$ ve $s^- = 0$ $s^+ = 0$ olduğunda etkin olmaktadır. Ancak bazı durumlarda istenmeyen çıktının, istenen çıktının yan ürünü olarak ortaya çıkması kaçınılmaz bir durumdur (Zhang vd, 2016: 219). Doğrudan girdi ve çıktı aylakları ile ilgilenen aylak tabanlı VZA modelinde, toplamsal modelin aksine etkinlik skoru 0 ile 1 arasındadır (Du vd, 2010: 694). Aylak tabanlı VZA yöntemi, klasik VZA yöntemine kıyasla istenmeyen çıktıyı modellemede daha uygundur. Aylak tabanlı yaklaşımın ilk versiyonu istenmeyen çıktıyı

içermemektedir. Bu eksikliği ortadan kaldırmak adına, Tone (2004) çalışmasında aylak tabanlı VZA modeline istenmeyen çıktıyı dahil etmiştir. (Cecchini vd. 2018: 896).

Literatürde istenmeyen çıktının modellenmesinde çeşitli yaklaşımlar bulunmaktadır. Bu sınıflandırmalardan biri, istenmeyen çıktıyı girdi olarak kabul etmektir. Ancak bu sınıflandırma üretim yapısını tam olarak ortaya koyamamaktadır (Zhang vd. 2016: 219). Diğer bir sınıflandırma ise güçlü ve zayıf kullanılabilirlik olarak adlandırılan sınıflandırmadır. VZA yöntemi çevre ve enerji etkinliği konularında sıklıkla kullanılmaktadır. Bu metodolojide çoklu girdi ve çıktı kolaylıkla modellenebilmektedir. Ancak, geleneksel VZA yöntemleri araştırılan KVB'lerin etkinliğini statik olarak araştırmaktadır. Ancak, sadece statik analiz teknikleri kullanıldığında analiz sonuçları sapmalı ve tutarsız olabilmektedir. Çünkü kullanılan modellerde CO₂ emisyonu vb. istenmeyen çıktılar modele dahil edilmeyip sadece GSYH gibi istenen çıktılar modelde yer almaktadır. Spesifik olarak, GSYH'nin daha yüksek olması daha iyiye anlamına gelmektedir. Bu kapsamda, bazı çalışmalarda CO₂ emisyonu gibi istenmeyen çıktılar girdi olarak da modele dahil edildiği görülmektedir. Ancak, araştırmacılar bu yaklaşımın doğru olmadığını ifade etmektedir. Bu kapsamda, istenmeyen çıktılar modele dahil edilmesi için kullanılan en uygun yaklaşımın aylak temelli VZA yaklaşımı olduğu ve önceki çalışmalarda gerçekleştirilen analizlerde sağlamlığının kanıtlandığı görülmektedir (Amowine vd. 2020). Geleneksel VZA yönteminin aksine aylak temelli VZA yaklaşımı, hem girdi hem de çıktı perspektifinden analizi gerçekleştirmektedir (Sun ve Huang, 2021). Färe vd, (2007) çalışmalarında istenmeyen çıktının mevcut olduğu model aşağıdaki gibi sunulmuştur:

$$\max \beta \quad (42)$$

$$s. t \sum_{j=1}^n \lambda_j x_{ij} \leq x_{i0} \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (43)$$

$$\sum_{j=1}^n \lambda_j y_{ij} \geq y_{i0}(1 + \beta) \quad i = 1, 2, \dots, s \quad (44)$$

$$\sum_{j=1}^n \lambda_j u_{ij} = u_{i0}(1 - \beta) \quad i = 1, 2, \dots, k \quad (45)$$

$$\sum_{j=1}^n \lambda_j = 1 \quad (46)$$

$$\lambda, \beta \geq 0$$

Burada; x_{ij} , y_{ij} , u_{ij} sırasıyla girdi, istenen çıktı ve istenmeyen çıktıyı ifade etmektedir. λ ağırlık iken m,s,k,n sırasıyla girdi, istenen çıktı, istenmeyen çıktı ve KVB sayılarını göstermektedir. β ise elde edilebilecek büyüme oranını göstermektedir. β değerinin maksimize edilmesi en yüksek miktarda artırabilir istenen çıktıyı ve azaltılabilir istenmeyen çıktıyı göstermektedir. Eşitlik (42-46) girdi ve istenmeyen çıktıların artmaması ve istenen çıktının azalmaması gerektiğini ifade etmektedir. Ancak Färe vd, (2007) modelinin iki kısıtlılığı bulunmaktadır. İlki model girdi ve çıktı aylaklarını göz önünde bulundurmamaktadır. Aylaklar yöneticilerin performansını artırmada önemli bilgiler verebilmektedir. İkinci olarak, etkinliği değerlendirirken modelin yapısı KVB'lerin faaliyet yapısını ortaya koyan ölçüye göre düşünülmemiştir. Birçok KVB farklı bölümlerden oluşmaktadır ve toplam etkinliği belirlemede bu bölümlerin önemi bulunmaktadır (Cui and Li, 2019: 1470).

Temel aylak tabanlı yaklaşım ile istenmeyen çıktılı etkinlik modelinin bütünleştirilmesiyle elde edilen zayıf kullanılabilirlik özellikli aylak tabanlı model aşağıda belirtilmiştir (Cui and Li, 2019: 1470):

$$\theta^* = \min \frac{1 - \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \frac{\bar{s}_{i0}}{x_{i0}}}{1 + \beta + \frac{1}{s} \sum_{r=1}^s \frac{s_{r0}^+}{y_{r0}}} \quad (47)$$

$$s. t. x_{i0} = \sum_{j=1}^n \lambda_j x_{ij} + s_{i0}^-, \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (48)$$

$$(1 + \beta) y_{r0} = \sum_{j=1}^n \lambda_j x_{ij} - s_{r0}^+, \quad r = 1, 2, \dots, s \quad (49)$$

$$(1 - \beta) u_{k0} = \sum_{j=1}^n \lambda_j u_{kj}, \quad k = 1, 2, \dots, K \quad (50)$$

$$\sum_{j=1}^n \lambda_j = 1 \quad (51)$$

$$\lambda, s^-, s^+, \beta \geq 0 \quad (52)$$

Bu modelde, x_{ij}, y_{rj}, u_{kj} j. KVB'nin i. girdi, r. istenen çıktı ve k. istenmeyen çıktısını ifade etmektedir. n, m, s, K ve n girdi, istenen çıktı, istenmeyen çıktı ve KVB'lerdir. s_i^- ve s_r^+ i. girdi ve r. çıktı için aylakları ifade etmektedir. λ ise ağırlığı ifade etmektedir. Modelde β parametresi uygulanabilir büyümeyi göstermektedir. Daha yüksek β artırılabilir istenen çıktı seviyesini ve azaltılabilir istenmeyen çıktı düzeyini ifade etmektedir.

2.5. VZA'nın Temel Varsayımları

VZA'nın en temel varsayımlarından birisi, örneklemdeki KVB'lerin fonksiyonel benzerliğidir. Bu varsayım, KVB'lerin göreceli etkinliğini analiz etmek için girdi kullanımları ve çıktı üretimi benzer olmalıdır. VZA'nın diğer bir varsayımı ise örneklemdeki KVB'lerin kaynaklara ve mevcut teknolojiye erişim imkânının birbirine yakın olmasıdır (Osei-Bryson ve Ngwenyama, 2014: 142). VZA etkinliği göreceli olarak ölçtüğü için çok az KVB ile analiz gerçekleştirmek çoğu KVB'nin etkin olmasına neden olacaktır. VZA'da anlamlı sonuç elde edebilmek amacıyla kullanılan genel KVB sayısı kuralı şu şekildedir (Golany ve Roll, 1989):

$$n \geq \max\{m \times s, 2(m + s)\} \quad (59)$$

Burada; m,s ve n sırasıyla girdi, çıktı ve KVB sayılarıdır. VZA'yı kullanırken uygun sayıda KVB ile yapılan analizlerde faydalı sonuçlar elde edilebilmektedir.

2.6 Çok Kriterli Karar Verme Yöntemleri

Karar alma ve alınan kararın analiz edilmesi insanlık tarihinin ilk dönemlerine kadar uzanmaktadır. Eski dönemlerde karar alma ve analiz günümüzde geliştiği kadar gelişmemiş ve bilimsel olmasa da eski bir tarihi bulunmaktadır. Çok Kriterli Karar Verme (ÇKKV), karar biliminin en bilinen uygulama alanlarından birisidir. Karar analizinde karar vericiler zamanla sınırlı sayıda kriter ve alternatifle mücadele ederken zamanla karar verirken çok sayıda kriter

ve alternatifi göz önünde bulundurmak durumunda kalmışlardır. Bu sebeple, ÇKKV yöntemleri karar bilimi içerisinde hızla gelişen uygulama alanlarından bir tanesi olmuştur (Triantaphyllou, 2000: 1).

ÇKKV modelleri, nihai çıktılarının birkaç karar faktörü etkilendiği sorunları ve sistemleri ele almak için kullanılabilecek karmaşık karar verme araçlarıdır. ÇKKV modelleri temel olarak kriterlerin ağırlıklarını belirlemek ve alternatifleri belirlenen kriterlere dayanarak sıralamak üzere odaklanmış yöntemlerdir (Yazdani vd. 2020). ÇKKV yöntemleri birbiriyle uyumsuzluk gösteren birden fazla kıstas, amaç ve hedefin olduğu ortamda seçim, sıralama ve sınıflandırma durumlarında kullanılan yöntemlerdir. ÇKKV yöntemleri, çoklu ve genellikle çatışan kriterler söz konusu olduğunda uygulanabilir alternatifler kümesinden mümkün olan en iyi alternatifin seçilmesi mantığına dayanır. ÇKKV yöntemleri, amaçları belirler, amaçları ölçecek kriterleri seçer, alternatifleri tanımlar, kriterlerin ölçeğini ölçülebilir birimlere dönüştürür ve göreceli önem belirten kriter ağırlıkları belirlenir. Son olarak alternatiflerin sıralanması ve seçilmesi sürecine dayanmaktadır. Karar verme süreci sırasında, amaçlar belirli ya da bulanık, karmaşık hatta çelişen durumda olabilir. Karar verme problemlerinin bahsedilen sorunlarla mücadele etmede başarılı oldukları için etkili yöntemler oldukları savunulmaktadır (Lee ve Yang, 2018: 8). ÇKKV yöntemleri karar vericilerin kişisel karar verme sürecine destek olmak için geliştirilmiş yöntemlerdir. ÇKKV yöntemleri karar vericilere uzlaşmacı çözümün sağlanmasına imkân tanımaktadır. Sınıflandırma, sıralama ve seçim problemleri genellikle çeşitli kriterleri içerdiğinden karmaşık bir yapıdır. Bu tür problemler hassas karar çözüm sürecini gerektirmektedir (Ishizaka ve Nemery, 2013: 2).

ÇKKV yöntemlerinin tarihçesinde en önemli tarih 2. Dünya savaşı yıllarına denk gelmektedir. Savaş yıllarında Rus hükümeti kaynakların optimal dağılımı için bir mühendis görevlendirdi. Yapılan çalışmalar sonucu, Rus ordusunun savaşı kazanmasına imkan veren

ve k t kaynakların optimal dağılımında etkili olan doğrusal programlama (DP) yöntemi ortaya çıkmıştır. DP yöntemi, rafineri, yiyecek üretimi, ulaşım ağları, kişisel görevlendirmeler gibi çok farklı endüstriler tarafından sıklıkla kullanılmaya başlanmıştır. Oldukça popüler olan DP yönteminin önemli bir eksikliği bulunmaktadır. DP yöntemi, istenildiği kadar kriterle çalışabilmesine rağmen aynı anda sadece bir amacı gerçekleştirilmesine imkân tanımaktadır. Projelerin aynı anda farklı amaçlarla mücadele etmesi gerektiğinden DP yöntemi, gerçeklik bakımından eksik kalmaktadır. Ayrıca, DP yöntemi, tamamen objektif veri ve sonuç arayıp karar verme sürecinin sübjektif yanını göz ardı etmektedir. Bu sebeple, araştırmacılar optimallik arayışı yerine uzlaşmacı çözüm aramayı seçmişlerdir. Böylelikle sadece en iyi alternatif seçilmekle kalmayıp tercih sıralamasına da imkân tanımış olmaktadır. Tercih sıralamasının yapılmasıyla olası bir dışsal değişkenin değişmesi durumunda diğer uygun olan alternatifler belirlenebilmektedir. Bu  alışmalar, birçok alternatifin birçok kriterin uzlaşmasına tabi olduğu ÇKKV yöntemlerin ortaya çıkmasına imkân sağlamıştır. İlk ÇKKV yöntemi olan Elimination Et Choix Traduisant la R alite (ELECTRE) yöntemi karar verme sürecinde sıralama kategorisinde yer almaktadır (Munier vd, 2019: 5).

Literatürde oldukça fazla sayıda ÇKKV yöntemi bulunmaktadır. Bu yöntemler, birbirlerinden gerekli olan ek bilgi ve metodoloji, matematiksel özellikler bakımından farklılık göstermektedir. Ancak mutlak anlamda en iyi ÇKKV yönteminin literatürde yer almadığı araştırmacılar tarafından kabul edilmektedir. Her yöntemin kendine ait özellikleri, sınırlılıkları, özellikleri ve bakış a ları vardır (Ishizaka ve Nemery, 2013: 6). Yöntemlerin, hiçbiri bütün ÇKKV ortamlarında uygun olmadığı için karmaşık süreçlerde mücadele edebilmek için hibrit yaklaşımlar kullanılabilmektedir (Lee ve Yang, 2018: 8). ÇKKV yöntemlerinin ilk ortaya çıktığı 1960 yıllarından itibaren araştırmacılar farklı ÇKKV

yöntemleri kullanarak farklı sonuçlar elde etmişlerdir. Bu farklılığın ortaya çıkmasında ise karar vericinin tercihlerindeki sübjektifliklerin önemli payı bulunmaktadır. Ayrıca kriter ağırlıklarının belirlenmesinde kullanılan yöntemlerden kaynaklanan kriter ağırlık farklılıkları bulunmaktadır (Munier vd, 2019). Bu sebeple karar verme sürecinde etkin rol oynayan karar vericinin kriterleri seçerken, analizde kullanılacak yöntemi belirlerken, analizde elde edilen sonuçları yorumlarken uzmanlığına ihtiyaç duyulmaktadır (Munier vd, 2019). Bazı araştırmacılar ÇKKV analizinin birden fazla yöntemle çözülmesinin daha uygun bir yaklaşım olacağını belirtmektedirler (Munier vd, 2019).

ÇKKV problemlerinin çözüm süreci şu aşamalardan oluşmaktadır (Zardari vd, 2015: 8):

- ÇKKV probleminin ve amaçlarının belirlenmesi
- Amaçları karşılayacak alternatiflerin listelenmesi ve tanımlanması
- Alternatiflerin performansını ölçmek için gerekli olan kriter, özellik, performans göstergelerinin ölçülmesi
- Veri toplama çalışmasının gerçekleştirilmesi ve kriterlerin değerlendirilmesi
- Karar matrisinin oluşturulması
- Objektif veya sübjektif yöntemler kullanarak ağırlıkların belirlenmesi
- Alternatiflerin ÇKKV yöntemi ile sıralanması
- Kararın çıkar gruplarıyla görüşülerek verilmesi

Literatürde karar problemleri seçim, sınıflandırma, sıralama ve tanımlama olmak üzere 4 ana başlık altında ele alınmaktadır (Ishizaka ve Nemery, 2013: 3):

- 1) **Seçim Problemleri:** Bu tür problemlerde amaç en iyi seçeneği belirlemek ya da grup seçeneklerini daha az seviyede seçeneğe indirgemek.
- 2) **Sınıflandırma Problemleri:** Seçenekler, tanımlayıcı, organizasyonel ve tahmin edici sebeplerle aynı özellik taşıyan gruplara ayrılmaktadır.
- 3) **Sıralama Problemleri:** Seçenekler, ikili kıyaslama ya da çeşitli yöntemler yoluyla en iyiden en kötüye doğru sıralanmaktadır.
- 4) **Tanımlama Problemleri:** Bu tür problemlerin temel amacı, seçenekleri ve sonuçlarını tanımlamaktır. Bu tür problemler, genellikle karar problemlerinin özelliklerini belirlemektir.

Yukarıda ele alınan karar problemlerinin çözümü için ele alınan ÇKKV yöntemlerine Tablo 2’de yer verilmiştir.

Tablo 2. ÇKKV Problemleri ve Yöntemler

Seçim Problemleri	Sıralama Problemleri	Sınıflandırma Problemleri	Tanımlama Problemleri
AHP	AHP	AHPSort	GAIA
ANP	ANP	UTADIS	
MAUT	MAUT	ELECTRE-Tri	
MACBETH	MACBETH		
PROMETHEE	PROMETHEE		
ELECTRE I	ELECTRE III		
TOPSIS	TOPSIS		
Hedef Programlama			

Literatürde yer alan bu ÇKKV problemleri, ihtiyaç duyulan nicelik, ihtiyaç duyulan ek bilgi, metodoloji, kullanılan yazılımlar ve matematiksel özellikler vb. özelliklerden ötürü farklılaşmaktadır (Lee ve Yang, 2018: 8). ÇKKV yöntemleri en genel ifadeyle üç temel aşamadan oluşmaktadır. İlk olarak, seçime söz konusu olan alternatifler ve kriterler belirlenmektedir. İkinci olarak, kriterlerin nihai seçimi nasıl etkilediğini belirlemek önemlidir. Yani, kriterlere atfedilen ağırlıkların tutarlı olması gerekmektedir. Son aşamada ise, sunulan alternatiflerin seçilen yöntemle sıralama yapıp performans analizi gerçekleştirilmektedir. ÇKKV yöntemlerini kullanırken dikkat edilmesi gereken en önemli nokta, uygun yöntemin seçilmesidir. Karar verme sürecinde amaçlara en uygun yöntemin seçilmesi, değerlendirme sürecinin etkinliğinde önemli rol oynamaktadır. Her bir yöntem belirli durumda daha uygundur. Uygun ÇKKV yöntemini bulmak için bazı değişkenlerin göz önünde bulundurulması gerekmektedir. Tablo 3’de ÇKKV yöntemleri kullanırken göz önünde bulundurulması gereken faktörlere yer verilmiştir (Haroun vd, 2019: 469-470).

Tablo 3. ÇKKV Yönteminin Uygunluğunu Belirleyen Değişkenler

n	Değişkenler	Tanımları
1	Değerlendirme Elemanlarının Sayısı	Kriterleri, alt kriterleri ve alternatifleri içermektedir. Genellikle problemde sorumlu karar alıcı tarafından belirlenmektedir.
2	Göstergelerin Tipolojisi	Göstergelerin tipolojisi çözülecek problemin yapısına göre değişkenlik

göstermektedir.

Göstergeler, hem birim olarak ölçülebilecek yapıda olan niceliksel hem de değerlendirmeye tabi olan niteliksel yapıdaki göstergelerden oluşabilir.

3

ÇKKV Probleminin Türü

ÇKKV problemleri, seçim, sıralama, sınıflandırma ve tanımlama problemleri şeklinde gruplandırılmaktadır.

4

Çözüm Yaklaşımı

Çözüm yaklaşımları, tam toplam yaklaşımı, sıralama yaklaşımı ve referans nokta yaklaşımı olmak üzere 3 başlıkta ele alınmaktadır.

Belirli karar problemlerini çözmek için literatürde çok fazla ÇKKV yöntemi olduğu göz önünde bulundurulduğunda analiz için uygun yöntemi seçebilmek zor bir iştir. Uygun ÇKKV yöntemini belirleyebilmek için çeşitli yollar bulunmaktadır. Eğer fayda fonksiyonu biliniyorsa MAUT yöntemi uygun bir yaklaşımdır. Diğer bir yöntem ise kriter ve seçenekler arasında ikili kıyaslamalar yapmaktır. AHP ve MACBETH yöntemleri ikili kıyaslama durumunun mümkün olduğu koşullarda uygun olan yöntemlerdir. Diğer bir alternatif yol ise anahtar parametreleri belirlemektir. PROMETHEE ve ELECTRE yöntemleri kayıtsızlık, tercih ve veto eşiği gibi parametrelere ihtiyaç duymaktadır. Karar verici, fayda ve maliyet kriterlerini belirleyebiliyorsa TOPSIS yöntemi uygulanabilir (Ishizaka ve Nemery, 2013: 6).

Literatürde yer alan ÇKKV yöntemlerinin bazı temel özellikleri şu şekildedir: ÇKKV yöntemleri, objektifliği sağlayan sistematik ve şeffaf çözümleri sayesinde karar vericiye en uygun alternatifi sunmayı amaçlamaktadır. Literatürde ÇKKV yöntemlerine yöneltilen bazı eleştiriler ise şu şekildedir: Farklı ÇKKV yöntemleri aynı problemin çözümünde farklı sonuçlar verebilmektedir. Uygun yöntemin seçilmesi, üzerinde dikkatle durulması gereken bir noktadır. Toplama algoritmasına bağlı olarak bir kriterdeki iyi performans diğer kriterlerdeki kötü performanstan gölgelenebilir. Böyle durumlarda, yeteri düzeyde olan performans kaybedilebilmektedir. Ayrıca, problem yapılandırılmasında gerekli bir kritere yer verilmemesi problemin sonucuna olumsuz etkisi olabilmektedir. Bir diğer dikkate edilmesi gereken nokta ÇKKV problemlerinde belirsizlik durumudur (Zardari vd, 2015: 13). Belirsizlik ÇKKV problemlerinde ele alınmasında gereken önemli bir durumdur. Belirsizlik, nicelik ya da nitelik olarak kriter özellikleri yeteri düzeyde ortaya konulamadığında ortaya çıkmaktadır. Belirsizlik temelde başarısızlıktan, varsayımlardan ya da veri yetersizliğinden kaynaklanmaktadır (Lee ve Yang, 2018: 8). Hiçbir yöntem mükemmel olmadığından ve herhangi bir sorunu çözmek için mutlak olarak uygulanamayacağından, belirli bir yöntemin kesinlikle seçilmesine ilişkin literatürde gerçek bir argüman yoktur. Her yöntemin kendine has sınırlamaları ve özellikleri vardır ve verilen varsayımlara ve bakış açılarına bağlıdır. Ayrıca, herhangi bir ÇKKV problemini çözmek için belirli bir yöntem önerilmemektedir. Bazı ÇKKV yöntemleri yalnızca karar verme aşamasında nicel verileri kullanabilirken, diğer yöntemler hem niceliksel hem de niteliksel verilerle çalışabilmektedir. Şeffaflık derecesi ve hesaplama çabası gibi ÇKKV yöntemlerini farklılaştıracak başka özellikler de mevcuttur (Abdelli vd. 2020).

2.6.1 Çok Kriterli Karar Vermede Ağırlıklandırma Yöntemleri

Ağırlık parametrelerinin belirlenmesi, ÇKKV yöntemlerinin çözümünde önemli aşamalardan birisidir. Kriterlere atfedilen ağırlıklar, analizin sonucunda oldukça etkili olacağından kriterlerin ağırlıklandırılması oldukça dikkatli olunması gereken bir adımdır. ÇKKV problemlerinde ağırlıklandırma aşamasının temel amacı, kriterlere değerler atayarak göreceli önem derecelerini ortaya koyabilmektir. Bu ağırlıklar sonrasında alternatifleri değerlendirmek amacıyla kullanılmaktadır (Zardari vd, 2015: 37).

Kriter ağırlıklarının belirlenmesinde birçok yöntem bulunmaktadır. Kriterlere ağırlık atamasında kullanılabilecek en kolay yöntem kriterlere eşit ağırlık atfetmektir. Kolay olduğu için ÇKKV problemlerinde sıklıkla kullanılmıştır (Zardari vd, 2015: 23). Diğer Ağırlık belirleme yöntemleri ise sübjektif ve objektif ağırlık yöntemleridir. SMART, AHP, Delphi yöntemi gibi sübjektif ağırlıklandırma yöntemleri karar vericinin değerlendirmesine dayanmaktadır. Sübjektif yöntemlerde karar vericinin bilgi, tecrübesi analize yansıdığından özellikle kriterleri değerlendiren ağırlıklara yansıyan tercihleri ilgili elde edilen sonuçlar tartışmalı olabilmektedir. Entropi, çok amaçlı optimizasyon gibi objektif yöntemler ise tamamen ilk veri seti üzerinden matematiksel işlemlere dayanmaktadır ve karar vericinin göreceli ağırlıklar üzerinde hiçbir rolü bulunmamaktadır. Bu sayede karar vericinin hüküm vermemesiyle sübjektiflik azaltılarak ağırlıklar üzerindeki objektifliği artırılır (Liu vd, 2016b). Eğer bir ÇKKV yöntemi değerlendirme sürecinde ağırlık belirleme ihtiyacı duyuyorsa sübjektif ya da keyfi ağırlıkları kullanmak yerine objektif ağırlıklar kullanmak daha uygun olmaktadır. Kriter ağırlıkları analiz sonuçlarındaki farklılığın temel sebebini oluşturduğundan sübjektif yöntemlerin kullanımının elimine edilmesi mantıklı bir yaklaşım olarak görülmektedir (Munier vd, 2019: 206). Shannon entropi yöntemi, farklı ÇKKV

problemleri için sıklıkla uygulanan güvenilir ve veriye dayalı ağırlık belirleme modellerinden biridir (Yazdani vd. 2020).

2.6.1.1 AHP Ağırlıklandırma Yöntemi

Saaty tarafından ortaya atılan AHP yönteminde ele alınan kriter ağırlıklar hiyerarşik bir düzende ortaya koyulmaktadır (Lin ve Yang, 1996: 253). AHP yönteminin temeli ikili kıyaslamaya dayanmaktadır. Saaty ikili kıyaslama yöntemini ÇKKV alanına felsefe alanından adapte etmiştir. Saaty yöntemi matematiksel olarak geliştirmiş ve AHP yönteminin temeli haline getirmiştir. AHP yönteminde öncelikle karar verici ikili kıyaslamalara karar vermektedir. Sonrasında ikili kıyaslamaların sözel ifadelerine karşılık gelen sayısal ifadeler belirlenir. Son olarak ise sayısal ikili kıyaslamalardan öncelik matrisi türetilir (Dong vd. 2008: 229). AHP literatürde çok çeşitli alanlarda uygulanmaktadır. Kullanması kolay olan AHP yöntemi, kullanıcının sezgisel beklentisiyle eşleşen sonuçları ortaya koymaktadır. Kullanım rahatlığına rağmen, karar vericinin bilgiyi işlemesiyle elde edilen sonuçlar şeffaf olma bakımından zayıftır. Bu durum, özellikle birçok paydaşın olduğu durumlarda dezavantajlı bir durum ortaya çıkarmaktadır (Zardari vd. 2015: 18).

2.6.1.2 Entropi Kriter Ağırlıklandırma Yöntemi

Entropi kavramı ilk kez 1948 yılında Shannon tarafından ortaya atılmış ve termodinamik alanında sistemin düzensizliğini ölçmek için kullanılmıştır. Daha sonra, bunu bilgi teorisi belirsizlikle başa çıkmanın yollarından biri haline getirmek için bilgi teorisi problemlerini çözmek için uygulandı, sonrasında ise farklı disiplinlerde kullanılmaya başlanmıştır (Yang vd. 2018: 274). Entropi teorisine göre, entropi değeri ne kadar azsa, sağlanabilecek bilgi o kadar fazla olur. Bu sebepten ötürü, ilgili kritere daha yüksek ağırlık verilir (Lee ve Chang, 2018). Entropi yöntemi son dönemde sıklıkla kullanılan ağırlıklandırma yöntemlerinden birisi haline gelmiştir (Li vd, 2012: 4846). Kriterlerin

objektif ağırlıklandırmasını belirleyebilmek için aşağıdaki aşamalar takip edilmektedir (Hafezalkotob ve Hafezalkotob, 2016: 4; Vaid vd. 2022).

Aşama 1: Karar Matrisinin Oluşturulması

ÇKKV problemlerinin ilk aşaması karar verme matrisinin oluşturulmasıdır.

$$X = \begin{bmatrix} x_{01} & \dots & x_{oj} & \dots & x_{on} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{i1} & \dots & x_{ij} & \dots & x_{in} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{m1} & \dots & x_{mj} & \dots & x_{mn} \end{bmatrix} \quad (60)$$

Aşama 2: Karar Verme Birimlerinin Normalizasyonu

ÇKKV problemlerinde normalizasyon işlemi farklı birimlere sahip değişkenleri [0,1] düzlemine alabilmek için gerçekleştirilen bir adımdır.

$$R_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sum_{i=1}^m x_{ij}} \quad (61)$$

$\sum X_{ij}$ değeri, tüm alternatiflerin bir ölçüt için tüm değerleri toplanarak hesaplanır. R_{ij} normalize edilmiş değerleri göstermektedir.

Aşama 3: Kriterlere ilişkin Entropi Değerlerinin Bulunması

$$E_j = -h. \sum_{i=1}^m R_{ij} \ln R_{ij} \quad (62)$$

Burada E_j entropi değerini gösterirken $h = 1/\ln(m)$ şeklinde hesaplanır. m ise toplam alternatif sayısını göstermektedir.

Aşama 4: Entropi Kriter Ağırlıklarının Hesaplanması

$$W_j = \frac{1-e_j}{\sum_{j=1}^n (1-e_j)} \quad (63)$$

Burada $1 - e_j$ çeşitlilik derecesini gösterirken W_j entropi yöntemiyle elde edilen objektif kriter ağırlıklarını temsil etmektedir.

Entropi yönteminin temel avantajı, kullanması kolay bir yöntem olması ve yüksek ayırt etme gücüne sahiptir (Karagiannis ve Karagiannis, 2019: 2). Entropi yönteminin diğer avantajları şu şekilde sıralanabilir (Zardari vd, 2015: 65):

- Entropi yöntemi, tarafsız bir şekilde görelî kriter ağırlıklarını hesaplayabilir,
- Entropi yönteminin çatışan kriterler altında yeterli performans göstermektedir.
- Fayda ve maliyet kriterleri için niceliksel değerlendirmeye imkân tanımaktadır.
- Entropi yöntemi, ağırlıkları belirlemede bilgi değerlerini çeşitli değerlendirme kriterlerini uygun bir şekilde kullandığı için dengeleyici özelliğe sahiptir.

Entropi yönteminin dezavantajları ise şu şekilde ifade edilebilir.

- Uzman görüşünün alınması gereken noktalarda entropi yöntemi yetersiz kalabilmektedir.
- Karar vericinin tercihleri ile ilgili içeriğe sahip değildir.
- Korelasyon katsayısı veya standart sapma ile belirlenen kriter ağırlıkları entropi yöntemi ile bulunan ağırlıklardan daha kapsamlıdır.

Entropi ağırlıklandırma yöntemi bütün ÇKKV yöntemlerinde uygulanabilir. AHP, ANP gibi sübjektif ağırlıklandırma yöntemlerinden elde edilen ağırlık değerleri temelde ödünleşim değerleridir. Bu değerler, bir kriter ağırlığı değıştikçe diğerinin nasıl değışeceğini göstermektedir. Yöntem, olasılık teorisine dayanmaktadır ve belirsizlik ifadesi olan entropi değerlerinin hesaplanmasında kullanılmaktadır. Pratik bir şekilde, ağırlıkların ilk karar matrisine dayanarak hesaplanması yöntemin en önemli avantajıdır ve bu avantaj yöntemi sıklıkla karar vericiler tarafından kullanılmasına imkân tanımaktadır (Islam vd. 2022). Kriterlere eşit ağırlıklar atamak gerçekçi olmayacağından bu kapsamdaki objektif yöntemler kullanılması daha avantajlı olacaktır (Pintelon vd. 2021). Göstergenin varyasyon derecesi ne kadar büyük olursa, o kadar fazla bilgi sağlar. Bu nedenle, kapsamlı değerlendirmede oynayabileceği rol daha fazladır ve daha fazla ağırlık verilecektir (Wu vd. 2022). Sonuç olarak, sübjektif ağırlık yöntemleri kriter önemini tam olarak yansıtamamaktadır (Munier vd.

2019: 23). Yöntem, özellikle birden çok faktörün ağırlığını belirlemek için yaygın olarak araştırmacılar bu faktörlere ağırlık vermekte tereddüt ettiklerinde kullanılır (Islam vd. 2022).

2.6.2 Analiz Kapsamındaki Kullanılan ÇKKV Yöntemleri

2.6.2.1 TOPSIS Yöntemi

TOPSIS yöntemi literatürde yaygın şekilde kullanılan ÇKKV yöntemlerinden birisidir. TOPSIS yöntemi, ilk kez 1981 yılında Hwang ve Yoon tarafından ELECTRE yöntemine alternatif olarak geliştirilmiştir. Bu yöntem, farklı kriterleri içeren problemleri çözmeye yeteneğine sahiptir. Literatürde en popüler ÇKKV yöntemlerinden biri olan TOPSIS yönteminin altında yatan mantık, en iyi ve en kötü performansın belirlenip alternatiflerin bu mesafeye olan uzaklığının belirlenmesidir (Mandic vd. 2014). TOPSIS yöntemi, kolay hesaplama yapısı, diğer modellerle kolaylıkla bütünleşebilme kapasitesinin yüksekliğinden dolayı öne çıkmaktadır (Chen, 2019: 34). TOPSIS yöntemi, her kriterin monoton olarak artan veya azalan eğilimde olduğunu varsaymaktadır. Bu sebeple, ideal çözümleri bulmak daha kolay olmaktadır. Alternatiflerin ideal çözüme göreli yakınlık derecesi hesaplanırken Öklidyen mesafe yaklaşımı kullanılmaktadır (Triantaphyllou, 2000: 18). Daha spesifik olarak ifade etmek gerekirse, TOPSIS yönteminde fayda kriterini maksimize edip maliyet kriterini minimize eden çözüm en iyi çözüm olarak belirlenecektir (Lee ve Yang, 2018: 14).

TOPSIS yönteminin aşamaları Eşitlik (64-71)'de gösterildiği gibidir.

Aşama 1: Karar Matrisinin Oluşturulması

TOPSIS yönteminde ilk aşama karar matrisinin oluşturulmasıdır.

$$X = \begin{bmatrix} x_{01} & \cdots & x_{0j} & \cdots & x_{0n} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{i1} & \cdots & x_{ij} & \cdots & x_{in} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{m1} & \cdots & x_{mj} & \cdots & x_{mn} \end{bmatrix} \quad (64)$$

Aşama 2: Normalize Karar Matrisinin Hesaplanması

ÇKKV yöntemlerinde kriterler belirlenirken alternatiflerin farklı yönlerini içeren kriterler yer alabilmektedir. Bu farklı alanlardan oluşan kriterlerin tek bir birim üzerinden değerlendirilmesi gerekir. Normalizasyon işlemi, ÇKKV yöntemlerinde bütün verileri aynı birime dönüştürmek için gerekli bir aşamadır (Munier vd, 2019: 26).

Karar matrisi Eşitlik (65)'de gösterildiği gibi normalize edilmektedir.

$$r_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sqrt{\sum_{k=1}^m x_{kj}^2}} \quad (65)$$

r_{ij} normalize edilmiş değerleri göstermektedir.

Aşama 3: Ağırlıklı Normalize Karar Matrisinin Hesaplanması

Ağırlıklı normalize karar matrisi, normalize karar matrisinin ilgili karar ağırlıklarıyla çarpılması sonucu elde edilmektedir.

$$V_{ij} = w_j \cdot r_{ij} \quad (66)$$

V_{ij} ağırlıklandırılmış normalize değerleri göstermektedir. Bu noktada entropi yöntemiyle elde edilmiş olan ağırlıklar kullanılmaktadır.

Aşama 4: Pozitif İdeal ve Negatif İdeal Çözümünün Belirlenmesi

Pozitif ve negatif ideal çözümlerin belirlenmesi aşağıda belirtildiği gibidir.

$$\text{PIS} = \{v_1^+, \dots, v_n^+\} = \left\{ \left(\max_i x_{ij} \mid i \in x_1 \right) \quad \left(\min_i x_{ij} \mid i \in x_2 \right) \right\} \mid i = 1, 2, \dots, n \quad (67)$$

$$NIS = \{v_1^-, \dots, v_n^-\} \left\{ \left(\min_i x_{ij} \mid i \in x_2 \right) \quad \left(\min_i x_{ij} \mid i \in x_2 \right) \right\} \mid i = 1, 2, \dots, n$$

(68)

Burada, x_1 ve x_2 sırasıyla fayda ve maliyet kriterlerini ifade etmektedir. Karar verici fayda kriterinin maksimum olmasını belerken maliyet kriterinin minimum olmasını beklemektedir.

Aşama 5: Her bir Alternatifin Pozitif ve Negatif İdeal Çözümüne Mesafesi

Her bir alternatifin pozitif ve ideal çözüme mesafesi Eşitlik (69) ve (70) kullanılarak bulunmaktadır.

$$D_i^+ = \left[\sum_{j=1}^n (v_{ij} - PIS_j)^2 \right]^{1/2} \quad (i = 1, \dots, m) \quad (69)$$

$$D_i^- = \left[\sum_{j=1}^n (v_{ij} - NIS_j)^2 \right]^{1/2} \quad (i = 1, \dots, m) \quad (70)$$

Aşama 6: İdeal Çözümüne göre Görelî Yakınlık Katsayısının (C_i^*) Hesaplanması

$$C_i^* = \frac{S_i^-}{S_i^- + S_i^+} \quad (71)$$

Bütün alternatiflerin görelî yakınlık katsayıları elde edildikten sonra alternatifler büyüktен küçüğe doğru sıralanmaktadır. C_i^* değerinin büyük olması, ilgili alternatifin pozitif ideal çözüme daha yakın olduğunu ve o alternatifin daha iyi performans gösterdiğini ortaya koymaktadır.

2.6.2.2 MAUT Yöntemi

Çok Nitelikli Fayda Teorisi (MAUT) yöntemi, kriterler açısından en iyi alternatifin belirlenmesi için niteliksel ve niceliksel kriterlerin eş zamanlı analizine olanak sağlayan ÇKKV stratejilerinden biridir. MAUT kullanımı, her kriterin değerlendirilmesi ve karar verme sürecinin daha kesin ve şeffaf hale getirilmesi için performansı etkin hale getirebilmektedir (Tan vd. 2021). MAUT, bir karar problemini çözmek için olası alternatifler

konusunda karar vericinin tercihini temsil etmek için kullanılan, bir kritere diğerine göre atfedilen önemi belirlemek ve alternatifleri ayrıntılı bir şekilde önceliklendirmek için uygulanan matematiksel bir modelden oluşur (Rediske vd. 2020). MAUT yöntemi, ilk aşamalarından itibaren ÇKKV yöntemlerinin geliştirilmesinin temel taşlarından biri olmuştur.

Doumpos ve Zopounidis'e (2002) göre, geleneksel fayda teorisi üzerine inşa edilen MAUT yönteminde çok boyutlu senaryo yer almaktadır. Diğer tüm MCDM metodolojileri doğrudan veya dolaylı olarak MAUT tarafından sunulan kavramları kullanır. Varsayımlarının ardındaki mantık, tüm karar vericilerin, her seçim kriterinden elde edilen tüm faydaları toplayan işlevi en üst düzeye çıkarmaya çalışmasıdır (Antoniou ve Aretoulis 2019). MAUT'un ihtiyaç duyduğu giriş verisi türü bir fayda fonksiyonudur (Ahmad vd. 2021). MAUT yaklaşımının işleyişi iki temel başlıkta ele alınabilir. Karar matrisi elde edildikten sonra öncelikle matristeki elemanların normalleştirilmesi gerekir (Ozkaya vd. 2021; Zhu vd. 2017).

Aşama 1. Karar Matrisinin Oluşturulması

MAUT yaklaşımının ilk aşaması karar matrisinin oluşturulmasıdır.

$$X = \begin{bmatrix} a_{11} & \dots & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{21} & \dots & a_{22} & \dots & a_{2n} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{m1} & \dots & a_{m2} & \dots & a_{mn} \end{bmatrix} \quad (72)$$

Aşama 2. Fayda ve Maliyet Kriterine Göre Normalizasyon İşlemi

Karar matrisi elemanları fayda ve maliyet fonksiyonu olmasına göre sırasıyla aşağıdaki şekilde normalize edilir.

$$u_j(\max) = \frac{a_j - a_{\min}}{a_{\max} - a_{\min}} \quad (73)$$

$$u_j(\min) = \frac{a_{max} - a_j}{a_{max} - a_{min}} \quad (74)$$

Aşama 3. Kriterlerin Ağırlıklandırılması

Kriter ağırlıkları ÇKKV yöntemlerinde görelî önem derecelerinin belirlenmesi için gerekli bir aşamadır. Bu çalışmada kriter ağırlıkları için objektif bir ağırlıklandırma yöntemi olan entropi tekniğı kullanılmaktadır.

$$W = [w_1, w_2, \dots, w_n] \quad (75)$$

Burada w entropi yöntemiyle elde edilen kriter ağırlıklarını belirtmektedir.

Aşama 4. Ağırlıklı Fayda Değerlerinin Elde Edilmesi

Ağırlıklı fayda değerleri aşağıdaki şekilde belirlenmektedir.

$$U_i = \sum_{j=1}^n u_j \cdot w_j \quad (76)$$

Burada, U_i her bir alternatif için ağırlıklı toplam fayda değerini ifade etmektedir.

2.6.2.3 VIKOR Yöntemi

VIKOR yaklaşımı, Opricovic (1998) tarafından çelişen kriterleri içeren ÇKKV problemlerinin çözümüne yönelik uzlaşık çözüm sağlamak amacıyla ortaya atılan ve en yaygın şekilde kullanılan yöntemlerden birisidir. Uzlaşık çözüm, fayda ve maliyet kriterlerini içeren problemlerde mümkün olan en iyi çözümü elde etmeyi amaçlamaktadır. Bu yaklaşım ideal mesafeleri ölçüp bu mesafeye yakınlığa göre uzlaşık çözümü bulmaya odaklanmaktadır. Bu yöntem, alternatifleri temsil eden sütunlardan ve kriterleri gösteren satırlardan oluşan bir karar matrisinin oluşturulması ile başlar. j alternatif ve i kriterin olduğu varsayılmaktadır. Her alternatif, her kriter fonksiyonuna göre değerlendirilir ve sıralama ideal çözüme yakınlığa göre yapılmaktadır (Shojaei vd. 2018). VIKOR yönteminin aşamaları aşağıdaki şekilde ifade edilmektedir (Ploskas ve Papathanasiou, 2019).

Aşama 1. En İyi ve En Kötü Kriter Değerlerinin Hesaplanması

VIKOR yönteminin ilk aşaması her bir kriter için en iyi ve en kötü değerlerin hesaplanmasıdır.

$$f_j^+ = \max_i f_{ij}, \quad f_j^- = \min_i f_{ij}, \quad j = 1, 2, \dots, n \quad \text{fayda kriteri için} \quad (77)$$

$$f_j^- = \min_i f_{ij}, \quad f_j^+ = \max_i f_{ij}, \quad j = 1, 2, \dots, n \quad \text{maliyet kriteri için} \quad (78)$$

Burada, f_j^+ ve f_j^- sırasıyla her bir alternatif için en iyi ve en kötü kriter değerlerini ifade etmektedir.

Aşama 2. Fayda ve Pişmanlık Ölçülerinin Hesaplanması

Fayda ve pişmanlık ölçüleri sırasıyla aşağıdaki şekilde hesaplanmaktadır.

$$S_i = \sum_{j=1}^n w_j (f_j^+ - f_{ij}) / (f_j^+ - f_j^-) \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (79)$$

$$R_i = \max_j \{w_j (f_j^+ - f_{ij}) / (f_j^+ - f_j^-)\} \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (80)$$

Burada w_j kriter ağırlıklarını ifade ederken S_i ve R_i ise sırasıyla fayda ve pişmanlık ölçütlerini ifade etmektedir.

Aşama 3. VIKOR Endeks Değerlerinin Hesaplanması

Her bir alternatif için VIKOR endeks değerleri aşağıdaki şekilde hesaplanmaktadır.

$$Q_i = v \frac{(S_i - S^+)}{(S^- - S^+)} + \frac{(1-v)(R_i - R^+)}{(R^- - R^+)} \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (81)$$

$S^+ = \min_i S_i$, $S^- = \max_i S_i$, $R^+ = \min_i R_i$, $R^- = \max_i R_i$ olmak üzere v ise grup fayda fonksiyonu olarak adlandırılmaktadır. S_i ve R_i ise sırasıyla fayda ve pişmanlık ölçütlerini belirtmektedir. Q_i değerleri ise VIKOR yönteminde alternatiflerin değerlendirilmesinde kullanılır.

Aşama 4. Alternatiflerin Sıralanması

Alternatifler küçükten büyüğe doğru sıralanır. En düşük Q_i değerine sahip olan alternatif en iyi alternatif olarak kabul edilir.

Aşama 5. Uzlaşık Çözümün Elde Edilmesi

Eğer en iyi performansa sahip olan alternatif aşağıdaki şartları sağlarsa optimum çözüm olarak nitelendirilebilir.

Şart 1. Kabul Edilebilir Avantaj

$$Q(A^{(2)}) - Q(A^{(1)}) \geq 1 / (n - 1) \quad (82)$$

Burada $(A)^{(1)}$ en iyi alternatifi $(A)^{(2)}$ ondan sonra gelen en iyi ikinci alternatifi n ise alternatif sayısını göstermektedir.

Şart 2. Karar Vermede Kabul Edilebilir İstikrar

En iyi performansa sahip alternatif aynı zamanda S ve/veya R hesaplamalarında da aynı performansı göstermelidir.

2.7 Etkinlik ve Performans Teknikleriyle Sektörde Gerçekleştirilen Çalışmalar

Literatürde ulaştırma sektörünün enerji etkinliği ve sürdürülebilirliğiyle ilgili yapılan etkinlik ve performans çalışmaları son dönemde git gide önem kazanmaktadır. Bu çalışmalar, genellikle ÇKKV ve sera gazı gibi istenmeyen çıktıları da modele dahil edebilen aylak temelli VZA tekniklerine dayanmaktadır. Ulaştırma sektöründe gerçekleştirilen enerji etkinliği ve sürdürülebilirlik temelli performans ve etkinlik çalışmaları şu şekilde özetlenebilir:

Siksnyte-Butkiene ve Streimikiene (2022) çalışmalarında, AB ülkelerinde karayolu taşımacılığındaki son gelişmeleri incelemekte ve sürdürülebilirliğini değerlendirmek için TOPSIS yöntemine dayanan bir ÇKKV analiz çerçevesi sunmaktadır. Araştırma, 1000 kişiye düşen binek otomobil sayısı; iç yolcu taşımacılığında otobüs ve trenlerin yüzde olarak payı, çevreci (taşımada yenilenebilir enerjinin yüzde olarak payı, binek dizel araçların yüzde

olarak payı ve karayolu taşımacılığında yakıt tüketilmesinden kaynaklanan sera gazı emisyonları, ton/kışı; karayolu trafiği ölümleri değişken olarak seçilmiştir. Sonuç olarak, hem araştırma aracının seçimi hem de göstergelerin erişilebilirliği dikkate alınmaktadır. 2010 ve 2020 yılları arasında ulaşım sürdürülebildiği açısından hangi ölkelerin önde ve geride olduğunu belirlemek için AB üye devletlerine ilişkin ÇKKV yöntemlerinden bir uygulama ile araştırılmaktadır. Analiz sonuçlarına göre, İsveç, ulaşımında kullanılan enerjinin yaklaşık üçte birini sağlamak için yenilebilir enerji kullanarak bu alanda olağanüstü ilerleme kaydettiği görölmektedir.

Wang vd. (2022a) çalışmalarında, OECD üye ölkelerinde hangilerinin başarılı bir şekilde geliştirilebileceğine karar vermek için şu anda kullanımda olan çeşitli karayolu ulaşım sistemlerinin gelişimini değerlendirmeyi amaçlamaktadır. Analizde, bütünleşik bir ÇKKV tekniği kullanılmaktadır. Kriterlerin ağırlıklandırılmasında objektif bir ağırlıklandırma tekniği olan Shannon entropi tekniği kullanılırken alternatiflerin değerlendirilmesinde yeni bir ÇKKV olan CoCoSo tekniği kullanılmıştır. Analizde sistem etkililiği, ekonomik, sosyal ve çevresel kategorilerden oluşan değişkenler kullanmışlardır. Ulaştırma ağının ne kadar sürdürülebilir olduğunun belirlenmesi için bir bütünleşik analiz tekniği benimsenmiştir. ÇKKV analiz sonuçlarına göre, sürdürülebilirlik açısından en iyi ilk üç performansı gösteren ölkeler Japonya, Almanya ve Fransa olmuştur. Bu ölkelerin etkin olmalarındaki temel sebep, gelişmiş altyapıya ve ulaşım servislerine sahip ölkeler olduklarından avantajlı sonuçlar elde etmiştir. İzlanda, Amerika Birleşik Devletleri ve Letonya gibi ölkeler ulaştırma performansı bakımından görece daha yetersiz performans göstermişlerdir.

Chen vd (2021) Çin'in ulaştırma sektörünün enerji verimliliğini 2005'ten 2016'ya kadar değerlendirmek için VZA tekniğini kullanmaktadır. Çalışan sayısını, sermayeyi ve enerji

tüketimini girdi olarak kullanırlar, istenen çıktı olarak GSYH'yi ve istenmeyen çıktı olarak ise CO₂ emisyonlarını seçmişlerdir. Ulaşım enerji verimliliğinin genel sıralaması, harici çevresel faktörler adapte edilmesinden önce ve sonra değişmeden kalmaktadır. Elde ettikleri bulgulara göre, doğu bölgesi en yüksek genel ulaşım enerji verimliliğine sahip olmaya devam ederken onu orta ve batı bölgeleri izliyor. Tobit regresyon bulguları, dış ortam değiştiğinde tüm illerin artan verimlilik potansiyellerini gösterebileceğini göstermektedir. Kentleşme düzeyi gibi bazı çevresel faktörlerin ulaşım sektöründeki toplam etkinlik üzerinde ters etkileri vardır.

Zhao vd. (2022) çalışmalarında, epsilon tabanlı bir VZA tekniği kullanarak 2010-2016 döneminde 30 Çin şehiri için ulaşım sektörünün emisyon etkinliğini değerlendirmektedir. Ulaştırma endüstrisinde sermaye stoku, personel sayısı ve enerji kullanımının etkinliğini girdi olarak göz önüne alınırken ulaştırmanın katma değeri istenen çıktı iken ulaştırma sektöründeki CO₂ salınımı ise istenmeyen çıktı olarak kullanılmaktadır. Uzamsal Durbin modeli, ek etkileyen unsurları araştırmak için kullanılmaktadır. Araştırma bulgularına göre, incelenen Çin eyaletleri için ortalama ulaşım sektörü karbon emisyonu etkinliği %61 olarak bulunmuştur ve bu da etkinlikte geliştirilebilecek hala yüksek bir alanın olduğunu göstermektedir. 2010-2012 arasında ortalama etkinlikte azalma gözlemlenirken 2012-2016 arası etkinlik seviyesi artış göstermektedir. Ayrıca, analiz edilen bölgeler arasında ciddi etkinlik farklılıkları gözlemlenmektedir. Çin'in en gelişmiş kıyı bölgeleri, ulaşım sektörü karbon emisyonu etkinliği en yüksek olan iller olarak belirlenmiştir.

Du vd. (2021) çalışmalarında, Kuşak ve Yol Girişimi'ndeki ulaşım karbon verimliliğini hesaplamaktadır ve epsilon tabanlı bir ölçüm yaklaşımı kullanarak karbon emisyonlarını düşürme potansiyelini değerlendirmektedir. Girdi olarak çalışan sayısını, sermaye yatırımlarını ve enerji tüketimini kullanmaktadır ve hizmet ticaretini ve CO₂

emisyonlarını sırasıyla arzu edilen ve istenmeyen çıktı olarak seçmektedir. Sonuçlar, her ülkenin ulaşım karbon verimliliğini karşılaştırmak ve onları dört gruba ayırmak için kullanılmaktadır. Tüm Kuşak ve Yol Girişimi'ndeki ülkelerinin ortalamasına göre karbon emisyonu azaltma potansiyellerini, yaklaşık %75 iken ortalama ulaşım karbon etkinliğinin ise %34'e yakın bir seviyede olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Singapur Letonya, Estonya, Litvanya ve Slovenya en etkin ülkeler olurken son beş ise Bangladeş, Yemen, Nepal, Irak ve Endonezya'dan oluşmuştur. Ek olarak, analiz sonuçları zengin ülkelerde daha büyük ulaşım karbon verimliliğinin daha olası olduğunu göstermektedir.

Domagała ve Kadhubek (2022) çalışmalarında aylak temelli VZA yaklaşımını kullanarak AB ulaşım endüstrisinin ekonomik, enerji ve çevresel performansının kapsamlı bir analizini sunmayı amaçlamaktadır. VZA modeli, kayıtlı yük taşıtlarının sayısı, yol ağı uzunluğu ve karayolu taşımacılığı işinde çalışan insan sayısı gibi enerji dışı girdiler kullanmıştır. VZA modeli ayrıca karayolu yük taşımacılığı endüstrisinden ortaya çıkan enerji girdilerini de içermektedir. Karayolu taşımacılığı endüstrisi karları ve tamamlanan yük işi istenen çıktı olarak görülmektedir. Çalışmada, sera gazı emisyonu ise istenmeyen çıktı olarak ele alınmaktadır. Verimli karayolu yük taşımacılığı grubu gerçekleştiren ülkeler, arasında Danimarka, Almanya, Belçika, Litvanya, Lüksemburg, Hollanda, Polonya, Portekiz, Slovenya ve Bulgaristan bulunmaktadır. Bu ülkeler, girdileri verimli bir şekilde çıktılara dönüştürmeyi başarmışlardır. İtalya, Finlandiya, Slovakya, İsveç ve Romanya dahil olmak üzere beş ülke eko-verimlilik takipçisi olarak kabul edilmektedir ve 12 ülke, verimsiz bir karayolu yük taşımacılığı sektörü ile karakterize edilmektedir. Karayolu yük taşımacılığı sektörünün çevresel etkinliği AB ülkeleri arasında kayda değer farklılık göstermektedir. Analiz sonuçlarına göre, on ülke karayolu yük taşımacılığı anlamında etkin olduğu görülmektedir.

Mo ve Wang (2019) çalışmalarında, OECD ülkelerinde 2000 ve 2014 yılları arasında ulaşımın çevresel sürdürülebilirliğini VZA tekniği ile incelemektedir. Analizde, toplam yol uzunluğu, ulaştırma yatırımları girdi olarak kullanılırken yolcu sayısı ve yük miktarı istenen çıktı olarak kullanılmaktadır. Modelde, hava kirliliğine yol açan kirleticiler ve CO₂ emisyonları istenmeyen çıktılar olarak kullanılmaktadır. Taşımacılığın çevre üzerindeki etkilerini aynı anda dikkate alarak konsolide çevresel sürdürülebilirlik performans ölçümleri oluşturmaktadırlar. Analiz sonuçlarına göre, Belçika, Çek Cumhuriyeti, Finlandiya, İtalya, Kore, Litvanya, Polonya, Portekiz, İsveç, Türkiye, Birleşik Krallık ve Amerika Birleşik Devletleri etkin olan ülkeler olarak belirlenmiştir. Teknik ilerlemenin ve yakıt verimliliği ve araç emisyonlarına ilişkin daha katı yasaların bir sonucu olarak, incelenen ülkelerin toplam yönetim performansının 2000'den 2014'e kadar olan süreçte yükseldiği sonucuna varmaktadırlar.

Baran ve Górecka (2019) çalışmalarında, VZA metodolojisini kullanarak Avrupa Birliği'nin hem mevcut hem de yeni üye ülkelerinde yük taşımacılığının etkinliğini değerlendirmiştir. Buna ek olarak ulaşım etkinliği ile ekonomik büyüme arasındaki ilişkiyi de incelemektedirler. Girdi olarak işçi sayısı, yol uzunluğu, enerji tüketimi ve toplam yük taşıtı sayısı, çıktı olarak ise mesafe ve ciro kullanılmıştır. Hem karayolu hem de demiryolu taşımacılığında en yüksek verimliliğe sahip ülkeler Letonya, Slovenya, Slovakya ve Belçika olarak bulunmuştur. Sonuçlar, yeni AB üye ülkelerinde daha verimli karayolu taşımacılığının ulaşımdan kaynaklanan daha fazla CO₂ emisyonuna neden olduğunu, ancak daha verimli demiryolu taşımacılığının azalmaya neden olduğunu göstermektedir. Eski ve yeni AB üyelerinde farklı seviyelerde demiryolu ve karayolu taşımacılığı verimliliği, bu faktörlerin söz konusu ülkelerin GSYH'si ile bağlantılı olabileceğini düşünülmektedir. Ayrıca, bu durum farklı ulaşım sektörlerindeki CO₂ emisyonlarından kaynaklanıyor olabilir.

Bojković vd. (2010) çalışmalarında, sürdürülebilirlik kavramında bir ÇKKV analizi sağlamayı amaçlamaktadır. Taşımacılık sürdürülebilirliğinin değerlendirilmesi için ELECTRE tekniği olan üstünlük yönteminin potansiyeline odaklanmaktadır, stratejik bir ampirik incelemeye göre belirli Avrupa ülkelerine uygulanmaktadır. Analizde ulaştırma sektöründe enerji tüketimi, ulaştırma sektöründe sera gazı salınımı, GSMH'nin ulaştırma sektörüne katkısı, enerji yoğunluğu, ulaştırma sektörünün istidam büyümesine katkısı gibi değişkenler kullanılmaktadırlar. Sonuç olarak, ulaşım sürdürülebilirliği ile ilgili sorunlara yanıt olarak ülkeler arasında ikili bağlar oluşturulmuştur. ELECTRE I yönteminin uygulanması, temel alt küme üç ülkeden oluşmaktadır: Slovakya, Türkiye ve Çek Cumhuriyeti. Bu ÇKKV yöntemi ile eşit puanlı kriterler çıkarılarak, ülke performansının belirgin şekilde daha iyi olması gerekir. Bu ilişkilere ve verilen kriterlere dayanarak, bağlantı grafiğinin çekirdek alt kümesi, daha iyi performans gösteren ülkeler grubu olarak belirlenmektedir.

Yang vd. (2019) ulaşım ve arazi kullanım verimliliğindeki değişikliklerin nedenlerini belirlemek için Çin şehirlerindeki ulaşım ve arazi kullanım etkinliğini, süper etkinlik VZA ve pencere VZA tekniklerini kullanılmaktadırlar. Analizde, ulaştırma sektöründe sermaye miktarı, toplam yol uzunluğu (km), işgücü miktarı girdi olarak kullanırken GSYH çıktı olarak kullanılmaktadır. Değerlendirmenin bulguları, batıdaki şehirlerin en az verimli olduğu Hunan eyaletinin etkinliğinde coğrafi farklılıkların etkili olduğunu göstermektedir. Sekiz şehir, ulaşım ve arazi kullanım etkinliğinde bir gelişme sergilemektedir. Etkinlik analiz sonuçlarına göre, neredeyse tüm bölgelerde yıllık olarak artış göstermektedir. Aynı zamanda, Malmquist verimlilik analizi sonuçlarına göre tüm bölgelerde teknik ilerleme artmasına rağmen, beş bölgede teknik etkinlikte düşüş yaşanmaktadır. Analiz sonuçları, karayolu

taşımacılığına ve kentsel yapılaşmaya yapılan yatırımların uzun vadeli kentsel büyümeyi sağlamak için yetersiz olduğunu göstermektedir.

Io Storto ve Evangelista (2023) çalışmalarında, 2010'dan 2017'ye kadar 28 AB ülkesinin kara ulusal lojistik sistemlerinin performansını karşılaştırmak için uluslararası bir kıyaslama çalışması yapmayı hedeflemişlerdir. Kara ulusal lojistik sistemleri, altyapı verimliliği, lojistik kalitesi ve çevre üzerindeki etkileri açısından karşılaştırılmaktadır. Karayolu ve demiryolu taşımacılığı modları için altyapı etkinliğinin ölçümünü oluşturmak üzere VZA kullanıldı. Lojistik sistem altyapı verimliliğini ölçen tek bir bileşik indeks elde etmek için bireysel verimlilik göstergeleri, Shannon tarafından geliştirilen entropi tekniği kullanılarak bir araya getirilmektedir. Bireysel verimlilik göstergelerinin karşılaştırılmasında elde edilen sonuçlar, yeterli düzeyde bir altyapı verimliliği olmadan, hizmet bileşeninin tek başına ulusal lojistik sistemlerinin rekabet gücünü sağlamak ve sürdürmek için yeterli olmadığını göstermektedir. Genel performans ve çevre endeksleri birlikte değerlendirildiğinde, çok az ülkenin operasyonel ve çevresel performansı aynı anda iyileştirebildiği ortaya çıkmıştır. Ülkelerin büyük çoğunluğu, operasyonel performansı iyileştirmeyi amaçlayan stratejiyi çevresel etkiyi azaltmayı amaçlayan stratejiden ayırmakta güçlük çektiği gözlemlenmiştir.

ÜÇÜNCÜ BÖLÜM

AMPİRİK ANALİZ

3.1 Değişkenler ve Tanımlayıcı İstatistikler

Ampirik analizde kullanılacak değişkenler belirlenmeden önce literatürde enerji etkinliği ve sürdürülebilirlik kapsamında gerçekleştirilmiş olan etkinlik ve performans çalışmaları kapsamlı şekilde incelenip değişkenler bu çalışmalar esas alınarak belirlenmiştir. Analizde en önemli aşamalardan biri değişken seçimi olduğu için sektörle ilgili çalışmalar detaylıca incelenmiştir. Değişkenlerin belirlenmesinde Domagała ve Kadłubek (2022); Chen vd. (2018); Song vd. (2022); Zhao vd. (2022) ve Ma vd. (2021); Chu vd. (2018) çalışmaları ve AB'nin ulaştırma sektöründe çevre ve enerji konularında belirlediği hedefler dikkate alınarak belirlenmiştir. Analiz kapsamında öncelikle AB'nin en çok enerji tüketen sektörlerinden biri olan ulaştırma sektörünün enerji etkinliği aylak temelli VZA yöntemiyle incelenmiştir. Analizde AB ülkeleri, incelenen değişkenler bakımından ciddi farklılıklar gösterdiğinden daha güvenilir sonuçlar elde etmek için GSYH seviyelerine göre iki ayrı gruba ayrılarak analiz edilmiştir. Analizin ikinci kısmında ise AB ülkelerinin ulaştırma sektörünün sürdürülebilirlik performansı çeşitli ÇKKV yöntemleri kullanılarak analiz edilmektedir. Bu bölümde ilk olarak aylak temelli VZA yönteminde kullanılan değişkenlere Tablo 4'de yer verilmektedir.

Tablo 4. Aylak Temelli VZA Yönteminde Kullanılan Değişkenler

Değişken Türleri	Değişkenler
Girdiler	Ulaştırma Sektöründe İstihdam Edilen Kişi Sayısı
	Ulaştırma Sektöründe Harcanan Toplam Enerji
	Ulaştırma Sektöründe Brüt Sermaye Oluşumu
İstenen Çıktı	Ulaştırma Sektörü Toplam Ciro
İstenmeyen Çıktı	Ulaştırma Sektöründe Ortaya Çıkan Sera Gazı Salınımı

Analiz döneminde kullanılan değişkenlere ilişkin ortalama tanımlayıcı istatistiklere Tablo 5’de yer verilmektedir.

Tablo 5. Etkinlik ve Performans Ölçümünde Kullanılan Değişkenlerin Ortalama Tanımlayıcı İstatistikleri

Değişkenler	Minimum	Ortalama	Maksimum	Standart Sapma
Ulaştırma Sektöründe İstihdam Edilen Kişi Sayısı	40000	1141000	7158000	1582000
Ulaştırma Sektöründe Harcanan Toplam Enerji	685000	31855000	168938000	43105000
Ulaştırma Sektöründe Brüt Sermaye Oluşumu	483000	29851000	212902000	45636000
Ulaştırma Sektörü Toplam Ciro	7211000	154964000	1010247000	226995000
Ulaştırma Sektöründe Ortaya Çıkan Sera Gazı Salınımı	1860000	87627000	480638000	119863000
Ulaştırma Sektöründe Kullanılan Yenilenebilir Enerji	176600	825000	4166000	1119000

Kaynak: (Eurostat, 2023c).

3.2 Analiz Sonuçları

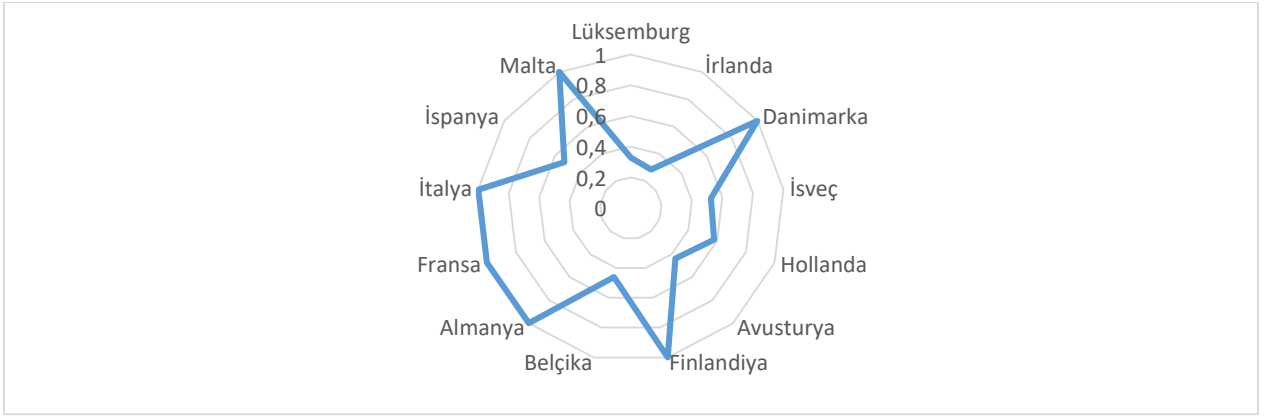
Değişkenler ve tanımlayıcı istatistikler ortaya konulduktan sonra bu bölümde öncelikle AB ülkelerinde ulaştırma sektöründe aylak temelli VZA yöntemiyle gerçekleştirilmiş enerji etkinliği analiz sonuçlarına gelişmiş ve gelişmekte olan ülkeler için sırasıyla Tablo 6 ve 7’de yer verilmektedir.

Tablo 6. Gelişmiş AB Ülkelerinin Enerji Etkinliğinin Aylak Temelli VZA Yöntemiyle Elde Edilen Analiz Sonuçları

Gelişmiş AB Ülkeleri	Etkinlik Seviyeleri (2017)	Etkinlik Sırası (2017)	Etkinlik Seviyeleri (2018)	Etkinlik Sırası (2018)	Etkinlik Seviyeleri (2019)	Etkinlik Sırası (2019)
Lüksemburg	0,328	12	0,381	12	0,361	12
İrlanda	0,283	13	0,326	13	0,298	13
Danimarka	1,000	1	1,000	1	1,000	1
İsveç	0,524	9	0,471	9	0,508	9
Hollanda	0,579	7	0,636	7	1,000	2
Avusturya	0,437	11	0,427	10	0,359	11
Finlandiya	1,000	2	1,000	2	1,000	3
Belçika	0,461	10	0,417	11	0,381	10
Almanya	1,000	3	1,000	3	1,000	4
Fransa	1,000	4	1,000	4	1,000	5
İtalya	1,000	5	1,000	5	1,000	6
İspanya	0,525	8	0,504	8	0,555	8
Malta	1,000	6	1,000	6	1,000	7
Ortalama Etkinlik Seviyeleri	0,702		0,704			0,727

Ülke bazında ulaştırma sektörünün enerji etkinliği şu şekilde ifade edilebilmektedir.

Ulaştırma sektörünün etkinliği ilgili birimlerin girdileri çıktılara dönüştürmedeki başarısını göstermektedir. Etkin birimler, daha fazla çıktı seviyesine ulaşmak için belirli seviyede girdi kullanma ya da daha az girdi kullanılarak belirli bir çıktı seviyesine ulaşma olarak değerlendirilebilir. Analiz sonuçları etkin birimlerin başarısını ortaya koyarken etkin olmayan birimler için ise etkinlik seviyesine çıkabilmeleri için kıyaslama yapabilecekleri ülkeleri ortaya koymaktadır. Tablo 5’de elde edilen analiz sonuçlarına göre, Danimarka, Finlandiya, Almanya, Fransa, İtalya ve Malta gelişmiş AB ülkeleri grubunda analiz dönemi boyunca etkinlik seviyesine ulaşmıştır. Analiz süreci boyunca ortalama etkinlik seviyesi ise %70-72 aralığında gerçekleşmiştir. Gelişmiş AB ülkeleri için analiz dönemi boyunca ortalama dağılım grafiğine Şekil 12’de yer verilmiştir.



Şekil 12. 2017-2019 Yıllarında Gelişmiş AB Ülkeleri için Enerji Etkinliği Dağılım Grafiği

Şekil 12’de görüleceği üzere, gelişmiş AB ülkeleri grubunda 2017-2019 yılları arasında Danimarka, Finlandiya, Almanya, Fransa, İtalya ve Malta olmak üzere 6 ülke etkinlik seviyesine ulaşmıştır. Analiz dönemi boyunca etkin olan bu ülkeler ortalama etkinlik seviyesinin üzerinde yer alırken etkin olmayan ülkeler ise ortalama etkinlik seviyesinin altında yer almışlardır. Gelişmiş AB ülkeleri grubunda, etkin olan ülkelerin büyük oranda endüstrileşmiş ve teknoloji konusunda gelişmiş ülkeler olduğu görülmektedir. Ayrıca, gelişmiş AB ülkelerinin etkinlik seviyeleri arasında ciddi farklılıklar gösterdiği görülmektedir. İskandinav ve endüstrileşmiş AB ülkelerinin genel olarak daha iyi etkinlik seviyesinde olduğu görülmektedir.

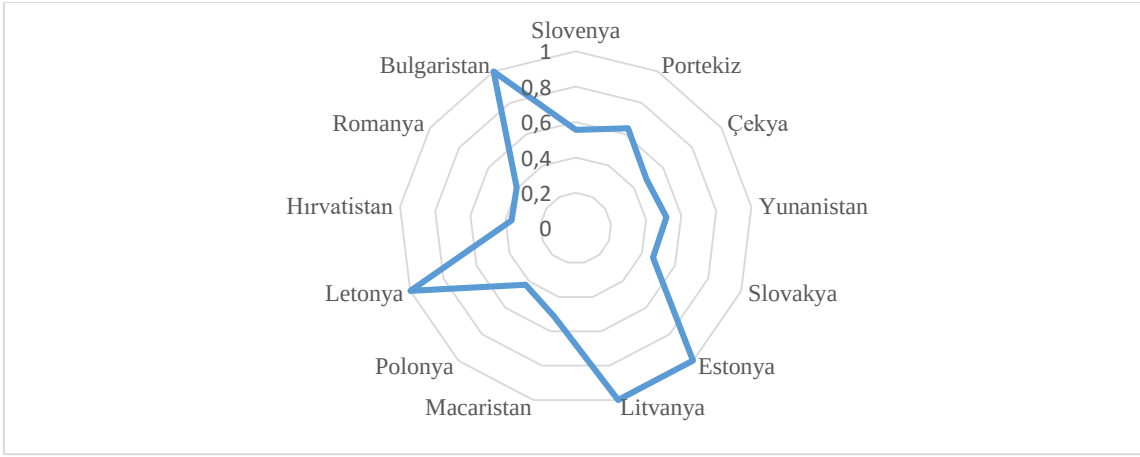
Gelişmiş AB ülkelerinin ulaştırma sektöründeki enerji etkinlikleri araştırıldıktan sonra ikinci kısımda analizi geliştirmekte olan AB ülkeleriyle sürdürülmektedir. Tablo 7’de geliştirmekte olan AB ülkelerinin ulaştırma sektörünün enerji etkinlik sonuçlarına yer verilmektedir.

Tablo 7. Gelişmekte Olan AB Ülkelerinin Enerji Etkinliğinin Aylak Temelli VZA Yöntemiyle Elde Edilen Analiz Sonuçları

Gelişmekte Olan AB Ülkeleri	Etkinlik Seviyeleri (2017)	Etkinlik Sırası (2017)	Etkinlik Seviyeleri (2018)	Etkinlik Sırası (2018)	Etkinlik Seviyeleri (2019)	Etkinlik Sırası (2019)
Slovenya	0,555	6	0,563	6	0,547	6

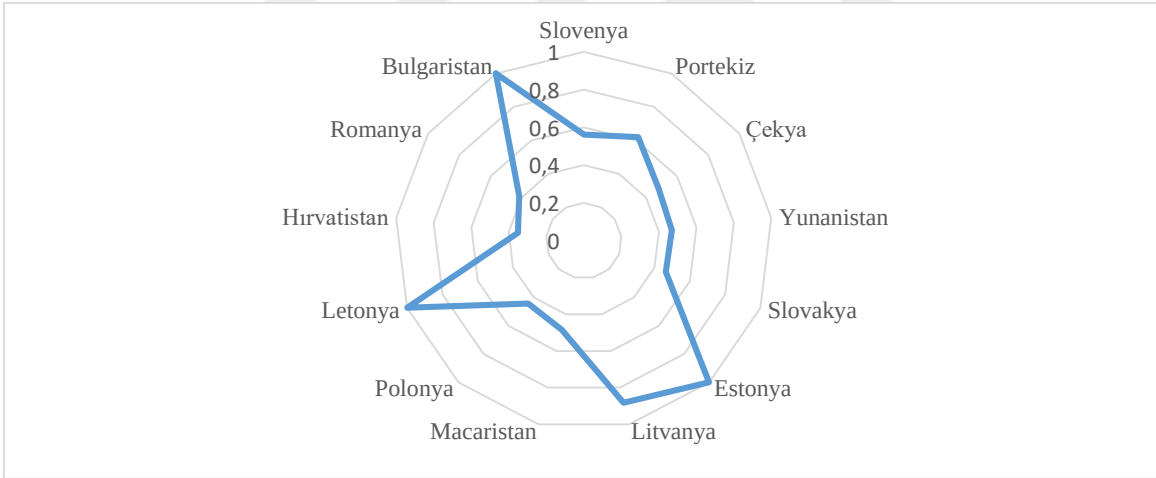
Portekiz	0,637	5	0,619	5	0,583	5
Çekya	0,486	9	0,482	8	0,459	7
Yunanistan	0,516	7	0,469	9	0,434	9
Slovakya	0,466	10	0,465	10	0,433	10
Estonya	1,000	1	1,000	1	1,000	1
Litvanya	1,000	2	0,882	4	0,713	4
Macaristan	0,513	8	0,484	7	0,438	8
Polonya	0,427	11	0,444	11	0,418	11
Letonya	1,000	3	1,000	2	1,000	2
Hırvatistan	0,365	13	0,351	13	0,315	13
Romanya	0,406	12	0,416	12	0,335	12
Bulgaristan	1,000	4	1,000	3	0,718	3
Ortalama Etkinlik Seviyeleri	0,643		0,628		0,568	

Tablo 7’de görüldüğü üzere, gelişmekte olan AB ülkeleri grubunda Estonya, Litvanya, Letonya ve Bulgaristan etkinlik seviyesine ulaşmıştır. Estonya ve Letonya analiz dönemi boyunca etkinlik seviyesini korurken Litvanya ve Bulgaristan her ne kadar 2018 ve 2019 yıllarında istenen çıktı seviyesini artırsa da girdi ve istenmeyen çıktı seviyelerinde daha fazla artış yaşadığı için etkinlik seviyesinde analizin ilerleyen dönemlerinde düşme görülmüştür. Gelişmekte olan AB ülkelerinde analiz süreci boyunca istikrarlı bir performans görülürken özellikle ulaştırma teknolojisinde gerçekleştirdiği uzmanlıkla ön planda yer alan Baltık ülkelerinin daha iyi bir etkinlik seviyesi sergilediği görülmektedir. Bu ülkelerin dışında kalan etkin olmayan ülkelerin girdi ve istenmeyen çıktı seviyelerinde azalmaya gitmeleri gerekmektedir. Bu ülkelerin özellikle SG salınımına da odaklanmalı ve ulaştırma sektöründeki teknolojik ilerlemesini geliştirip daha az girdiye ihtiyaç duyar hale gelmesi gerekebilir. Gelişmekte olan AB ülkelerinin ulaştırma sektörünün enerji etkinliği dağılımını gösteren grafiklere 2017-2019 dönemi için sırasıyla Şekil 13-16’da yer verilmektedir.



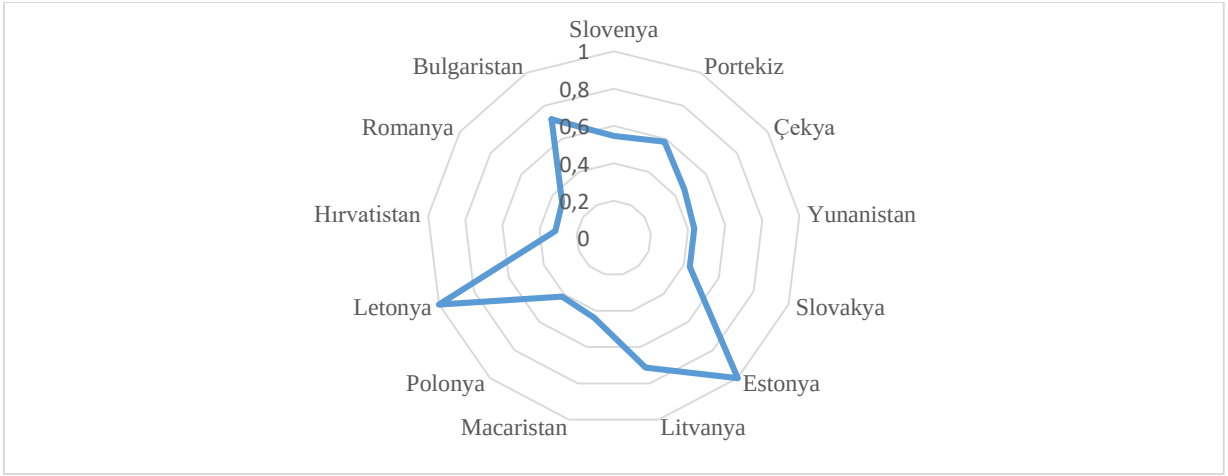
Şekil 13. 2017 yılı Gelişmekte Olan AB Ülkeleri için Enerji Etkinliği Dağılım Grafiği

Şekil 13’de etkinlik dağılımında görüleceği üzere, 2017 yılında gelişmekte olan AB ülkelerinde Litvanya, Estonya, Bulgaristan ve Letonya etkin olurken ortalama etkinlik seviyesi %64 olarak gerçekleşmiştir.



Şekil 14. 2018 Yılı Gelişmekte Olan AB Ülkeleri için Enerji Etkinliği Dağılım Grafiği

Şekil 14’deki dağılım grafiğinde görüleceği üzere, 2018 yılında 2017 yılına benzer bir etkinlik dağılımı görülmüştür. 2017 yılına benzer şekilde Letonya, Estonya ve Bulgaristan etkin olurken ortalama etkinlik seviyesi ise %62 olarak gerçekleşmiştir. Bu mevcut girdi kaynakları etkin kullanıldığı takdirde %38 daha az girdiyle aynı etkinlik seviyesine ulaşılabilceğini göstermektedir.



Şekil 15. 2019 Yılı Gelişmekte Olan AB Ülkeleri için Enerji Etkinliği Dağılım Grafiği

Şekil 15’deki dağılım grafiğinden de görüleceği üzere, 2017 ve 2018’ e göre 2019 yılında etkinlik seviyelerinde düşme yaşanmıştır. Etkinlik dağılım grafiklerinden de anlaşılacağı üzere, gelişmiş AB ülkelerinde gelişmekte olanlara kıyasla çok daha yüksek ortalama etkinlik seviyesi görülmektedir. Gelişmiş AB ülkeleri analiz dönemi boyunca ortalama etkinliklerini artırırken gelişmekte olan AB ülkelerinde ortalama etkinlik seviyelerinde azalma görülmektedir. Bu sonuçlar, gelişmiş AB ülkelerinin gelişmekte olanlara göre kaynaklarını çok daha etkin kullandığını göstermektedir. Diğer sektörlerle karşılaştırıldığında, ulaşım en önde gelen enerji tüketicisi olan sektörlerden birisidir. AB’nin temel amaçlarından biri olan enerji etkinliği, ekonomik rekabeti ve sürdürülebilirliği sağlayacak, emisyonları ve enerji bağımlılığını düşürecek ve enerji güvenliğini artıracak bir çözüm olarak belirtilebilir (Malinauskaite vd. 2019). Elde edilen analiz sonuçlarına göre, birçok AB ülkesinin enerjinin etkinliğinin hala iyileştirilmesi gerekmektedir. Bu çerçevede politika önerilerinin geliştirme sürecine odaklanılması büyük önem arz etmektedir. Özellikle teknoloji anlamında daha güçlü olan merkez AB ülkelerinin bu teknolojik yenilik avantajıyla diğer AB ülkelerine göre daha etkin olmaktadır. Bu sebeple, enerji tüketiminin ve sera gazı emisyonlarının azaltılmasına yönelik teknolojik gelişmeler sektörün etkinliğini sağlamada büyük önem arz etmektedir. Bu çerçevede uygulanacak adımlar ise, enerji sistemi dönüşümü,

yatırımların düşük karbonlu teknolojilere doğru belirgin bir şekilde yeniden tahsis edilmesi gibi adımları içermektedir (Fragkos vd. 2021). Etkinliği düşük olan ülkeler yeşil ulaştırma sistemi inşasına devam etmeli ve sera gazı ile ilgili emisyonları azaltmalılardır.

Taşımacılığın sürdürülebilirliğini iyileştirmeye yönelik çalışmaların çoğu, fosil yakıttan kaynaklanan sera gazı emisyonlarının azaltılması, altyapının iyileştirilmesi ve demiryolu ve suyollarını kullanan yük taşımacılığının payını artırmaya ve ayrıca yenilenebilir kaynaklardan ulaştırma enerjisinin payını artırmaya yönelik politikaların teşvik edilmesi gibi önlemlerden geçmektedir (Gruetzmacher vd. 2020). Aylak temelli VZA sonuçlarımız Djordjević ve Krmac (2019), Domagała ve Kadłubek (2022), Wang vd. (2022b) ve Io Storto ve Evangelista (2023) çalışmalarıyla büyük oranda benzerlik göstermektedir.

Analizin ikinci kısmında ise AB'nin ulaştırma sektörünün sürdürülebilirlik performansının fayda ve maliyet kıstasları gibi çatışan kriterleri değerlendirmede oldukça başarılı olan ÇKKV yöntemleri ile gerçekleştirilmektedir. Bu sayede hem enerji etkinliği hem de sürdürülebilirlik performansı değerlendirilerek analize bütünsel bir çerçeve kazandırılmak amaçlanmaktadır. Analizde bu kısımda kullanılan değişkenler ulaştırma sektöründe sürdürülebilirlik çalışmaları ve AB'nin sürdürülebilirlik ile ilgili hedefleri temel alınarak belirlenmiştir. Bu çerçevede, Bojković vd. (2010), Wang vd. (2022b), Siksnelyte-Butkiene ve Streimikiene (2022) çalışmaları dikkate alınarak kriterler belirlenip AB ülkelerinin ulaştırma sektörü sürdürülebilirlik performansı değerlendirilmektedir. ÇKKV analizinde ilk aşama kriterler orta konulduktan sonra ağırlıkların belirlenmesidir. Bu amaçla çalışmada ağırlıkların belirlenmesinde objektif bir ağırlıklandırma yöntemi olan Shannon entropi tekniği kullanılmıştır. Shannon entropi tekniği kullanılarak elde edilen objektif kriter ağırlıklarına Tablo 8'de yer verilmektedir.

Tablo 8. AB Ülkelerinin Ulaştırma Sektöründeki Enerji Sürdürülebilirliği İçin Shannon Entropi Tekniği ile Elde Edilen Kriter Ağırlıkları

Kriterler	Kriter Ağırlıkları
Ulaştırma Sektöründe Nihai Enerji Tüketimi	0,201
Ulaştırma Sektöründe Sera Gazı Salınımı	0,206
Ulaştırma Sektöründe Yenilenebilir Enerji Üretimi	0,220
Ulaştırma Sektöründe İstihdam Edilen Kişi Sayısı	0,191
Ulaştırma Sektöründe Gerçekleşen Ciro Miktarı	0,181

Kaynak: Yazar Hesaplaması.

Entropi yöntemiyle kriter ağırlıkları belirlendikten sonra ÇKKV yöntemleriyle analizin gerçekleştirilmesine başlanmaktadır. Aynı şekilde, daha güvenilir analiz sonuçları elde etmek için AB ülkeleri GSYH seviyelerine göre gelişmiş ve gelişmekte olan iki gruba ayrılarak performansları analiz edilmektedir. AB ülkelerinin ulaştırma sektörü sürdürülebilirlik analizi ilk olarak en önemli ÇKKV yöntemlerinden biri olan TOPSIS tekniği kullanılarak gerçekleştirilmektedir. TOPSIS tekniği ile gerçekleştirilen analiz sonuçlarına sırasıyla Tablo 9 ve Tablo 10'da yer verilmektedir.

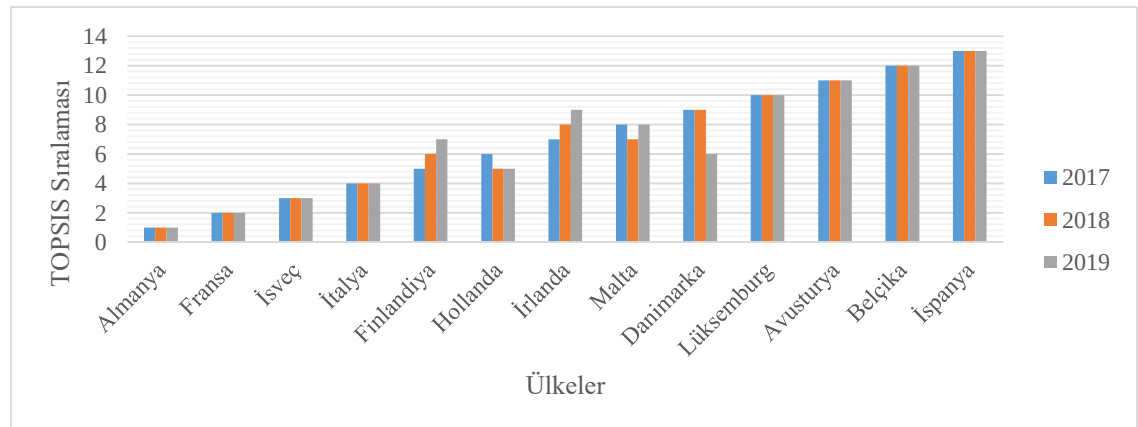
Tablo 9. Gelişmiş AB Ülkelerinin Ulaştırma Sektöründeki Enerji Sürdürülebilirliğinin TOPSIS Yöntemiyle Gerçekleştirilen Analiz Sonuçları

Gelişmiş AB Ülkeleri Grubu	Performans Puanı (2017)	Performans Sıralaması (2017)	Performans Puanı (2018)	Performans Sıralaması (2018)	Performans Puanı (2019)	Performans Sıralaması (2019)
Almanya	0,594	1	0,599	1	0,595	1
Fransa	0,511	2	0,508	2	0,501	2
İsveç	0,474	3	0,471	3	0,466	3

İtalya	0,461	4	0,454	4	0,465	4
Finlandiya	0,442	5	0,434	6	0,437	7
Hollanda	0,442	6	0,443	5	0,460	5
İrlanda	0,436	7	0,431	8	0,432	9
Malta	0,436	8	0,431	7	0,435	8
Danimarka	0,435	9	0,430	9	0,443	6
Lüksemburg	0,431	10	0,426	10	0,429	10
Avusturya	0,428	11	0,422	11	0,428	11
Belçika	0,425	12	0,419	12	0,425	12
İspanya	0,408	13	0,409	13	0,422	13

Kaynak: Yazar Hesaplaması.

Elde edilen TOPSIS analiz sonuçlarına göre, gelişmiş AB ülkeleri arasında Almanya analiz dönemi boyunca en iyi performans gösteren ülke olurken onu sırasıyla Fransa, İsveç ve İtalya izlemiştir. Başarılı performans gösteren ülkelerde özellikle yenilebilir enerjiye yatırımların önemli ölçüde pay sahibi olduğu söylenebilir. Bu ülkeler büyük fosil yakıtlara olan bağımlılığını azaltmış durumdadır. Yenilebilir enerjideki bu başarı ise hem sürdürülebildiği hem de enerji güvenliğine katkı vermektedir. Bu alandaki gelişmeler aynı zamanda ekonominin büyümesine de katkı vermektedir. Ayrıca, analiz dönemi boyunca çoğu ülke istikrarlı bir performans göstererek genel anlamda performans sıralamasını muhafaza etmiştir. Gelişmiş AB ülkeleri için analiz dönemi boyunca elde edilen TOPIS performans sıralamasına Şekil 16'da yer verilmektedir.



Şekil 16. Gelişmiş AB Ülkeleri İçin Analiz Dönemi Boyunca Elde Edilen TOPSIS Performans Sonuçlarının Sıralaması

Şekil 16’da görüleceği üzere, performans sıralaması özellikle başarılı ülkelerde değişiklik göstermezken diğer ülkelerde ufak değişiklikler görülmüştür.

Gelişmiş AB ülkeleri analiz edildikten sonra ikinci kısımda gelişmekte olan AB ülkelerinin performans analiz sonuçlarına Tablo 10’da yer verilmektedir.

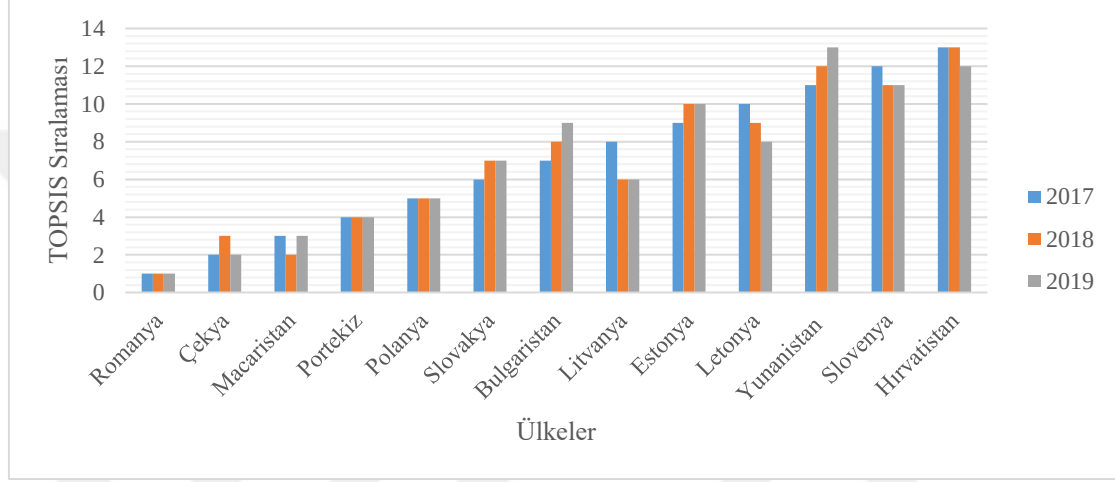
Tablo 10. Gelişmekte Olan AB Ülkelerinin Ulaştırma Sektöründeki Enerji Sürdürülebilirliğinin TOPSIS Yöntemiyle Gerçekleştirilen Analiz Sonuçları

Gelişmekte Olan AB Ülkeleri Grubu	Performans Puanı (2017)	Performans Sıralaması (2017)	Performans Puanı (2018)	Performans Sıralaması (2018)	Performans Puanı (2019)	Performans Sıralaması (2019)
Romanya	0,597	1	0,523	1	0,536	1
Çekya	0,555	2	0,517	3	0,525	2
Macaristan	0,546	3	0,519	2	0,520	3
Portekiz	0,532	4	0,516	4	0,514	4
Polanya	0,512	5	0,516	5	0,505	5
Slovakya	0,511	6	0,492	7	0,500	7
Bulgaristan	0,507	7	0,491	8	0,495	9
Litvanya	0,502	8	0,492	6	0,503	6
Estonya	0,496	9	0,485	10	0,494	10
Letonya	0,489	10	0,488	9	0,496	8
Yunanistan	0,488	11	0,474	12	0,467	13
Slovenya	0,486	12	0,480	11	0,492	11
Hırvatistan	0,481	13	0,464	13	0,489	12

Kaynak: Yazar Hesaplaması.

Gelişmekte olan AB ülkelerinde Romanya, Çekya ve Macaristan’ın sürdürülebilirlik performansı bakımından gruptaki diğer AB ülkelerine göre daha iyi performans gösterdikleri görülmektedir. İyi performans gösteren bu ülkelerde özellikle yenilebilir enerji, ciro ve istihdamdaki verilerin büyük rol oynadığı görülmektedir. Elde edilen analiz sonuçlarına göre, sürdürülebilirlik performansında başarılı olan bu ülkelerde gruptaki diğer ülkelere kıyasla

kullandıkları yenilebilir enerji miktarındaki fazlalığın büyük oranda etkili olduğu görülmektedir. Diğer taraftan, Yunanistan, Slovenya ve Hırvatistan'ın ulaşım sektörünün sürdürülebilirlik performansı görece daha düşük kalmıştır. Gelişmekte AB ülkeleri için analiz dönemi boyunca elde edilen TOPSIS performans sıralamasına Şekil 17'de yer verilmektedir.



Şekil 17. Gelişmekte Olan AB Ülkeleri İçin Analiz Dönemi Boyunca Elde Edilen TOPSIS Performans Sonuçlarının Sıralanması

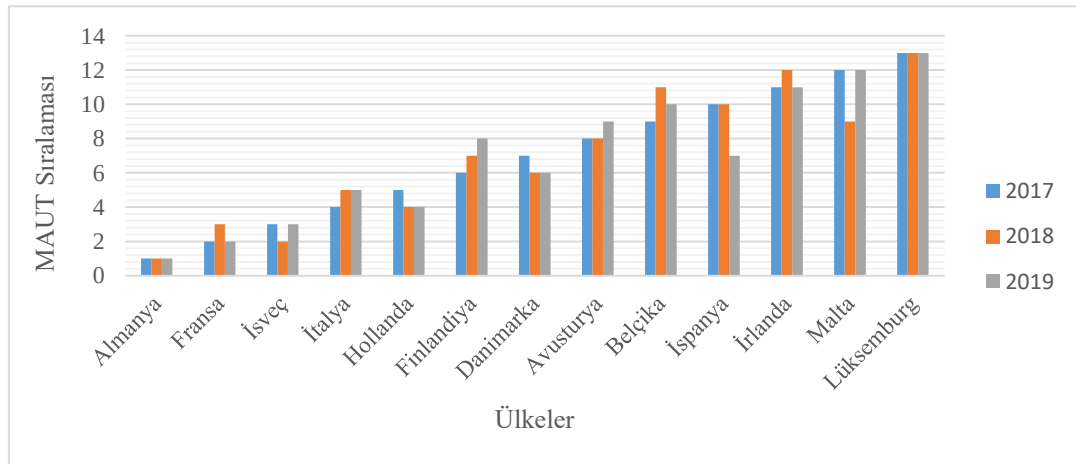
Şekil 17'de görüleceği üzere, analiz dönemi boyunca gelişmekte olan AB ülkelerinde sürdürülebilirlik bakımından TOPSIS yönteminde istikrarlı bir performans görülmektedir.

AB ülkelerinin sürdürülebilirlik performansı TOPSIS yöntemiyle değerlendirildikten sonra analiz diğer bir ÇKKV yöntemlerinden biri olan MAUT yöntemiyle gerçekleştirilerek çalışmanın güvenilirliği ve istikrarı artırılması amaçlanmaktadır. Gelişmiş AB grubunun MAUT tekniği ile gerçekleştirilerek elde edilen analiz sonuçlarına Tablo 11'de yer verilmektedir.

Tablo 11. Gelişmiş AB Ülkelerinin Ulaştırma Sektöründeki Enerji Sürdürülebilirliğinin MAUT Yöntemiyle Gerçekleştirilen Analiz Sonuçları

Gelişmiş AB Ülkeleri Grubu	Performans Puanı (2017)	Performans Sıralaması (2017)	Performans Puanı (2018)	Performans Sıralaması (2018)	Performans Puanı (2019)	Performans Sıralaması (2019)
Almanya	0,594	1	0,593	1	0,594	1
Fransa	0,510	2	0,491	3	0,513	2
İsveç	0,499	3	0,493	2	0,500	3
İtalya	0,453	4	0,446	5	0,474	5
Hollanda	0,445	5	0,456	4	0,477	4
Finlandiya	0,437	6	0,424	7	0,428	8
Danimarka	0,433	7	0,429	6	0,434	6
Avusturya	0,426	8	0,420	8	0,425	9
Belçika	0,417	9	0,417	11	0,415	10
İspanya	0,411	10	0,411	10	0,432	7
İrlanda	0,410	11	0,407	12	0,414	11
Malta	0,406	12	0,412	9	0,406	12
Lüksemburg	0,402	13	0,397	13	0,401	13

Gelişmiş AB ülkeleri grubunun MAUT yöntemi analiz sonuçlarına göre, Almanya, Fransa ve İsveç'in sürdürülebilirlik performansının görece daha yüksek olduğu gözlemlenmektedir. Lüksemburg ise gelişmiş ülkeler grubunda diğer ülkelere göre daha düşük performans gösterdiği belirlenmiştir. Gelişmiş AB ülkeleri için analiz dönemi boyunca elde edilen MAUT performans sıralamasına Şekil 18'de yer verilmektedir.



Şekil 18. Gelişmiş AB Ülkeleri İçin Analiz Dönemi Boyunca Elde Edilen MAUT Performans Sonuçlarının Sıralanması

Gelişmiş olan AB ülkelerinde analiz dönemi boyunca MAUT yöntemiyle elde edilen sürdürülebilirlik performans sıralaması büyük ölçüde TOPSIS yöntemiyle elde edilen performansla benzerlik göstermektedir. Gelişmiş AB ülkeleri MAUT yöntemiyle analiz edildikten sonra analize ikinci gruba devam edilmektedir. Gelişmekte olan AB ülkelerinin MAUT yöntemiyle elde edilmiş analiz sonuçlarına Tablo 12’de yer verilmektedir.

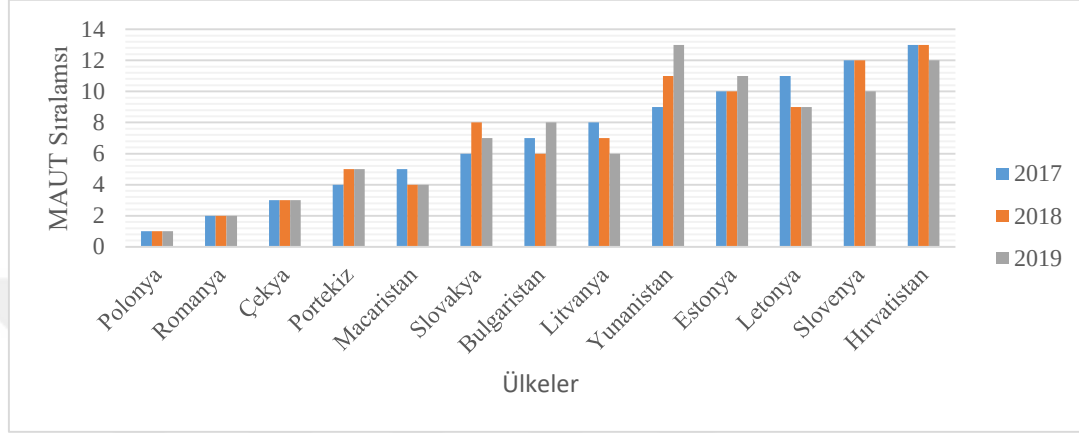
Tablo 12. Gelişmekte Olan AB Ülkelerinin Ulaştırma Sektöründeki Enerji Sürdürülebilirliğinin MAUT Yöntemiyle Gerçekleştirilen Analiz Sonuçları

Gelişmekte Olan AB Ülkeleri Grubu	Performans Puanı (2017)	Performans Sıralaması (2017)	Performans Puanı (2018)	Performans Sıralaması (2018)	Performans Puanı (2019)	Performans Sıralaması (2019)
Polonya	0,584	1	0,584	1	0,576	1
Romanya	0,548	2	0,503	2	0,514	2
Çekya	0,544	3	0,499	3	0,504	3
Portekiz	0,536	4	0,492	5	0,486	5
Macaristan	0,535	5	0,494	4	0,490	4
Slovakya	0,464	6	0,442	8	0,447	7
Bulgaristan	0,462	7	0,444	6	0,442	8
Litvanya	0,456	8	0,443	7	0,448	6
Yunanistan	0,445	9	0,417	11	0,416	13
Estonya	0,420	10	0,418	10	0,425	11
Letonya	0,418	11	0,426	9	0,428	9
Slovenya	0,414	12	0,415	12	0,426	10
Hırvatistan	0,407	13	0,404	13	0,421	12

Kaynak: Yazar Hesaplaması.

Gelişmekte olan AB ülkeleri grubunda, MAUT yöntemi analiz sonuçlarına göre Polonya, Romanya ve Çekya’nın performansı gruptaki diğer AB ülkelerine göre daha iyi olduğu gözlemlenmektedir. Hırvatistan is analiz dönemi boyunca grup içerisinde en kötü

performans gösteren ülke olmuştur. MAUT yönteminin analiz sonuçları TOPSIS yöntemiyle büyük ölçüde benzerlik göstermektedir. Gelişmekte olan AB ülkeleri için analiz dönemi boyunca elde edilen MAUT performans sıralamasına Şekil 19’da yer verilmektedir.



Şekil 19. Gelişmekte Olan AB Ülkeleri İçin Analiz Dönemi Boyunca Elde Edilen MAUT Performans Sonuçlarının Sıralaması

Şekil 19’da görüleceği üzere MAUT yöntemiyle elde edilen bulgularda analiz dönemi boyunca en iyi performans gösteren ülkeler yerlerini korurken diğer ülkeler küçük çaplı performans değişiklikleri yaşamıştır.

Son olarak, AB ülkelerinin sürdürülebilirlik performansı önde gelen ÇKKV yöntemlerinden biri olan VIKOR yöntemiyle analiz edilmektedir. VIKOR yöntemiyle gerçekleştirilen analiz sonuçlarına gelişmiş ve gelişmekte olan AB ülkeleri için sırasıyla Tablo 13 ve 14’de yer verilmektedir.

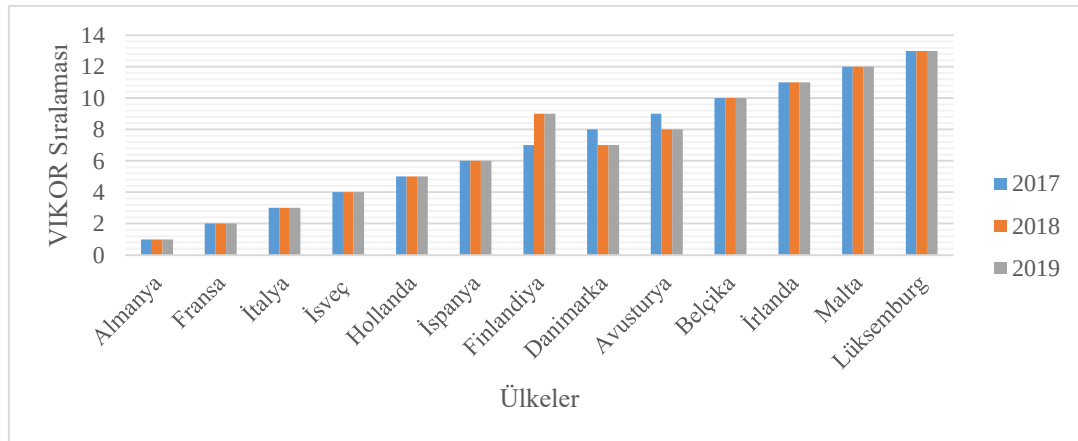
Tablo 13. Gelişmiş AB Ülkelerinin Sürdürülebilirlik Performansının VIKOR Yöntemiyle Gerçekleştirilen Analiz Sonuçları

Gelişmekte Olan AB Ülkeleri Grubu	Performans Puanı (2017)	Performans Sıralaması (2017)	Performans Puanı (2018)	Performans Sıralaması (2018)	Performans Puanı (2019)	Performans Sıralaması (2019)
Almanya	0,223	1	0,220	1	0,220	1

Fransa	0,406	2	0,464	2	0,386	2
İtalya	0,512	3	0,527	3	0,434	3
İsveç	0,576	4	0,582	4	0,566	4
Hollanda	0,732	5	0,674	5	0,606	5
İspanya	0,739	6	0,692	6	0,625	6
Finlandiya	0,838	7	0,891	9	0,866	9
Danimarka	0,852	8	0,850	7	0,844	7
Avusturya	0,861	9	0,866	8	0,857	8
Belçika	0,891	10	0,908	10	0,891	10
İrlanda	0,945	11	0,942	11	0,928	11
Malta	0,984	12	0,946	12	0,981	12
Lüksemburg	0,998	13	0,998	13	0,997	13

Kaynak: Yazar Hesaplaması

Gelişmiş AB ülkeleri grubunda VIKOR analizi sonuçlarına göre Almanya, Fransa ve İtalya'nın gruptaki diğer gelişmiş AB ülkelerine kıyasla daha iyi performans gösterdikleri görülmektedir. Özellikle bu ülkelerin ulaştırma konusunda gerçekleştirdikleri yatırımların bu performansta etkili olduğu söylenebilir. Diğer taraftan, Malta ve Lüksemburg gibi küçük ölçekli AB ülkelerinin sürdürülebilirlik konusunda performanslarının yetersiz kaldıkları söylenebilir. Gelişmiş AB ülkeleri için analiz dönemi boyunca elde edilen VIKOR performans sıralamasına Şekil 20'de yer verilmektedir.



Şekil 20. Gelişmiş AB Ülkeleri İçin Analiz Dönemi Boyunca Elde Edilen VIKOR Performans Sonuçlarının Sıralanması

Şekil 20’de görüleceği üzere, başarılı olan ülkelerin performans sıralamasında küçük değişiklikler yaşandığı görülürken performansı görece kötü olan ülkelere sıralamada değişiklik görülmemiştir.

Son olarak, gelişmekte olan AB ülkelerin sürdürülebilirlik performansının VIKOR yöntemiyle elde edilmiş analiz sonuçlarına Tablo 14’de yer verilmektedir.

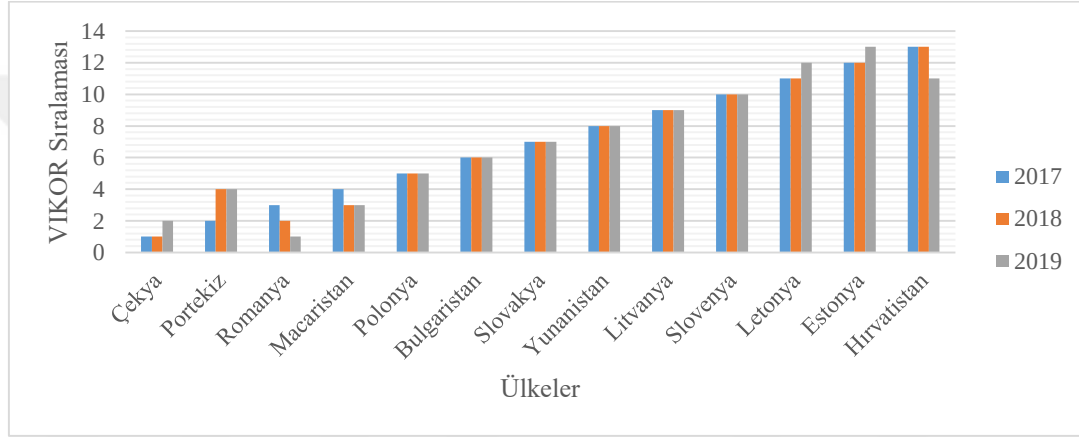
Tablo 14. Gelişmekte Olan AB Ülkelerinin Sürdürülebilirlik Performansının VIKOR Yöntemiyle Gerçekleştirilen Analiz Sonuçları

Gelişmekte Olan AB Ülkeleri Grubu	Performans Puanı (2017)	Performans Sıralaması (2017)	Performans Puanı (2018)	Performans Sıralaması (2018)	Performans Puanı (2019)	Performans Sıralaması (2019)
Çekya	0,099	1	0,128	1	0,285	2
Portekiz	0,290	2	0,380	4	0,474	4
Romanya	0,290	3	0,248	2	0,176	1
Macaristan	0,355	4	0,315	3	0,369	3
Polonya	0,366	5	0,448	5	0,500	5
Bulgaristan	0,677	6	0,641	6	0,672	6
Slovakya	0,678	7	0,690	7	0,678	7
Yunanistan	0,698	8	0,737	8	0,778	8
Litvanya	0,791	9	0,814	9	0,825	9
Slovenya	0,939	10	0,866	10	0,825	10
Letonya	0,953	11	0,905	11	0,884	12
Estonya	0,966	12	0,958	12	0,890	13
Hırvatistan	0,980	13	0,967	13	0,834	11

Kaynak: Yazar Hesaplaması.

Gelişmekte olan AB ülkeleri grubunda VIKOR analizi sonuçlarına göre de, Romanya, Çekya, Portekiz ve Macaristan gibi ülkelerin grup içerisindeki diğer ülkelere kıyasla daha iyi performans gösterdikleri görülmüştür. Diğer taraftan Hırvatistan ve Estonya gibi ülkelerin performansının oldukça yetersiz kaldığı görülmektedir. ÇKKV analiz sonuçları

bir bütün olarak ele alındığında genel anlamında kıt enerji kaynağını etkin kullanan ve fosil enerji kaynaklarına olan bağımlılığını bitirmek adına erken adım atmış ve enerji kaynaklarında çeşitlendirmeye gidebilmiş ülkelerin sürdürülebilirlik konusunda başarılı oldukları ve diğer AB ülkeleri için emsal olabilecekleri ifade edilebilir. Son olarak, gelişmekte olan AB ülkeleri için analiz dönemi boyunca elde edilen VIKOR performans sıralama sonuçlarına Şekil 21’de yer verilmektedir.



Şekil 21. Gelişmekte Olan AB Ülkeleri İçin Analiz Dönemi Boyunca Elde Edilen

VIKOR Performans Sonuçlarının Sıralaması

Şekil 21’de görüleceği üzere, analizdeki diğer yöntemlerde olduğu gibi performans sıralaması birbirine yakın düzeyde seyretmiştir.

Genel olarak, ÇKKV analizinde kullanılan bütün tekniklerde birbirine yakın sonuçlar elde edilmiştir. Bu çerçevede elde edilen analiz bulguların istikrarı ve güvenilirliği sağlanmıştır.

DÖRDÜNCÜ BÖLÜM

SONUÇ VE DEĞERLENDİRME

Ulaştırma sektörü ekonomik gelişim için olmazsa olmaz sektörlerden biridir. Ekonomik gelişim ise beraberinde çevresel yozlaşmayı getiren bir süreçtir. Bu kapsamda, enerji etkinliğinin hakim olduğu bir şekilde ülkelerin ekonomik faaliyetini gerçekleştirmeli ve bu çerçevede politika geliştirilmelidir. Ulaştırma sektörü, AB’de en çok enerji tüketen sektörlerin başında gelmektedir. Bu sebepten ötürü, kaynakların etkin kullanılması ve sürdürülebilir gelişimin sağlanması bir zorunluluk haline gelmektedir. Literatürdeki çoğu çalışma enerji sektörüne odaklanmışken analizimiz AB’de ulaştırma sektörünün sürdürülebildiği ve enerji etkinliğiyle ilgili çok az çalışmanın olduğu bir alanda gerçekleştirilmektedir. Bu alana odaklanılmış olunması, çalışmamızın literatüre temel katkılarından biri olarak değerlendirilebilir. Ayrıca, literatürde yer alan mevcut çalışmalar genellikle ulaştırma sektörünün alt bileşenlerinden herhangi birine odaklanırken çalışmamız ulaştırma sektörünün enerji etkinliğini ve sürdürülebilirliğini bütünsel olarak analiz etmektedir. Özellikle uzun bir dönem boyunca yenilebilir olmayan fosil yakıtların kullanılmış olması ve bu sebepten ötürü çevreye ve insan sağlığına verilen olumsuz etkiler enerji etkinliğinin ve sürdürülebilirliğinin araştırılmasını gerekli kılmaktadır. Enerji etkinliği, elde bulunan kıt kaynakların etkin şekilde kullanılmasını ifade ederken sürdürülebilirlik ise temel olarak uzun vadede temiz enerjiye ulaşılmasını amaçlamaktadır. Bu amaçla, çalışmada AB ülkelerinde enerji kaynaklarının en önde gelen tüketicilerinden biri olan ulaştırma sektöründeki iklim değişikliğini hafifletmeye yönelik temel ayaklar olan enerji etkinliği ve sürdürülebilirlik performansının araştırılması amaçlanmaktadır. Çalışmada öncelikle AB ülkelerinin ulaştırma sektörünün etkinliği aylak temelli VZA yaklaşımıyla değerlendirilmektedir. Analizde AB ülkelerini daha doğru bir değerlendirmeye tabi

tutabilmek adına GSYH seviyelerine göre gelişmiş ve gelişmekte olan ülkeler olmak üzere iki gruba ayrılmıştır. Analizde ulaştırma sektörünün en temel istenmeyen çıktılarından biri olan sera gazı emisyonunu modele dahil edebilen aylak temelli VZA yaklaşımı kullanılmıştır. Bu sayede sadece girdi ve çıktıyı analizde kullanabilen geleneksel VZA yönteminin bu temel eksikliği giderilip daha isabetli ve güvenilir analiz sonucu elde edilebilmektedir. Bu yöntemle mevcut kaynaklarını en etkin şekilde kullanıp aynı zamanda en iyi finansal çıktıya ulaştığı gözlemlenebilmektedir. Aylak temelli VZA yaklaşımının önemli sonuçları bulunmaktadır. Aylak temelli VZA sonuçlarına göre, gelişmiş AB ülkelerinde Danimarka, Finlandiya, Almanya, İtalya, Fransa ve Malta olmak üzere 6 ülke analiz dönemi boyunca etkin sınırdaki yer almışlardır. Bu ülkeler büyük oranda grubun GSYH'nin ortalamadan yüksek olduğu ülkeler olarak göze çarpmaktadır. Özellikle ekonomik gelişmişlik ve teknolojik ilerleme bu ülkelerdeki etkinliğe büyük ölçüde katkı sunmaktadır. Örneğin, Almanya, enerji geçişi veya “Energiewende” kapsamında, yeni iklim yasasına göre 2045 yılına kadar net sıfır sera gazı emisyonu taahhüdünde bulunmuştur (Thimet ve Mavromatidis, 2022). Ayrıca, ulaştırma alanındaki yenilik yatırımlarıyla Almanya uzun zamandır öncü bir ülke olmuştur (Wagner, 2008). Bu kapsamda geliştirilebilecek en önemli önlemler ulaşım sistemindeki teknolojik iyileşmeye yönelik önlemler, diğer bir deyişle bu alandaki araştırma geliştirme faaliyetlerine yönelik yapılan harcamaların artırılması, elektrikli araçların ulaşımındaki payının artırılması, sektörde yenilenebilir enerji üretiminin payının artırılması gibi araçlarla gerçekleştirilebilmektedir (Djordjević ve Krmar, 2019). AB'nin 2050 sıfır karbon hedefine ulaşmada elektrikli araçların önemli bir payı olacaktır. Bu çerçevede elektrikli araçların payı AB'de son döneme %11'e kadar ulaşarak gitgide artış gösterip sektörün enerji etkinliğine katkı vermektedir. Elektrikli araçlara teşvik ve vergi desteklerinin sürdürülmesi ve artırılması enerji etkinliği için büyük önem arz etmektedir.

Diğer taraftan Lüksemburg ve İrlanda bu gruptaki diğer ülkelere göre etkin sınıra daha uzak konumda kalmışlardır. Bu grupta AB'nin köklü ülkelerinin büyük ölçüde etkin oldukları görülmektedir. Bu etkinlik seviyesine ulaşmada en büyük katkıyı ulaştırma sektöründe gerçekleştirdikleri teknolojik ilerlemenin verdiği belirtilebilir. Örneğin bu gruptaki en kalkınmış ülkeler toplam bazda bakıldığında diğer ülkelere göre daha fazla enerji tüketmesine ve sera gazı salınımı yapmasına rağmen ciro başına düşen enerji tüketimi ve sera gazı salınımı ve çalışan sayısına bakıldığında gruptaki diğer ülkelere göre çok daha iyi etkinlik sergiledikleri görülmektedir. Bu sonuç Wang vd. (2022b) çalışmasında elde edilen sonuçla birebir benzer bir sonuçtur. Wang vd. (2022b) çalışmalarında endüstrisi ileri ve gelişmiş ülkelerin daha etkin olduğu sonucuna varırken daha küçük ülkelerin daha az enerji tüketimi ve sera gazı salınımı gerçekleştirmelerine rağmen görece etkinliğe ulaşmada daha zorlandığını tespit etmiştir. Aynı şekilde ölçek bakımından düşünüldüğünde birbirine yakın ülkeler olan Malta ve Lüksemburg'da etkinlik oldukça farklı seviyelerde gerçekleşmiştir. Yine toplam bazında bakıldığında Malta'nın ulaştırma sektöründe elde ettiği cironun Lüksemburg'dan daha düşük olduğu görülmektedir. Ancak ciro başına düşen enerji tüketimi ve sera gazı gibi verileri ele aldığımızda Malta Lüksemburg'a göre oldukça iyi durumda olduğu görülmektedir. Bir başka deyişle, Malta kendisine yakın ölçekteki Lüksemburg'a göre mevcut girdilerini yani kaynaklarını çok daha etkin kullandığı ifade edilebilir. Ayrıca gelişmiş AB ülkeleri grubu analiz döneminde etkinliğini artırırken gelişmekte olan AB ülkeleri grubu analiz döneminde etkinlik kaybı yaşamışlardır. Gelişmekte olan AB ülkeleri grubunda ise Estonya ve Letonya gibi Baltık ülkeleri analiz döneminin tamamında etkin olmuşlardır. Ayrıca, beklenildiği gibi gelişmiş ülkelerin ortalama etkinlik seviyesi gelişmekte olan ülkelerin ortalama etkinlik seviyelerinden çok daha yüksek seviyede gerçekleşmiştir. Etkin olan bu ülkeler aynı gruptaki etkin olmayan ülkeler için bir kıyaslama

hedefi oluşturmaktadır. Etkin olmayan ülkeler kaynak israflarını azaltarak etkin olma yolunda ilerleyebilirler.

Çalışmanın ikinci kısmında ise AB ülkelerinin ulaştırma sürdürülebilirlikleri birbiriyle ters düşen yani fayda ve maliyet kriterlerini içeren yapıları değerlendirmede oldukça başarılı olan ÇKKV yöntemleri ile kıyaslamamalı ve kapsamlı bir şekilde gerçekleştirilmektedir. İklim değişikliğiyle mücadele çabaları sürdürülebilir kalkınma için büyük önem arz ettiği için ulaştırma sektörünün sürdürülebilirliğinin incelenmesi büyük önem arz etmektedir. Öncelikle ÇKKV yöntemlerinin çözümünde ağırlıklandırma aşaması geldiği için bu aşamada ana veri seti üzerinden hesaplanan objektif ağırlıklandırma yöntemlerinden biri olup Shannon tarafından geliştirilmiş olan entropi yöntemi kullanılmaktadır. Entropi yöntemi ağırlıklandırması kriterlere birbirine çok yakın düzeyde ağırlık atama sonucu elde etmiştir. Ağırlık aşaması objektif yöntemle gerçekleştirildikten sonra ise AB ülkelerinin ulaştırma sürdürülebilirlik performans değerlendirmesi TOPSIS, MAUT ve VIKOR teknikleri yardımıyla karşılıklı olarak belirlenmektedir. Etkinlik analizinde olduğu gibi AB ülkeleri GSYH seviyelerine göre iki gruba ayrılarak analiz edilmektedir. AB ülkelerinin performans sonuçları uygulanan bütün yöntemlerde büyük ölçüde uyum göstermektedir. Gelişmiş AB ülkeleri grubunda analiz dönemi boyunca Almanya, İtalya, İsveç ve gibi GSYH bakımından iyi durumda bulunan ülkelerin daha iyi performans gösterdikleri gözlemlenmektedir. Bu sonuç, Cámara-Aceituno vd. (2023) ve lo Storto ve Evangelista, (2023) çalışmalarında elde edilen sonuçlara benzer bir sonuçtur. Bu ülkelerin ulaştırma sektörüne yapmış oldukları ileri seviyedeki yatırım ve Ar-ge harcamasının bu performansa ciddi oranda katkı verdiği söylenebilir. Politika açısından bakıldığında bu, daha yüksek düzeyde performans elde eden ülkelerin, ulusal ulaştırma altyapısına yatırımı artırarak ve/veya mevcut altyapıların modernizasyonunu dijital

teknolojinin desteğiyle artırarak küresel performanslarını iyileştirdiklerini ve ilerlemenin daha yetersiz performans gösteren ülkeler için bir yol haritası olarak gösterilebilir.

Ayrıca yenilebilir enerji politikalarının ve bunun sonucu olarak yenilebilir üretim miktarlarının da bu performanslarda önemli etkisi olduğundan bahsedilebilir. Örneđin, AB'nin en gelişmiş ülkelerinden biri olan Almanya'daki yenilebilir enerji üretimi farklı kaynaklarla son dönemde ciddi artış göstermiştir (Khan vd. 2022). Aynı şekilde, bu ülkelerde elektrikli araçlara geçişte yaşanan hızlı artışın da Sera Gazı salınımının azaltılmasına yönelik yaptđđ olumlu katkının da sürdürülebilirlik performansı seviyesindeki üstünlükte pay sahibi olduğu söylenebilir (Sierpiński, 2019). Araçlardaki emisyonu azaltmanın yolları, ya araç verimliliğini artırmak yani mevcut yakıt tüketiminde tasarrufa geçecek tedbirler almak ya da içten yanmalı motorlara alternatif olarak geliştirilen ve son dönemde popülaritesini git gide artıran elektrikli araçlara geçiş yapmaktır (Domagała ve Kadłubek, 2022). Çođu AB ülkesinde emisyonu azaltmak için elektrikli araçlara teşvikler verilirken içten yanmalı araçlara erişimi zorlaştıracak önlemler alınmaktadır. Özellikle elektrikli araçlara sağlanan elektriğin kaynağının yenilebilir enerji kaynakları olması ile birlikte AB'nin salınımla ilgili koyduğu hedeflere daha kolay ulaşılabileceği düşünülmektedir. Aynı şekilde ulaştırmanın diğer kesimlerinde de yani havacılık ve denizcilikte de emisyonlar kara ulaşımında olduğu kadar yüksek olmasa da sürdürülebilir kaynaklara geçilmesi AB için toplam salınımın azaltılması için bir gereklilik olarak ortaya çıkmaktadır. Bir aracın sera gazı salınımı hesaplanırken, aracın çalışması sırasında üretilen miktara ek olarak kullandığı enerjinin nerede üretildiğinin de hesaba katılması gerekir. Elektrikli araçlar, gücün nasıl üretildiğine bağlı olarak farklı türde kirletici maddeler açığa çıkarır ve bunların üretimi veya depolanması, içten yanmalı motorlu otomobiller kadar evre dostu değildir. Ancak Avrupa'daki ortalama enerji karışımı göz önüne alındığında, elektrikli otomobillerin benzinle

alışan araçlara göre evre açısından daha temiz olduğu şimdiden bilinmektedir. Özellikle, elektrikli araçlara verilen teşvikler ve vergi indirimlerine ağırlık veren AB ülkelerin performans seviyelerinde avantaj sağladıkları söylenebilir. Alternatif olarak, zamanla enerji etkinliği ve sürdürülebilirliği azalan ülkeler için, kullanılan enerji kaynaklarının verimliliğini artırmak veya alternatif yakıtların benimsenmesiyle ilgili maliyetleri azaltmayı amaçlayan mali önlemler yoluyla zararlı emisyonları azaltmak için alternatif yakıtların kullanımını teşvik etmek yararlı olacaktır. Bütün bu sonuçlar ışığında AB lkelerinin enerji etkinliği ve sürdürülebilirliği komsunda karalıktan taviz vermeden ve yenilebilir enerji kaynaklarına yatırımını artırarak ulaştırma sektörü faaliyetlerine devam etmeleri ifade edilebilir.

Nihai olarak, analizimizde elde edilen bulguların sektördeki tüm paydaşlara ve karar vericilere katkı sağlayacağı düşünülmektedir. Ulaştırmanın enerji etkinliğinin ve sürdürülebilirliği açısından ülkelerin bilgilendirilmesi ve bir ülkenin diğerlerine göre konumunun bilinmesi politika yapıcılara yardımcı olacaktır. Bu sayede düşük seviyede performans ortaya koyan ülkelerin performans artışı yapmaları gerektiği de ortaya konulmaktadır. Benzer şekilde bazı ülkeler enerji etkinliği komsunda oldukça başarılı olurken sürdürülebilirlik konusunda bu başarıyı gösterememiştir. Bu lkeler de ilgili alana çabalarını yoğunlaştırması ulaştırma sektörünün uzun vadeli hedeflerini gerçekleştirmede faydalı olacağı düşünülmektedir. Bu sayede, ilgili alanlara kaynaklar aktarılarak israfın da önüne geçilmiş olunabilir. Özellikle VZA ve ÇKKV gibi karar tekniklerinin yeterli performans gösteremeyen ülkelerin mevcut durumlarını ortaya koyup gelecek adına mevcut seviyelerini artırmalarında fayda vereceği düşünülmektedir.

KAYNAKÇA

- AACB Web sitesi (2023). Erişim Linki: <https://www.aacb.com/why-logistics-is-so-important-to-supply-chains> Erişim Tarihi: 28 Haziran 2023.
- Abdelli, A., Mokdad, L., & Hammal, Y. (2020). Dealing with value constraints in decision making using MCDM methods. *Journal of computational science*, 44, 101154.
- Ahmad, N., Hasan, M. G., & Barbhuiya, R. K. (2021). Identification and prioritization of strategies to tackle COVID-19 outbreak: A group-BWM based MCDM approach. *Applied soft computing*, 111, 107642.
- Alonso, A. Monzón, A. & Cascajo, R. (2015). Comparative analysis of passenger transport sustainability in European cities. *Ecological Indicators*, 48, 578-592.
- Amowine, N., Ma, Z., Li, M., Zhou, Z., Yaw Naminse, E., & Amowine, J. (2020). Measuring Dynamic Energy Efficiency in Africa: A Slack-Based DEA Approach. *Energy Science & Engineering*, 8(11), 3854-3865.
- Antoniou, F., & Aretoulis, G. (2019). A multi-criteria decision-making support system for choice of method of compensation for highway construction contractors in Greece. *International Journal of Construction Management*, 19(6), 492-508.
- Avrupa Çevre Ajansı (2023a). Erişim Linki: <https://www.eea.europa.eu/ims/use-of-renewable-energy-for> Erişim Tarihi: 28 Haziran 2023.
- Avrupa Çevre Ajansı (2023b). Erişim Linki: <https://www.eea.europa.eu/ims/greenhouse-gas-emissions-from-transport> Erişim Tarihi: 28 Haziran 2023.

- Avrupa Çevre Ajansı (2023c). Erişim Linki: <https://www.eea.europa.eu/en/topics/in-depth/transport-and-mobility> Erişim Tarihi: 28 Haziran 2023.
- Avrupa Komisyonu (2023a). Erişim Linki: https://cinea.ec.europa.eu/news-events/news/transport-infrastructure-eu-invests-eur-54-billion-support-key-projects-across-continent-2022-06-29_en Erişim Tarihi: 30 Haziran, 2023.
- Avrupa Komisyonu (2023b). Erişim Linki: https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/priorities-2019-2024/european-green-deal_en Erişim Tarihi: 25 Haziran 2023.
- Avrupa Mobilite Atlası (2021). Erişim Linki: https://eu.boell.org/sites/default/files/2021-07/EUMobilityatlas2021_2ndedition_FINAL_WEB.pdf Heinrich-Böll-Stiftung, Avrupa Birliği, İkinci Baskı Bruksel, Belçika.
- Banker, R. D., Charnes, A., and Cooper, W. W. (1984). Some models for Estimating Technical and Scale Inefficiencies in Data Envelopment Analysis *Management Science*, 30(9), 1078-1092.
- Baran, J., & K Górecka, A. (2019). Economic and environmental aspects of inland transport in EU countries. *Economic research-Ekonomska istraživanja*, 32(1), 1037-1058.
- Bask, A. & Rajahonka, M. (2017). The role of environmental sustainability in the freight transport mode choice: A systematic literature review with focus on the EU. *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management*.
- Bogetoft, P., & Otto, L. (2010). *Benchmarking with DEA, SFA, and R* (Vol. 157). Springer Science & Business Media.
- Bojković, N., Anić, I., & Pejčić-Tarle, S. (2010). One solution for cross-country transport-sustainability evaluation using a modified ELECTRE method. *Ecological Economics*, 69(5), 1176-1186.

- Cámara-Aceituno, J., Hermoso-Orzáez, M. J., Terrados-Cepeda, J., Mena-Nieto, Á., & García-Ramos, J. E. (2023). Application of the data envelopment analysis technique to measure the environmental efficiency of the 27 countries of the European Union during the period 2012–2020. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 1-29.
- Cecchini, L., Venanzi, S., Pierri, A., & Chiorri, M. (2018). Environmental efficiency analysis and estimation of CO₂ abatement costs in dairy cattle farms in Umbria (Italy): A SBM-DEA model with undesirable output. *Journal of cleaner production*, 197, 895-907.
- Charnes, A. Cooper, W. W. and Rhodes, E. (1978). Measuring the Efficiency of Decision Making Units, *European Journal of Operational Research*, 2(6), 429-444.
- Charnes, A., Cooper, W., Lewin, A. Y., & Seiford, L. M. (1997). Data envelopment analysis theory, methodology and applications. *Journal of the Operational Research society*.
- Chen, P. (2019). Effects of normalization on the entropy-based TOPSIS Method. *Expert Systems with Applications*.
- Chen, X., Gao, Y., An, Q., Wang, Z., & Neralić, L. (2018). Energy efficiency measurement of Chinese Yangtze River Delta's cities transportation: a DEA window analysis approach. *Energy Efficiency*, 11, 1941-1953.
- Chen, Y., Cheng, S., & Zhu, Z. (2021). Measuring environmental-adjusted dynamic energy efficiency of China's transportation sector: a four-stage NDDF-DEA approach. *Energy Efficiency*, 14, 1-14.
- Chiaramonti, D., Talluri, G., Scarlat, N., & Prussi, M. (2021). The challenge of forecasting the role of biofuel in EU transport decarbonisation at 2050: A meta-analysis review of published scenarios. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 139, 110715.

- Chu, J. F., Wu, J., & Song, M. L. (2018). An SBM-DEA model with parallel computing design for environmental efficiency evaluation in the big data context: a transportation system application. *Annals of Operations Research*, 270, 105-124.
- Cigu, E., Agheorghiesei, D. T., Gavriluță, A. F., & Toader, E. (2018). Transport infrastructure development, public performance and long-run economic growth: a case study for the Eu-28 countries. *Sustainability*, 11(1), 67.
- Coelli, T. J., Rao, D. S. P., O'Donnell, C. J., & Battese, G. E. (2005). *An introduction to efficiency and productivity analysis*. Springer Science & Business Media.
- Coelli, T., Rahman, S., & Thirtle, C. (2002). Technical, allocative, cost and scale efficiencies in Bangladesh rice cultivation: a non-parametric approach. *Journal of Agricultural Economics*, 53(3), 607-626.
- Cook, W. D., Zhu, J. (2017). *Data Envelopment Analysis a Handbook on the Modeling of Internal Structures and Networks*, Volume 208, Springer.
- Cooper, W. W., Seiford, L. M., & Zhu, J. (Eds.). (2011). *Handbook on data envelopment analysis* (Vol. 164). Springer Science & Business Media.
- Cooper, W. W., Seiford, L., and Tone, K. (2006). *Data Envelopment Analysis a Comprehensive Text with Models, Applications, References and DEA-Solver Software*, Springer.
- Cui, Q., & Li, Y. (2019). Investigating the impacts of the EU ETS emission rights on airline environmental efficiency via a Network Environmental SBM model. *Journal of Environmental Planning and Management*, 1-23.

- de Mello, J. C. C. S., Meza, L. A., da Silveira, J. Q., & Gomes, E. G. (2013). About negative efficiencies in cross evaluation BCC input oriented models. *European Journal of Operational Research*, 229(3), 732-737.
- Debreu, G. (1951). The coefficient of resource utilization. *Econometrica* 19(1): 273-292.
- Ding, D., and Sickles, R. C. (2018). “Frontier efficiency, capital structure, and portfolio risk: An empirical analysis of US banks”, *BRQ Business Research Quarterly*, 21(4), 262-277.
- Djordjević, B., & Krmac, E. (2019). Evaluation of energy-environment efficiency of European transport sectors: Non-radial DEA and TOPSIS approach. *Energies*, 12(15), 2907.
- Domagała, J., & Kadłubek, M. (2022). Economic, Energy and Environmental Efficiency of Road Freight Transportation Sector in the EU. *Energies*, 16(1), 461.
- Dong, Y., Xu, Y., Li, H., & Dai, M. (2008). A comparative study of the numerical scales and the prioritization methods in AHP. *European Journal of Operational Research*, 186(1), 229-242.
- Doumpos, M., & Zopounidis, C. (2002). *Multicriteria decision aid classification methods* (Vol. 73). Springer Science & Business Media.
- Du, J., Liang, L., & Zhu, J. (2010). A slacks-based measure of super-efficiency in data envelopment analysis: a comment. *European Journal of Operational Research*, 204(3), 694-697.
- Du, Q., Lu, C., Zou, P. X., Li, Y., Li, J., & Cui, X. (2021). Estimating transportation carbon efficiency (TCE) across the belt and road initiative countries: an integrated approach

of modified three-stage epsilon-based measurement model. *Environmental Impact Assessment Review*, 90, 106634.

Emberger, G. (2017). Low carbon transport strategy in Europe: A critical review. *International Journal of Sustainable Transportation*, 11(1), 31-35.

Energy Education (2023). Erşim Linki: https://energyeducation.ca/encyclopedia/Transportation_energy_use Erşim Tarihi: 27 Haziran, 2023.

Epicoco, N., & Falagario, M. (2022). Decision support tools for developing sustainable transportation systems in the EU: A review of research needs, barriers, and trends. *Research in Transportation Business & Management*, 100819.

Eurostat (2020). Energy, transport and environment statistics 2020 edition Erşim Linki: <https://ec.europa.eu/eurostat/documents/3217494/11478276/KS-DK-20-001-EN-N.pdf/06ddaf8d-1745-76b5-838e-013524781340?t=1605526083000> Erşim Tarihi: 10.04.2023.

Eurostat (2021). Erşim Linki: <https://ec.europa.eu/eurostat/web/products-eurostat-news/-/ddn-20230207-1> Erşim Tarihi: 27 Haziran 2023.

Eurostat (2023a). Transport statistics introduced - Statistics Explained (europa.eu) Erşim Linki: https://ec.europa.eu/eurostat/statisticsexplained/index.php?title=Transport_statistics_introduced#Recent_developments Erşim Tarihi: 10.04.2023.

Eurostat (2023b). Erşim Linki: https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Transport_statistics_introduced#Broad_transport_policies Erşim Tarihi: 12.06.2023.

Eurostat (2023c). Erişim Linki: <https://ec.europa.eu/eurostat/data/database> Erişim Tarihi: 12.06.2023.

Färe, R., Grosskopf, S., & Lovell, C. K. (1984). The structure of technical efficiency. In *Topics in Production Theory* (pp. 81-90). Palgrave Macmillan, London.

Farrell, M. J. (1957). The Measurement of Productive Efficiency, *Journal of the Royal Statistical Society: Series A (General)*, Vol: 120(3), pp.253-281.

Førsund, F. R. & Hjalmarsson, L. (1974). On the measurement of productive efficiency. The Swedish Journal of Economics, 76, 141–154.

Fragkos, P., van Soest, H. L., Schaeffer, R., Reedman, L., Köberle, A. C., Macaluso, N., & Iyer, G. (2021). Energy system transitions and low-carbon pathways in Australia, Brazil, Canada, China, EU-28, India, Indonesia, Japan, Republic of Korea, Russia and the United States. *Energy*, 216, 119385.

Golany, B., & Roll, Y. (1989). An application procedure for DEA. *Omega*, 17(3), 237-250.

Gorton, M., & Davidova, S. (2004). Farm productivity and efficiency in the CEE applicant countries: a synthesis of results. *Agricultural economics*, 30(1), 1-16.

Gökgöz, F. (2010). Measuring the financial efficiencies and performances of Turkish funds. *Acta Oeconomica*, 60(3), 295-320.

Gökgöz, F., & Erkul, E. (2019). Investigating the energy efficiencies of European countries with super efficiency model and super SBM approaches. *Energy Efficiency*, 12, 601-618.

Gökgöz, F., & Güvercin, M. T. (2018). Energy security and renewable energy efficiency in EU. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 96, 226-239.

- Gruetzmacher, S. B., Vaz, C. B., & Ferreira, Â. P. (2020). Performance assessment of the transport sustainability in the European Union. In *Ibero-American Congress of Smart Cities* (pp. 106-119). Cham: Springer International Publishing.
- Gryparis, E., Papadopoulos, P., Leligou, H. C., & Psomopoulos, C. S. (2020). Electricity demand and carbon emission in power generation under high penetration of electric vehicles. A European Union perspective. *Energy Reports*, 6, 475-486.
- Hafezalkotob, A., Hafezalkotob, A. (2016). “Extended MULTIMOORA Method Based on Shannon Entropy Weight for Materials Selection”, *Journal of Industrial Engineering International*, Vol: 12(1), pp.1-13.
- Hájek, M., Zimmermannová, J., & Helman, K. (2021). Environmental efficiency of economic instruments in transport in EU countries. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 100, 103054.
- Haroun, H. A. A. F., Bakr, A. F., & Hasan, A. E. S. (2019). Multi-criteria decision making for adaptive reuse of heritage buildings: Aziza Fahmy Palace, Alexandria, Egypt. *Alexandria Engineering Journal*, 58(2), 467-478.
- Hwang, C. L. & Yoon, K. P. (1981). *Multiple Attribute Decision Making: Methods and Applications*. New York: Springer-Verlag.
- Hwang, S. N., Lee, H. S., & Zhu, J. (Eds.). (2016). *Handbook of operations analytics using data envelopment analysis*. Springer US.
- Ishizaka, A., & Nemery, P. (2013). *Multi-criteria decision analysis: methods and software*. John Wiley & Sons.
- Islam, N., Sarkar, B., Basak, A., Das, P., Paul, I., Debnath, M., & Roy, R. (2022). A novel GIS-based MCDM approach to identify the potential eco-tourism sites in the Eastern

- Dooars region (Himalayan foothill) of West Bengal, India. *Geocarto International*, 37(26), 13145-13175.
- Kany, M. S., Mathiesen, B. V., Skov, I. R., Korberg, A. D., Thellufsen, J. Z., Lund, H., & Chang, M. (2022). Energy efficient decarbonisation strategy for the Danish transport sector by 2045. *Smart Energy*, 5, 100063.
- Karagiannis, R., & Karagiannis, G. (2019). Constructing composite indicators with Shannon entropy: The case of Human Development Index. *Socio-Economic Planning Sciences*.
- Keskin, B. (2021). An efficiency analysis on social prosperity: OPEC case under network DEA slack-based measure approach. *Energy*, 231, 120832.
- Khan, S. A. R., Ibrahim, R. L., Al-Amin, A. Q., & Yu, Z. (2022). An ideology of sustainability under technological revolution: striving towards sustainable development. *Sustainability*, 14(8), 4415.
- Khezzrimotlagh, D., & Chen, Y. (2018). *Decision Making and Performance Evaluation Using Data Envelopment Analysis*. Springer International Publishing.
- Latruffe, L., Balcombe, K., Davidova, S., & Zawalinska, K. (2005). Technical and scale efficiency of crop and livestock farms in Poland: does specialization matter? *Agricultural economics*, 32(3), 281-296.
- Lee, H. C., & Chang, C. T. (2018). Comparative analysis of MCDM methods for ranking renewable energy sources in Taiwan. *Renewable and sustainable energy reviews*, 92, 883-896.
- Lee, P. T. W., and Yang, Z. (2018), “Multi-Criteria Decision Making in Maritime Studies and Logistics”, Springer: Cham, Switzerland.

- Letnik, T., Marksel, M., Luppino, G., Bardi, A., & Božičnik, S. (2018). Review of policies and measures for sustainable and energy efficient urban transport. *Energy*, 163, 245-257.
- Li, P., Wu, J., and Qian, H. (2012), Groundwater Quality Assessment Based on Rough Sets Attribute Reduction and TOPSIS Method in a Semi-Arid Area. *Environmental Monitoring and Assessment*, 184(8), 4841-4854.
- Lin, Z. C., & Yang, C. B. (1996). Evaluation of machine selection by the AHP method. *Journal of Materials Processing Technology*, 57(3-4), 253-258.
- Litman, T., & Burwell, D. (2006). Issues in sustainable transportation. *International Journal of Global Environmental Issues*, 6(4), 331-347.
- Liu, J. S., Lu, L. Y., and Lu, W. M. (2016a), “Research Fronts in Data Envelopment Analysis”, *Omega*, 58, 33-45.
- Liu, J., Liu, C., and Han, W. (2016b). “Efficiently Evaluating Heavy Metal Urban Soil Pollution Using an Improved Entropy-Method-Based TOPSIS Model”, *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*, 71(3), 377-382.
- Liu, W., & Lin, B. (2018). Analysis of energy efficiency and its influencing factors in China's transport sector. *Journal of cleaner production*, 170, 674-682.
- Liu, X., & Wu, J. (2017). Energy and environmental efficiency analysis of China's regional transportation sectors: A slack-based DEA approach. *Energy Systems*, 8(4), 747-759.
- Io Storto, C., & Evangelista, P. (2023). Infrastructure efficiency, logistics quality and environmental impact of land logistics systems in the EU: A DEA-based dynamic mapping. *Research in Transportation Business & Management*, 46, 100814.

- Lombardi, G. V., Stefani, G., Paci, A., Becagli, C., Miliacca, M., Gastaldi, M., and Almeida, C. M. V. B. (2019). “The sustainability of the Italian Water Sector: An Empirical Analysis by DEA”, *Journal of Cleaner Production*, 227, 1035-1043.
- Lovell, C. K., Grosskopf, S., Ley, E., Pastor, J. T., Prior, D., & Eeckaut, P. V. (1994). Linear programming approaches to the measurement and analysis of productive efficiency. *Top*, 2(2), 175-248.
- Ma, Q., Jia, P., & Kuang, H. (2021). Green efficiency changes of comprehensive transportation in China: Technological change or technical efficiency change? *Journal of cleaner production*, 304, 127115.
- Malinauskaite, J., Jouhara, H., Ahmad, L., Milani, M., Montorsi, L., & Venturelli, M. (2019). Energy efficiency in industry: EU and national policies in Italy and the UK. *Energy*, 172, 255-269.
- Mandic, K. Delibasic, B. Knezevic, S. & Benkovic, S. (2014). Analysis of the financial parameters of Serbian banks through the application of the fuzzy AHP and TOPSIS methods. *Economic Modelling*, 43, 30-37.
- Marchetti, D., and Wanke, P. (2017). Brazil's rail Freight Transport: Efficiency Analysis Using Two-Stage DEA and Cluster-Driven Public Policies, *Socio-Economic Planning Sciences*, 59, 26-42.
- Mardani, A., Zavadskas, E. K., Streimikiene, D., Jusoh, A., and Khoshnoudi, M. (2017). A Comprehensive Review of Data Envelopment Analysis (DEA) Approach in Energy Efficiency, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 70, 1298-1322.
- Mighty Recruiter (2023). Erişim Linki: <https://www.mightyrecruiter.com/job-descriptions/transportation-worker/> Erişim Tarihi: 27 Haziran 2023.

- Mo, F., & Wang, D. (2019). Environmental sustainability of road transport in OECD countries. *Energies*, 12(18), 3525.
- Munier, N., Hontoria, E., & Jiménez-Sáez, F. (2019). *Strategic Approach in Multi-Criteria Decision Making*. Springer International Publishing.
- Opricovic, S. (1998). Multicriteria optimization of civil engineering systems. *Faculty of Civil Engineering, Belgrade*, 2(1), 5-21.
- Osei-Bryson, K. M., & Ngwenyama, O. (2014). Advances in research methods for information systems research. *New York, USA: Springer*, 10, 978-1.
- Ozkaya, G., Timor, M., & Erdin, C. (2021). Science, technology and innovation policy indicators and comparisons of countries through a hybrid model of data mining and MCDM methods. *Sustainability*, 13(2), 694.
- Park, Y. S., Lim, S. H., Egilmez, G., & Szmerekovsky, J. (2018). Environmental efficiency assessment of US transport sector: A slack-based data envelopment analysis approach. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 61, 152-164.
- Pintelon, L., Di Nardo, M., Murino, T., Pileggi, G., & Vander Poorten, E. (2021). A new hybrid MCDM approach for RPN evaluation for a medical device prototype. *Quality and Reliability Engineering International*, 37(5), 2189-2213.
- Ploskas, N., & Papathanasiou, J. (2019). A decision support system for multiple criteria alternative ranking using TOPSIS and VIKOR in fuzzy and nonfuzzy environments. *Fuzzy Sets and Systems*, 377, 1-30.
- Ramanathan, R. (2003). *An Introduction to Data Envelopment Analysis*, Sage Publications, USA.

- Rediske, G., Siluk, J. C. M., Michels, L., Rigo, P. D., Rosa, C. B., & Cugler, G. (2020). Multi-criteria decision-making model for assessment of large photovoltaic farms in Brazil. *Energy*, 197, 117167.
- Shang, Y., Liu, H., & Lv, Y. (2020). Total factor energy efficiency in regions of China: An empirical analysis on SBM-DEA model with undesired generation. *Journal of King Saud University-Science*, 32(3), 1925-1931.
- Shojaei, P., Haeri, S. A. S., & Mohammadi, S. (2018). Airports evaluation and ranking model using Taguchi loss function, best-worst method and VIKOR technique. *Journal of Air Transport Management*, 68, 4-13.
- Sierpiński, G. (2019). *Smart and Green Solutions for Transport Systems: 16th Scientific and Technical Conference" Transport Systems. Theory and Practice" Selected Papers* (Vol. 1091). Springer Nature.
- Siksnyte-Butkiene, I., & Streimikiene, D. (2022). Sustainable Development of Road Transport in the EU: Multi-Criteria Analysis of Countries' Achievements. *Energies*, 15(21), 8291.
- Song, Y. Y., Li, J. J., Wang, J. L., Yang, G. L., & Chen, Z. (2022). Eco-efficiency of Chinese transportation industry: A DEA approach with non-discretionary input. *Socio-Economic Planning Sciences*, 84, 101383.
- Soteriou, A. C., & Zenios, S. A. (1999). Using data envelopment analysis for costing bank products. *European Journal of Operational Research*, 114(2), 234-248.
- Sotoudeh-Anvari, A. (2022). The applications of MCDM methods in COVID-19 pandemic: A state of the art review. *Applied Soft Computing*, 109238.

- Stefaniec, A., Hosseini, K., Assani, S., Hosseini, S. M., & Li, Y. (2021). Social sustainability of regional transportation: An assessment framework with application to EU road transport. *Socio-Economic Planning Sciences*, 78, 101088.
- Sueyoshi, T., & Goto, M. (2018). *Environmental assessment on energy and sustainability by data envelopment analysis*. John Wiley & Sons.
- Sultana, S., Salon, D., & Kuby, M. (2019). Transportation sustainability in the urban context: A comprehensive review. *Urban geography*, 40(3), 279-308.
- Sun, S., & Huang, C. (2021). Energy structure evaluation and optimization in BRICS: A dynamic analysis based on a slack based measurement DEA with undesirable outputs. *Energy*, 216, 119251.
- Tan, T., Mills, G., Papadonikolaki, E., & Liu, Z. (2021). Combining multi-criteria decision making (MCDM) methods with building information modelling (BIM): A review. *Automation in Construction*, 121, 103451.
- Thimet, P. J., & Mavromatidis, G. (2022). Review of model-based electricity system transition scenarios: An analysis for Switzerland, Germany, France, and Italy. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 159, 112102.
- Toloo, M., & Nalchigar, S. (2009). A new integrated DEA model for finding most BCC-efficient DMU. *Applied Mathematical Modelling*, 33(1), 597-604.
- Toma, E., Dobre, C., Dona, I., and Cofas, E. (2015). “DEA Applicability in Assessment of Agriculture Efficiency on Areas with Similar Geographically Patterns”, *Agriculture and Agricultural Science Procedia*, 6, 704-711.
- Tone, K. A. (2001), Slacks-Based Measure of Efficiency in Data Envelopment Analysis, *EurJ Oper Res*, 130, 498–509.

- Tone, K. (2004). Dealing with undesirable outputs in DEA: a slacks-based measure (SBM) approach. Toronto.
- Tone, K. (2017), *Advances in DEA Theory and Applications: with Extensions to Forecasting Models*. John Wiley & Sons.
- Transport White Paper, (2011). Roadmap to a Single European Transport Area – Towards A Competitive and Resource Efficient Transport System, Brussels.
- Usón, A. A., Capilla, A. V., Bribián, I. Z., Scarpellini, S., & Sastresa, E. L. (2011). Energy efficiency in transport and mobility from an eco-efficiency viewpoint. *Energy*, 36(4), 1916-1923.
- Vaid, S. K., Vaid, G., Kaur, S., Kumar, R., & Sidhu, M. S. (2022). Application of multi-criteria decision-making theory with VIKOR-WASPAS-Entropy methods: A case study of silent Genset. *Materials Today: Proceedings*, 50, 2416-2423.
- Wagner, S. M. (2008). Innovation management in the German transportation industry. *Journal of Business Logistics*, 29(2), 215-231.
- Wang, C. N., Le, T. Q., Chang, K. H., & Dang, T. T. (2022a). Measuring road transport sustainability using MCDM-based entropy objective weighting method. *Symmetry*, 14(5), 1033.
- Wang, C. N., Le, T. Q., Yu, C. H., Ling, H. C., & Dang, T. T. (2022b). Strategic environmental assessment of land transportation: an application of DEA with undesirable output approach. *Sustainability*, 14(2), 972.
- Wu, J., Chen, X., & Lu, J. (2022). Assessment of long and short-term flood risk using the multi-criteria analysis model with the AHP-Entropy method in Poyang Lake basin. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 75, 102968.

- Yang, T., Guan, X., Qian, Y., Xing, W., & Wu, H. (2019). Efficiency evaluation of urban road transport and land use in Hunan Province of China based on hybrid data envelopment analysis (DEA) models. *Sustainability*, 11(14), 3826.
- Yang, W. Xu, K. Lian, J. Ma, C. & Bin, L. (2018). Integrated flood vulnerability assessment approach based on TOPSIS and Shannon entropy methods. *Ecological indicators*, 89, 269-280.
- Yazdani, M., Torkayesh, A. E., Santibanez-Gonzalez, E. D., & Otaghsara, S. K. (2020). Evaluation of renewable energy resources using integrated Shannon Entropy—EDAS model. *Sustainable Operations and Computers*, 1, 35-42.
- Zambon Ferraresi, F., Lera López, F., & García Cebrián, L. I. (2017). *Sports results measurement and efficiency in UEFA champions league* (No. ART-2017-103980).
- Zardari, N. H., Ahmed, K., Shirazi, S. M., & Yusop, Z. B. (2015). *Weighting methods and their effects on multi-criteria decision making model outcomes in water resources management*. Springer.
- Zhang, J. Zeng, W. & Shi, H. (2016). Regional environmental efficiency in China: analysis based on a regional slack-based measure with environmental undesirable outputs. *Ecological indicators*, 71, 218-228.
- Zhao, L., Hu, Z., Wang, J., and Zhuang, Y. (2017), “Estimating the Impact of Contextual Variables on the Productivity: An Enhanced Slack-Based DEA Model”, *RAIRO-Operations Research*, 51(4), 903-920.
- Zhao, P., Zeng, L., Li, P., Lu, H., Hu, H., Li, C., & Qi, Y. (2022). China's transportation sector carbon dioxide emissions efficiency and its influencing factors based on the

EBM DEA model with undesirable outputs and spatial Durbin model. *Energy*, 238, 121934.

Zhu, H., Ou, C. X., van den Heuvel, W. J. A., & Liu, H. (2017). Privacy calculus and its utility for personalization services in e-commerce: An analysis of consumer decision-making. *Information & Management*, 54(4), 427-437.

Zhu, J. (2014). *Quantitative models for performance evaluation and benchmarking: data envelopment analysis with spreadsheets* (Vol. 213). Springer.

Ziolkowska, J. R., & Ziolkowski, B. (2015). Energy efficiency in the transport sector in the EU-27: A dynamic dematerialization analysis. *Energy Economics*, 51, 21-30.

ÖZET

Son dönemde enerji kullanımının ve karbondioksit emisyonlarının aşırı artış göstermesi endişe verici bir hal almaktadır. Enerji etkinliği ve sürdürülebilirliği geliştirmeye yönelik çabalar iklim değişikliğini hafifletmeye yönelik önlemlerin başında gelmektedir. Ulaştırma sektörü ise Avrupa Birliği'nde en çok enerjiye ihtiyaç duyulan sektörlerden birisidir. Enerji etkinliğinin ve sürdürülebilirliğin sağlanması Avrupa Birliği'nin uzun dönemde sağlamak için yoğun çaba gösterdiği amaçlardır. Bu çerçevede, enerji etkinliği ve sürdürülebilirliğin Avrupa Birliği ülkelerinde değerlendirilmesi önem arz etmektedir. Bu amaçla, çalışmada öncelikle Avrupa Birliği'nde ulaştırma sektörünün enerji etkinliği karbondioksit emisyonu gibi istenmeyen çıktılarının ele alınmasında başarılı bir teknik olan aylak temelli Veri Zarflama Analizi ile değerlendirilmektedir. Çalışmanın ikinci kısmında ise sektörün sürdürülebilirlik performansı çeşitli Çok Kriterli Karar Verme teknikleri ile analiz edilmektedir. Hem aylak temelli Veri Zarflama Analizi hem de Çok Kriterli Karar Verme sonuçlarına göre, Avrupa Birliği'nde Almanya, İtalya ve Fransa gibi gelişmiş ülkelerin ulaştırma sektöründeki enerjiyi etkin şekilde kullanmada ve sürdürülebilirliği sağlamada oldukça başarılı oldukları belirlenmiştir. Özellikle yenilebilir enerji alanında gerçekleştirdikleri yatırımların bu performansta önemli paya sahip olduğu söylenebilir. Ekonominin temel yapıtaşlarından biri olan ulaştırma sektöründe enerji tasarrufuna yönelik önlemler enerji etkinliğine katkı verirken kullanılan enerji payındaki yenilenebilir enerjinin payı yüksek olan ülkeler sürdürülebilirlik açısından daha avantajlı olmaktadır.

Anahtar Kelimeler: Veri Zarflama Analizi, Çok Kriterli Karar Verme, Avrupa Birliği, Enerji Etkinliği, Sürdürülebilirlik.

ABSTRACT

The recent excessive increase in energy use and carbon dioxide emissions has become alarming. Efforts to improve energy efficiency and sustainability are among the leading measures to mitigate climate change. The transportation sector is one of the sectors that needs the most energy in the European Union. Ensuring energy efficiency and sustainability are goals that the European Union strives hard to achieve in the long term. In this context, it is important to evaluate energy efficiency and sustainability in European Union countries. For this purpose, the study first evaluates the energy efficiency of the transportation sector in the European Union with slack-based Data Envelopment Analysis, which is a successful technique in addressing undesirable outputs such as carbon dioxide emissions. In the second part of the study, the sustainability performance of the sector is analyzed with various Multi-Criteria Decision Making techniques. According to the results of both slack-based Data Envelopment Analysis and Multi-Criteria Decision Making methods, it has been determined that developed countries in the European Union such as Germany, Italy and France are quite successful in using energy effectively in the transportation sector and ensuring sustainability. It can be said that their investments, especially in the field of renewable energy, have a significant share in this performance. While energy saving measures in the transportation sector, one of the basic building blocks of the economy, contribute to energy efficiency, it can be said that countries with a high share of renewable energy in the energy used are in a more advantageous position in terms of sustainability.

Keywords: Data Envelopment Analysis, Multi-Criteria Decision-Making, European Union, Energy Efficiency, Sustainability.