

T.C.
İSTANBUL BEYKENT ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

ENDÜSTRİ MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
ENDÜSTRİ MÜHENDİSLİĞİ BİLİM DALI

**VERİ ZARFLAMA ANALİZİ VE MALMQUIST
ENDEKSİ YÖNTEMLERİ İLE SANAYİ ÜRETİMİ
İÇİN PERFORMANS ANALİZİ**

Yüksek Lisans Tezi

Tezi Hazırlayan
Gökhan DOĞRU

İstanbul, 2025

T.C.
İSTANBUL BEYKENT ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

ENDÜSTRİ MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
ENDÜSTRİ MÜHENDİSLİĞİ BİLİM DALI

**VERİ ZARFLAMA ANALİZİ VE MALMQUIST
ENDEKSİ YÖNTEMLERİ İLE SANAYİ ÜRETİMİ
İÇİN PERFORMANS ANALİZİ**

Yüksek Lisans Tezi

Tezi Hazırlayan
Gökhan DOĞRU

Öğrenci No
2220006005

ORCID NO
0000-0003-3883-3086

Danışman
Dr. Öğr. Üyesi Furkan DIŞKAYA

İstanbul, 2025

YEMİN METNİ

Yüksek Lisans Tezi olarak sunduğum “**Veri Zarflama Analizi ve Malmquist Endeksi Yöntemleri ile Sanayi Üretim İçin Performans Analizi**” başlıklı bu çalışmanın, bilimsel ahlak ve geleneklere uygun şekilde tarafımdan yazıldığını, bu tezdeki bütün bilgileri akademik ve etik kurallar içinde elde ettiğimi, yararlandığım eserlerin tamamının kaynaklarda gösterildiğini ve çalışmanın içerisinde kullanıldıkları her yerde bunlara atıf yapıldığını, patent ve telif haklarını ihlal edici bir davranışımın olmadığını belirtir ve bunu onurumla doğrularım.

20./06/2025

Gökhan DOĞRU

T.C.
İSTANBUL BEYKENT ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ MÜDÜRLÜĞÜ
TEZLİ YÜKSEK LİSANS SINAV TUTANAĞI

26/05/2025

Enstitümüz *Endüstri Mühendisliği* Anabilim Dalı *Endüstri Mühendisliği* Programı Yüksek Lisans öğrencilerinden 2220006005 numaralı **Gökhan DOĞRU**'nun "İstanbul Beykent Üniversitesi Eğitim-Öğretim Yönetmeliği"nin ilgili maddesine göre hazırlayarak Enstitümüze teslim ettiği "*Veri Zarflama Analizi ve Malmquist Endeksi Yöntemleri ile Sanayi Üretimi için Peformans Analizi*" konulu tezini, Yönetim Kurulumuzun 06/05/2025 tarih ve 2025/20 sayılı toplantısında seçilen ve Taksim yerleşkesinde toplanan biz jüri üyeleri huzurunda, İstanbul Beykent Üniversitesi Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliğinin 29. maddesinin 3. fıkrası gereğince aday tarafından savunulmuş ve sonuçta adayın tezi hakkında "**OYBİRLİĞİ**" ile "**KABUL**" kararı verilmiştir.

İşbu tutanak, 2 nüsha olarak hazırlanmış ve Enstitü Müdürlüğü'ne sunulmak üzere tarafımızdan düzenlenmiştir.

DANIŞMAN
Dr. Öğr. Üyesi Fur*** Dİ***
(İstanbul Beykent Üniversitesi)

ÜYE
Dr. Öğr. Üyesi Ve*** Ze*** YE***
(İstanbul Beykent Üniversitesi)

ÜYE
Dr. Öğr. Üyesi Şe*** EM***
(İstanbul Üniversitesi)

Adı ve Soyadı : Gökhan DOĞRU
Danışmanı : Dr. Öğr. Üyesi Furkan DİŞKAYA
Derecesi ve Tarihi : Yüksek Lisans (Tezli), 2025
Alanı : Endüstri Mühendisliği
Anahtar Kelimeler : Veri Zarflama Analizi, SBM, Malmquist Endeksi, Eko Verimlilik, Çimento Sektörü

ÖZ

VERİ ZARFLAMA ANALİZİ VE MALMQUIST ENDEKSİ YÖNTEMLERİ İLE SANAYİ ÜRETİMİ İÇİN PERFORMANS ANALİZİ

Türkiye çimento sektöründe faaliyet gösteren büyük ölçekli bir fabrikanın 2018–2022 yıllarına ait üretim verileri kullanılarak çok boyutlu bir verimlilik analizi gerçekleştirilmiştir. Çalışmada yalnızca teknik etkinlik düzeyleri değil; çevresel etkiler, yapısal benzerlikler ve politika senaryolarının potansiyel katkıları da kapsamlı biçimde değerlendirilmiştir. Analiz sürecinde, klasik Veri Zarflama Analizi (VZA) yaklaşımlarına kıyasla daha ayrıntılı ölçüm olanağı sunan Slacks-Based Measure (SBM) modeli tercih edilmiştir. Bu model, girdi fazlaları ve çıktı yetersizliklerini ayrı ayrı dikkate alarak iyileştirme potansiyelini ortaya koymuştur. Zaman içerisindeki verimlilik değişimi Malmquist Toplam Faktör Verimliliği Endeksi ile değerlendirilmiş; elde edilen skorların istatistiksel güvenilirliği Bootstrap yöntemiyle test edilmiştir. Araştırma süreci, Başlıca Bileşenler Analizi (PCA), kümeleme ve politika senaryoları ile desteklenerek derinleştirilmiştir. Elde edilen bulgular, çimento sektöründe karar vericilere yönelik stratejik politika geliştirme süreçlerine bilimsel bir temel sunmuş; aynı zamanda sürdürülebilir üretim performansını ölçmeye yönelik literatüre özgün bir model katkısı sağlamıştır.

Name and Surname :Gökhan DOĞRU
Supervisor :Asst. Prof. Dr. Furkan Dişkaya
Degree and Date :Master's Degree (Thesis), 2025
Major :Industrial Engineering
Keywords :Data Envelopment Analysis, SBM, Malmquist Index,
Eco-Efficiency, CementIndustry

ABSTRACT

PERFORMANCE ANALYSIS FOR INDUSTRIAL PRODUCTION USING DATA ENVELOPMENT ANALYSIS AND MALMQUIST INDEX METHODS

A multidimensional productivity analysis was conducted using the production data of a large-scale cement factory operating in Turkey between 2018 and 2022. The study evaluated not only technical efficiency levels but also environmental impacts, structural similarities, and the potential contributions of policy scenarios in a comprehensive manner. In the analysis process, the Slacks-Based Measure (SBM) model was preferred as it provides more detailed measurement capabilities compared to classical Data Envelopment Analysis (DEA) approaches. This model revealed improvement potential by separately addressing input excesses and output shortfalls. The change in productivity over time was assessed using the Malmquist Total Factor Productivity Index, and the statistical reliability of the results was tested through the Bootstrap method. The research process was further enhanced with Principal Component Analysis (PCA), clustering, and policy scenarios to construct a more in-depth analytical framework. The findings provide a scientific foundation for strategic policy development in the cement sector and offer a unique model contribution to the literature for measuring sustainable production performance.

İÇİNDEKİLER

Sayfa No

ÖZ

ABSTRACT

TABLolar LİSTESİ..... iv

ŞEKİLLER LİSTESİ.....v

KISALTMALAR vi

SÖZLÜK..... viii

GİRİŞ1

1. LİTERATÜR TARAMASI

2. ETKİNLİK VE VERİMLİLİK

2.1. Etkinlik Kavramı..... 10

2.1.1. Tarihsel Gelişim..... 10

2.1.2. Etkinlik Kavramının Boyutları 12

2.1.3. Teorik Yaklaşımlar 14

2.1.4. Etkinlik Ölçümü ve Değerlendirme Yöntemleri..... 16

2.1.5. Sürekli İyileştirme ve Geri Bildirim Döngüleri..... 24

2.2. Verimlilik Kavramı 26

2.2.1. Tarihsel Gelişim ve Kavramsal Çerçeve 26

2.2.2. Disiplinlerarası Yaklaşım 28

2.2.3. Verimlilik Ölçüm Yöntemleri..... 30

2.2.4. Verimlilik Artış Stratejileri..... 36

2.2.5. Verimlilik ile İlgili Kavramlar..... 38

2.2.6. Verimlilik ve Performans İlişkisi 38

2.2.7. Verimlilik ve Rekabetçilik..... 38

2.2.8. Yeni Eğilimler ve Gelecek Perspektifleri 38

2.2.9. Sonuç ve Değerlendirme..... 40

3. UYGULAMADA KULLANILAN YÖNTEMLER

3.1. Veri Zarflama Analizi 41

3.1.1. Veri Zarflama Analizinin Matematiksel Formülü 41

3.1.2. Veri Zarflama Analizi Modelleri	42
3.1.3. Veri Zarflama Analizinin Uygulama Alanları	61
3.1.4. VZA'nın Avantajları ve Dezavantajları.....	62
3.1.5. Sonuç ve Değerlendirme.....	63
3.2. Malmquist Index.....	64
3.2.1. Malmquist Endeksinin Teorik Temelleri.....	64
3.2.2. Malmquist Endeksinin Bileşenleri.....	64
3.2.3. Malmquist Endeksinin Hesaplanması	65
3.2.4. Uygulama Alanları.....	65
3.2.5. Malmquist Endeksinin Avantajları ve Sınırlılıkları.....	66
3.2.6. Çimento Sektöründe Uygulanabilirlik	66
3.2.7. Sonuç ve Değerlendirme.....	67
3.3. Slack-Based Measure (SBM) VZA Modeli	67
3.3.1. SBM Modelinin Tarihçesi ve Gelişimi.....	67
3.3.2. SBM Modelinin Temel Özellikleri.....	68
3.3.3. SBM Modelinin Matematiksel Formülasyonu	68
3.3.4. SBM Modelinin Çözüm Yöntemleri	69
3.3.5. SBM Modelinin Uygulama Alanları	71
3.3.6. SBM Modelinin Avantajları ve Dezavantajları	73
3.3.7. Çimento Sektöründe Uygulanabilirlik	73
3.3.8. Sonuç ve Değerlendirme.....	74
4. UYGULAMA	
4.1. Python Ortamında Uygulama Altyapısı.....	76
4.2. Veri Seti ve Değişkenleri	76
4.2.1. Girdi Değişkenleri	77
4.2.2. Çıktı ve İstenmeyen Çıktı Değişkenleri.....	77
4.2.3. Ham Veri Seti	78
4.2.4. Kullanılan Yöntemlerin Teorik Altyapısı ve Formülasyonları.....	79
4.3. Analiz Sonuçları, Bulgular ve Görsel Yorumlar	87
4.3.1. SBM Analiz Sonuçları	87
4.3.2. Malmquist Endeksi Sonuçları.....	97
4.3.3. Bootstrap Sağlamlık Analizi.....	99

4.3.4. Senaryo Analizi Sonuçları	101
4.3.5. PCA ve Kümeleme Analizi Sonuçları	103
4.3.6. Çevresel Maliyet Analizi Sonuçları.....	105
4.3.7. Karar Verici İçin Stratejik Öneri ve Eylem Planı.....	107
SONUÇ.....	109
KAYNAKÇA	113
EKLER	
Ek-1: Verilerin Normalize Edilmesi (Min-Max Normalizasyonu)	133
Ek-2: SBM Skorlarının Hesaplanması (Slack Değerleri Dahil).....	134
Ek-3: Malmquist Endeksi Skorlarının Hesaplanması	134
Ek-4: Bootstrap Analizi	138
Ek-5: PCA (Başlıca Bileşenler Analizi) Hesaplama	139
Ek-6: Çevresel Maliyet Hesaplama	140
Ek-7: Karar Verici İçin Stratejik Senaryo Kodu (Öneri Tabloları ile).....	141
Ek-8: K-Means Kümele Hesaplama.....	142
Ek-9: Senaryo 1 %50 Enerji Azaltımı	143
Ek-10: Senaryo 2 %30 CO ₂ Emisyonu Azaltımı.....	144
Ek-11: Senaryo 3 %25 Ar-Ge Artışı	145
Ek-12: SBM Skorlarının Yıllara Göre Değişimi (Grafik Oluşumu)	146
Ek-13: SBM Slack Değerlerinin Karşılaştırılması (Grafik Oluşturma)	147
Ek-14: Malmquist Endeksi ve Alt Bileşenleri (Grafik Oluşturma).....	148
Ek-15: Senaryo Sonuçlarının Grafikle Gösterimi (Grafik Oluşturma)	149
Ek-16: PCA ile Kümeleme Sonuçlarının 2D Görselleştirmesi	150

TABLÖLER LİSTESİ

Tablo 1. Literatür Taramasının Özeti	6
Tablo 2. 2018-2022 Ham Veri Seti	79
Tablo 3. Normalize Edilmiş Veri Seti (2018-2022)	81
Tablo 4. Çimento Üretim Sürecinde Verimliliği ve Sürdürülebilirliği Artırmaya Yönelik Öneriler.....	86
Tablo 5. SBM Skorları (2018-2022)	88
Tablo 6. SBM Skorları ve Verimlilik Kaybı Oranları (2018–2022)	89
Tablo 7. Normalize Edilmiş Enerji Slack Değerleri (2018–2022).....	91
Tablo 8. Normalize Edilmiş CO ₂ Slack Değerleri (2018–2022)	92
Tablo 9. Normalize Edilmiş NO _x ve SO _x Slack Değerleri (2018–2022)	93
Tablo 10. Ham Verilerle SBM, Slack ve Verimlilik Kayıpları Özeti (2018–2022)	95
Tablo 11. Normalize Edilmiş Verilerle SBM, Slack ve Verimlilik Kayıpları Özeti (2018-2022).....	95
Tablo 12. Malmquist Endeksi Bileşenleri (Yıllık Değişim).....	97
Tablo 13. SBM Skorları, Ortalama Bias ve %95 Güven Aralıkları	99
Tablo 14. Senaryo Uygulamalarına Göre SBM Skorları ve Değişim Oranları..	101
Tablo 15. Kümeleme Sonuçları 2018-2022 Yılları Arasında.....	104
Tablo 16. CO ₂ , NO _x ve SO _x Emisyonlarına Göre Yıllık Çevresel Maliyetler (USD)	106
Tablo 17. Karar Vericiler İçin Stratejik Öneriler ve Beklenen Etkiler.....	108

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 1. SBM Skorlarının Yıllara Göre Değişimi	88
Şekil 2. SBM Skoru ve Verimlilik Kaybı Oranlarının Yıllara Göre Değişimi	90
Şekil 3. Enerji ve CO_2 Slack Değerlerinin Yıllara Göre Değişimi	92
Şekil 4. NO_x ve SO_x Slack Değerlerinin Yıllara Göre Değişimi	94
Şekil 5. Normalize Edilmiş SBM Skoru ile Slack Değerlerinin Birlikte Değişimi	96
Şekil 6. Malmquist Endeksinin Yıllara Göre Değişimi	98
Şekil 7. SBM Skorlarına Ait Bootstrap Güven Aralıkları	100
Şekil 8. Senaryo Uygulamalarına Göre SBM Skorları	102
Şekil 9. PCA Bileşenlerine Göre Yılların İki Boyutlu Dağılımı	103
Şekil 10. Kümeleme Analizine Göre Yılların Dağılımı	105

KISALTMALAR

- AHP:** Analytic Hierarchy Process (Analitik Hiyerarşi Prosesi)
- AIC:** Akaike Information Criterion (Akaike Bilgi Kriteri)
- AI:** Artificial Intelligence (Yapay Zekâ)
- BBA:** Basic Component Analysis (Başlıca Bileşenler Analizi)
- BCC:** Banker, Charnes, Cooper Model (Banker, Charnes, Cooper Modeli)
- Big Data:** Büyük Veri (Big Data)
- BSC:** Balanced Scorecard (Denge Skor Kartı)
- CCR:** Charnes, Cooper, Rhodes Model (Charnes, Cooper, Rhodes Modeli)
- Cobb-Douglas:** Cobb-Douglas Production Function (Geleneksel Üretim Fonksiyonu Modeli)
- CO₂:** Carbon Dioxide (Karbon Dioksit)
- CV:** Coefficient of Variation (Değişim Katsayısı)
- DEA:** Data Envelopment Analysis (Veri Zarflama Analizi)
- DMU:** Decision Making Unit (Karar Verme Birimi)
- EC:** Efficiency Change (Etkinlik Değişimi)
- EFQM:** European Foundation for Quality Management (Avrupa Kalite Yönetimi Vakfı)
- Fisher:** Fisher Index (Fisher Endeksi)
- GHG:** Greenhouse Gas (Sera Gazı)
- IoT:** Internet of Things (Nesnelerin İnterneti)
- KPI:** Key Performance Indicators (Temel Performans Göstergeleri)
- KVB:** Decision Making Unit (Karar Verme Birimi)
- LCA:** Life Cycle Assessment (Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi)
- Luenberger:** Luenberger Productivity Indicator (Yönlü Mesafe Fonksiyonuna Dayalı Verimlilik Göstergesi)
- MBNQA:** Malcolm Baldrige National Quality Award (Malcolm Baldrige Ulusal Kalite Ödülü)
- MCDM:** Multi-Criteria Decision Making (Çok Kriterli Karar Verme)
- MJ:** Megajoule (Megajul)

MSC: Most Significant Change (En Önemli Değişim)

NDEA: Network Data Envelopment Analysis (Ağ Veri Zarflama Analizi)

NO_x: Nitrogen Oxides (Azot Oksitler)

ORCID: Open Researcher and Contributor ID (Açık Araştırmacı ve Katkı Sağlayıcı Kimliği)

PCA: Principal Component Analysis (Temel Bileşenler Analizi)

Robust DEA: Robust Data Envelopment Analysis (Sağlam Veri Zarflama Analizi)

ROI: Return on Investment (Yatırım Getirisi)

SBM: Slacks-Based Measure (Gevşeklik Tabanlı Ölçüm)

SDEA: Stochastic Data Envelopment Analysis (Stokastik Veri Zarflama Analizi)

SO_x: Sulfur Oxides (Kükürt Oksitler)

SROI: Social Return on Investment (Sosyal Yatırım Getirisi)

STK: Non-Governmental Organization – NGO (Sivil Toplum Kuruluşu)

T.C.: Republic of Türkiye (Türkiye Cumhuriyeti)

TC: Technological Change (Teknolojik Değişim)

TFP: Total Factor Productivity (Toplam Faktör Verimliliği)

TKY: Total Quality Management (Toplam Kalite Yönetimi)

TOPSIS: Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution (İdeal Çözüme Yakınlık Yöntemi)

Translog: Translog Functional Production Model (Esnek Fonksiyonel Üretim Modeli)

USD: United States Dollar (Amerikan doları)

VZA: Data Envelopment Analysis (Veri Zarflama Analizi)

YÖK: Council of Higher Education – CoHE (Yükseköğretim Kurulu)

SÖZLÜK

Akaike Information Criterion (AIC): Model seçiminde kullanılan bir kriter olup, modelin uyumu ve karmaşıklığını dengeleyen bir ölçüttür.

Balanced Scorecard (BSC): Organizasyonların stratejik hedeflerini finansal ve finansal olmayan performans göstergeleriyle ölçen bir yönetim aracıdır.

Data Envelopment Analysis (DEA): Karar verme birimlerinin (KVB) etkinliklerini değerlendirmek için kullanılan, girdiler ve çıktılar arasındaki ilişkiyi analiz eden bir yöntemdir.

Etkinlik: Bir organizasyonun girdileri en az kaynakla en yüksek çıktıya dönüştürme derecesidir. Teknik ve ekonomik etkinlik olarak ikiye ayrılır.

European Foundation for Quality Management (EFQM): Organizasyonların kalite yönetimini değerlendirmede sıklıkla kullanılan bir mükemmellik modeli sistemidir.

Karar Verme Birimi (KVB): Etkinlik analizinde, girdileri çıktılara dönüştüren ve performans ölçümüne konu olan organizasyonel birimlerdir.

Key Performance Indicators (KPI): Etkinlik analizinde, stratejik hedeflerinize ulaşma derecesini ölçen temel performans göstergeleridir.

Malmquist Endeksi: Zaman içinde üretim etkinliğindeki değişimi ölçen bir endeks olup, teknoloji değişikliği ve etkinlik değişimi bileşenlerini içerir.

Most Significant Change (MSC): Organizasyonlarda sosyal etkileri değerlendirmek için kullanılan niteliksel bir yöntemdir.

Open Researcher and Contributor ID (ORCID): Akademik araştırmacılara özgü tanımlayıcı kimlik numarasıdır.

Principal Component Analysis (PCA): Temel bileşenler analizi olup, çok değişkenli veriyi daha az boyutta temsil etmek için kullanılır.

Return on Investment (ROI): Yatırımların finansal getirisini ölçen bir performans göstergesidir.

Slacks-Based Measure (SBM): Veri Zarflama Analizinde (VZA) kullanılan bir model olup, girdi ve çıktı arasındaki gevşeklikleri (slack) dikkate alır.

Social Return on Investment (SROI): Sosyal ve çevresel etkilerin finansal değerini ölçen bir yöntemdir.

Toplam Faktör Verimliliği (TFP): Bir organizasyonun tüm girdilerini kullanarak elde ettiği toplam çıktıyı ölçen bir verimlilik göstergesidir.

Veri Zarflama Analizi (VZA): Karar verme birimlerinin (KVB) etkinliklerini ölçmek için kullanılan, matematiksel programlamaya dayalı bir yöntemdir.

BCC Modeli: VZA'da değişen getiri varsayımı ile çalışan modeldir.

Bootstrap: İstatistiksel geçerlik için tekrar örnekleme esaslı analiz yöntemidir.

CCR Modeli: VZA'da sabit getiri varsayımı ile çalışan klasik modeldir.

Çevresel Maliyet: CO₂, NO_x, SO_x gibi çıktıların parasal etkilerini ifade eder.

Eko-Verimlilik: Ekonomik fayda ile çevresel etkiler arasındaki dengeyi gösteren kavramdır.

Etkinlik Değişimi: Malmquist Endeksi'nin bir bileşeni olup, zaman içinde göreceli performans değişimini yansıtır.

Green DEA: Çevresel çıktıları dikkate alan Veri Zarflama Analizi modelidir.

Karar Destek Sistemi: Yöneticilere analitik karar alma desteği sağlayan yapıdır.

Karar Verici: Performans analizlerine dayalı olarak stratejik karar alan birim ya da kişidir.

MSC Yöntemi: Sosyal etkilerin niteliksel olarak değerlendirilmesini sağlayan önemli değişiklik hikâyeleri temelli analiz yöntemidir.

Network DEA: Karar birimlerinin alt süreçlerini modelleyen VZA uzantısıdır.

Normalize Etme: Verilerin farklı ölçeklerden ortak bir aralığa dönüştürülmesidir.

SBM Modeli: Girdi fazlası ve çıktı eksikliğini cezalandırıcı olarak dikkate alan etkinlik ölçüm modelidir.

Senaryo Analizi: Farklı politika ve strateji değişikliklerinin etkilerini analiz etmek için kullanılan yöntemdir.

Slack Değeri: Girdi/ıktı dengesizliğini temsil eden verimlilik kaybıdır.

Stokastik Sınır Analizi: Üretim sınırını belirleyen ve verimsizlikle rastgele hatayı ayıran ekonometrik tekniktir.

Teknolojik Değişim: Malmquist Endeksi'nin bir bileşeni olup, üretim teknolojisindeki ilerlemeyi gösterir.

Törnqvist Endeksi: Fiyat ve miktar değişimlerini dikkate alarak verimlilik hesaplar.

Zaman Etüdü: Süreçlerin gerçekleşme zamanlarını bilimsel olarak analiz eden tekniktir.

GİRİŞ

Küresel ölçekte artan kaynak kıtlığı, yükselen enerji maliyetleri ve çevresel baskılar, sanayi sektörlerini üretim süreçlerini yalnızca ekonomik değil, aynı zamanda çevresel performans kriterleri çerçevesinde de değerlendirmeye zorlamaktadır. Özellikle enerji yoğun sektörler, sürdürülebilir kalkınma hedeflerine ulaşma sürecinde hem verimliliklerini artırma hem de çevresel etkilerini azaltma sorumluluğu ile karşı karşıya kalmaktadır. Bu durum, üretim sistemlerinin teknik etkinliğinin ve zaman içindeki verimlilik değişimlerinin daha gelişmiş yöntemlerle analiz edilmesini ve karar vericilere stratejik düzeyde rehberlik sunulmasını gerekli kılmaktadır.

Bu bağlamda, çoklu girdi ve çoklu çıktı içeren üretim ortamlarında etkinlik analizine olanak tanıyan Veri Zarflama Analizi (VZA) gibi doğrusal programlama temelli yöntemler, son yıllarda hem akademik hem de uygulamalı çalışmalarda yaygın biçimde kullanılmaktadır. VZA'nın gelişmiş türlerinden biri olan Slacks-Based Measure (SBM) modeli, karar birimlerinin performansını değerlendirirken hem girdi fazlalarını hem de çıktı yetersizliklerini ayrı ayrı dikkate alarak daha hassas ve ayrıntılı sonuçlar sunmaktadır. Bu özellik, özellikle çevresel etkilerin de modele entegre edildiği analizlerde kritik önem taşımaktadır (Tone, 2001; Longo vd., 2019). SBM modeli bu yönüyle, klasik CCR ve BCC modellerine göre daha gerçekçi iyileştirme önerileri sunmakta; teknik, ekonomik ve çevresel performansın birlikte analiz edilmesine olanak tanımaktadır.

Buna ek olarak, Malmquist Toplam Faktör Verimliliği (TFP) Endeksi, zaman içinde karar birimlerinin teknik ve teknolojik gelişimini ayrı bileşenler üzerinden ölçme olanağı sunarak yalnızca anlık değil, dinamik bir verimlilik analizi yapmayı mümkün kılmaktadır. Analiz sürecinde ayrıca Başlıca Bileşenler Analizi (PCA) ile çok değişkenli yapının boyut indirgemesi sağlanmış; kümeleme analizleri ile benzer verimlilik karakteristiği taşıyan dönemler sınıflandırılmıştır. Senaryo analizleri aracılığıyla ise olası politika uygulamalarının performans üzerindeki etkisi test edilmiştir.

Türkiye’de çimento sektörü, yüksek enerji tüketimi ve karbon salımı nedeniyle sürdürülebilirlik açısından incelenmesi gereken öncelikli alanlardan biri

olarak öne çıkmaktadır. Hem altyapı yatırımlarındaki rolü hem de ihracat kapasitesi nedeniyle ekonomik açıdan stratejik öneme sahip olan bu sektör, artan çevresel regülasyonlar doğrultusunda verimlilik analizlerine daha sık konu olmaktadır. Çimento sektöründe enerji tüketimi ve CO₂ emisyonu gibi çevresel parametreler, teknik etkinliği doğrudan etkileyen temel unsurlardandır. SBM modeli, bu tür çevresel değişkenlerdeki fazlalıkları (slack) doğrudan model içine entegre ederek, iyileştirme yapılması gereken alanları belirgin biçimde ortaya koymaktadır.

Bu tez çalışmasında, Türkiye çimento sektöründe faaliyet gösteren büyük ölçekli bir fabrikanın 2018–2022 yıllarına ait beş yıllık üretim verileri kullanılmıştır. Orijinal veriler normalize edilerek analizlerde kullanılmış ve SBM modeli ile karar biriminin göreceli teknik etkinliği ve iyileştirme potansiyeli hesaplanmıştır. Malmquist Endeksi ile etkinlik düzeyinin yıllar içindeki değişimi teknik ve teknolojik bileşenlere ayrıştırılarak analiz edilmiş; Bootstrap yöntemiyle elde edilen bulguların istatistiksel güvenilirliği sınanmıştır. Ayrıca PCA ve kümeleme yöntemleri ile daha derinlemesine değerlendirmeler yapılmış; senaryo analizleriyle sürdürülebilirlik politikalarının etkisi test edilmiştir.

Bu çalışma, literatürde sınırlı sayıda örneği bulunan SBM + Malmquist + Bootstrap + PCA + kümeleme + senaryo entegrasyonunu saha verisiyle bir araya getirerek hem metodolojik açıdan özgün bir yapı sunmakta hem de sektörel karar destek sistemlerine katkı sağlamaktadır. Bu yönüyle tez çalışması, yalnızca teknik analizlere değil; çevresel maliyetler, performans öngörüler ve stratejik karar destek unsurlarına da yer veren çok yönlü bir değerlendirme modeli ortaya koymaktadır.

1. LİTERATÜR TARAMASI

Veri Zarflama Analizi (VZA) ve Malmquist Endeksi, karar verme birimlerinin (KVB) etkinlik ve verimlilik analizinde kullanılan temel yöntemler olarak literatürde geniş yer bulmuştur. Bu bölümde, VZA ve Malmquist Endeksi'nin zaman içindeki gelişimi ile farklı sektörlerdeki uygulamaları kronolojik olarak incelenmiş; yöntemlerin sanayi üretimine, özellikle çimento sektörüne ve çevresel faktörlere yönelik potansiyel katkıları değerlendirilmiştir. Akademik veri tabanlarından taranan çalışmalar, tezin teorik çerçevesini oluşturmak ve Türkiye çimento sektöründeki performans analizine yönelik literatürdeki boşluğu ortaya koymak amacıyla sistematik bir şekilde ele alınmıştır.

Tone (2001), VZA'da Slacks-Based Measure (SBM) modelini geliştirmiş; bu model, girdi fazlalıkları ve çıktı eksikliklerini doğrudan ölçerek çimento gibi enerji yoğun sektörlerde verimsizliklerin hassas analizine olanak tanımıştır.

Deliktaş (2002), Türkiye'deki özel sektör imalat sanayisinde etkinlik ve toplam faktör verimliliğini VZA ile incelemiş; teknolojik yeniliklerin etkinliği artırdığını, ancak sermaye ve emeğin yeterince verimli kullanılmadığını ortaya koymuştur.

Yıldız (2007), Türkiye'deki imalat sanayi şirketlerinin etkinlik seviyelerini VZA ile analiz etmiş; verimsizlik kaynaklarını belirleyerek kaynak kullanımında optimizasyon gerektiğini vurgulamıştır.

Çakır Zeytinoğlu ve Uydacı (2009), Türkiye'deki perakende sektöründe dağıtım kanallarının etkinliğini VZA ile değerlendirmiş; lojistik yönetiminin performans üzerindeki önemini ortaya koyarak operasyonel stratejilerin geliştirilmesi gerektiğini ifade etmiştir.

Oruç ve Güngör (2010), bulanık VZA modellerini incelemiş; belirsizlik içeren veri setlerinde klasik modellere kıyasla daha esnek ve etkili sonuçlar sunduğunu göstermiştir.

Mandal ve Madheswaran (2010), Hindistan çimento sektöründe çevresel etkinliği VZA ile analiz etmiş; enerji tüketimi ve karbon emisyonlarının performans üzerindeki etkisini değerlendirerek çevresel sürdürülebilirlik için politikalar önermiştir.

Riccardi ve arkadaşları (2011), dünya çimento sektörünün eko-verimliliğini VZA ile incelemiş; enerji tüketimi ve emisyonların küresel çimento üretimindeki rolünü analiz ederek çevresel sürdürülebilirlik için stratejiler geliştirmiştir.

Keskin Benli (2012), konaklama sektöründe VZA ve Malmquist Endeksi'ni kullanarak otel işletmelerinin dönemsel etkinlik değişimlerini analiz etmiş; teknolojik gelişmelerin performansı artırdığını belirtmiştir.

Aktan ve Samut (2013), Türk tarım sektöründe iki aşamalı VZA modelini uygulamış; düşük verimli alt sektörlerin kaynak kullanımında iyileştirme ihtiyacını ortaya koymuştur.

Külekçi (2014), Türkiye'de antepfıstığı üretiminde kâr etkinliğini VZA ile değerlendirmiş; üretim süreçlerinde optimizasyon önerileri sunmuştur.

Gündüz (2014), kuru kayısı üretiminde bulanık VZA'yı kullanarak belirsizlik içeren verilerle analiz yapmış; kaynak dağılımının optimize edilmesi gerektiğini vurgulamıştır.

Okursoy ve Özdemir (2015), homojen olmayan KVB'lerin etkinlik analizinde kümeleme yaklaşımını önermiş; heterojen yapılar için VZA'nın uygulanabilirliğini artırmıştır.

Ganji ve arkadaşları (2016), İran çimento sektöründe Malmquist Endeksi ile üretkenlik analizi yapmış; firmaların zaman içindeki verimlilik değişimlerini ölçerek yöntemin sektörel uygulanabilirliğini göstermiştir.

Eroğlu ve Seçkiner (2017), rüzgâr çiftliklerinin performansını VZA ve Malmquist Endeksi ile analiz etmiş; teknolojik gelişmelerin yenilenebilir enerji verimliliğine katkısını incelemiştir.

Akın (2018), dokuma sektöründe VZA ve Malmquist Endeksi ile etkinlik değişimlerini değerlendirmiş; yenilikçi uygulamaların verimliliği artırdığını ortaya koymuştur.

Muhammad ve Rao (2018), Hindistan çimento sektöründe SBM ile VZA pencere analizi yapmış; enerji tüketimi ve üretim verimliliğindeki verimsizlikleri hassas bir şekilde tespit etmiştir.

Doğan ve Ersoy (2018), Yozgat'taki konaklama işletmelerinin etkinliğini VZA ile analiz etmiş; yönetim stratejilerinin iyileştirilmesi gerektiğini belirtmiştir.

Şahin ve Akkoyuncu (2019), Türkiye otomotiv sektöründe VZA ile şirket etkinliklerini ölçmüş; teknolojik yatırımların rekabet gücüne etkisini vurgulamıştır.

Yüksel ve Yiğit (2020), Marmara Bölgesi'ndeki ağız ve diş sağlığı merkezlerinin etkinliğini VZA ile değerlendirmiş; yönetim süreçlerinde optimizasyon ihtiyacını ortaya koymuştur.

Golrokh ve arkadaşları (2020), İran çimento sektöründe VZA ve Malmquist Endeksi ile eko verimliliği analiz etmiş; enerji tüketimi ve çevresel etkilerin performansa yansımalarını inceleyerek sürdürülebilirlik politikalarının önemini vurgulamıştır.

Oghani ve arkadaşları (2020), İran çimento sektöründe yönetim yeteneğini VZA ile ölçmüş; operasyonel etkinlik için stratejik öneriler sunmuştur.

Yenioğlu ve Toklu (2021), Türkiye'deki elektrik dağıtım şirketlerinin etkinliğini stokastik VZA ile analiz etmiş; ileri teknolojilerin verimliliğe katkısını incelemiştir.

Liu ve arkadaşları (2022), inşaat atıklarının çevresel etkinliğini VZA ve Malmquist Endeksi ile değerlendirmiş; atık yönetimi ve enerji tüketiminin çevresel performansı etkilediğini ortaya koyarak sürdürülebilirlik önerileri sunmuştur.

Wang ve Feng (2022), Çin çimento sektöründe SBM ve Malmquist Endeksi ile enerji ve karbon emisyonu verimliliğini analiz etmiş; teknolojik ilerlemenin çevresel performansı artırdığını göstermiştir.

Ergülen ve Töke (2022), biyogaz tesislerinin etkinliğini VZA ile ölçmüş; atık yönetimi süreçlerinde optimizasyon gerektiğini belirtmiştir.

Long (2023), Çin çimento sektöründe VZA ve Malmquist Endeksi ile karbon emisyonu verimliliğini incelemiş; enerji yoğun süreçlerin çevresel etkisini analiz ederek emisyon azaltım stratejileri önermiştir.

Güzel ve arkadaşları (2023), A grubu hastanelerin etkinliğini VZA ve Malmquist Endeksi ile analiz etmiş; kaynak tahsisinde iyileştirme önerileri sunmuştur.

Güçlü ve Mohamed (2024), Afrika ülkelerinin lojistik performansını MEREC, VZA ve EATWIOS yöntemleriyle değerlendirmiş; hibrit yaklaşımların etkinlik analizindeki potansiyelini ortaya koymuştur.

Literatürdeki çalışmalar, VZA ve Malmquist Endeksi'nin sanayi, enerji, sağlık, tarım ve hizmet sektörlerinde başarılı bir şekilde uygulandığını göstermektedir. Çimento sektörüne yönelik çalışmalar (Mandal ve Madheswaran, 2010; Riccardi vd., 2011; Ganji vd., 2016; Muhammad ve Rao, 2018; Golrokh vd., 2020; Oghani vd., 2020; Liu vd., 2022; Wang ve Feng, 2022; Long, 2023), enerji verimliliği, karbon emisyonları ve çevresel performans analizine odaklanmıştır. Ancak, Türkiye çimento sektörüne yönelik kapsamlı bir analiz eksikliği dikkat çekmektedir. Bu tez, Türkiye çimento sektöründe SBM modeli ve Malmquist Endeksi'ni birleştirerek teknik etkinlik ve zaman içindeki verimlilik değişimlerini çok boyutlu bir yaklaşımla incelemeyi amaçlamakta; böylece literatürdeki bu boşluğu doldurmaya katkıda bulunmaktadır. Aşağıdaki Tablo 1'de literatür taramasına ait özet bulunmaktadır.

Tablo 1. Literatür Taramasının Özeti

Yıl	Yazar	Kapsam	Yöntem
2001	Tone	SBM modelinin geliştirilmesi	SBM
2002	Deliktaş	Türkiye imalat sanayisinde etkinlik analizi	VZA
2007	Yıldız	İmalat sanayi şirketlerinin etkinlik seviyeleri	VZA
2009	Çakır Zeytinoğlu ve Uydacı	Perakende sektöründe dağıtım kanalları	VZA
2010	Oruç ve Güngör	Bulanık VZA modelleri	Bulanık VZA
2010	Mandal ve Madheswaran	Hindistan çimento sektöründe çevresel etkinlik	VZA
2011	Riccardi, Oggioni ve Tonini	Dünya çimento sektöründe eko verimlilik	VZA
2012	Keskin Benli	Konaklama sektöründe etkinlik ve verimlilik	VZA, Malmquist

Yıl	Yazar	Kapsam	Yöntem
2013	Erdoğan Aktan ve Kaya Samut	Türk tarım sektöründe etkinlik bileşenleri	İki Aşamalı VZA
2014	Külekçi	Antepfıstığı üretiminde kâr etkinliği	VZA
2014	Gündüz	Kuru kayısı üretiminde bulanık VZA	Bulanık VZA
2015	Okursoy ve Özdemir	Homojen olmayan KVB'lerin etkinlik analizi	VZA, Kümeleme
2016	Ganji ve ark.	İran çimento sektöründe üretkenlik analizi	Malmquist
2017	Eroğlu ve Ulusam Seçkiner	Rüzgâr çiftliklerinde performans analizi	VZA, Malmquist
2018	Akın	Dokuma sektöründe etkinlik değişimi	VZA, Malmquist
2018	Muhammad ve Rao	Hindistan çimento sektöründe SBM ile analiz	SBM, VZA Pencere Analizi
2018	Doğan ve Ersoy	Konaklama işletmelerinin etkinliği	VZA
2019	Şahin ve Akkoyuncu	Otomotiv sektöründe şirket etkinlikleri	VZA
2020	Yüksel ve Yiğit	Ağız ve diş sağlığı merkezlerinin etkinliği	VZA
2020	Golrokh, Azeem ve Hasan	İran çimento sektöründe eko verimlilik	VZA, Malmquist
2020	Valizadeh Oghani ve ark.	İran çimento sektöründe yönetim yeteneği	VZA
2021	Yenioğlu ve Toklu	Elektrik dağıtım şirketlerinin etkinliği	Stokastik VZA
2022	Liu ve ark.	İnşaat atıklarının çevresel etkinliği	VZA, Malmquist

Yıl	Yazar	Kapsam	Yöntem
2022	Wang ve Feng	Çin çimento sektöründe enerji ve CO2 performansı	SBM, Malmquist
2022	Ergülen ve Töke	Biyogaz tesislerinin etkinliği	VZA
2023	Long	Çin çimento sektöründe karbon emisyonu verimliliği	VZA, Malmquist
2023	Güzel, Köse ve Yaşar	A grubu hastanelerin etkinliği	VZA, Malmquist
2024	Güçlü ve Oudoum Mohamed	Afrika ülkelerinin lojistik performansı	MEREC, VZA, EATWIOS

Kaynak: Yazar tarafından oluşturulmuştur.

2. ETKİNLİK VE VERİMLİLİK

Etkinlik (effectiveness) ve verimlilik (efficiency) kavramları, karar verme ve üretkenlik ölçümünde temel unsurlar olup, bu kavramların doğru anlaşılması örgütsel performansın artırılmasında kritik rol oynamaktadır (Khezrimotlagh, 2016, s. 2). Sanayi üretiminde etkinlik, işletmelerin stratejik hedeflere ulaşma kapasitesini; verimlilik ise bu hedeflere ulaşmak için kaynakların tasarruflu ve optimize edilmiş kullanımını ölçer (Cavlak, 2021, s. 103). Enerji yoğun ve çevresel etkileri yüksek sektörlerde faaliyet gösteren işletmelerde, sürdürülebilirlik sadece ekonomik değil, aynı zamanda çevresel ve sosyal hedefleri de içermektedir (Singh vd., 2009, s. 190). Bu bölümde, etkinlik ve verimlilik kavramlarının teorik temelleri, tarihsel gelişimi ve ölçüm yöntemleri detaylı bir şekilde ele alınmakta; Veri Zarflama Analizi (VZA), Slacks-Based Measure (SBM) ve Malmquist Endeksi'nin temel yapısı açıklanmakta ve bu yöntemlerin sektörel uygulanabilirliği tartışılmaktadır. Söz konusu yöntemlerin matematiksel altyapısı ve analiz süreçleri, “Uygulamada Kullanılan Yöntemler” bölümünde detaylı bir şekilde sunulmuştur.

Etkinlik, işletmelerin stratejik hedeflere ulaşma derecesini geniş bir çerçevede yansıtırken; bu hedefler müşteri memnuniyetini artırmak, ürün kalitesini yükseltmek, pazar payını genişletmek ya da çevresel uyumu sağlamak gibi farklı alanlara yayılabilir (Cavlak, 2021, s. 103). Verimlilik, daha az kaynakla aynı çıktıyı elde etmeyi veya mevcut kaynaklarla daha fazla çıktı üretmeyi hedefleyerek operasyonel süreçlerin başarısını gösterir (Coelli vd., 2005, s. 3). Bu bağlamda, üretim kapasitesinin artırılması ve karbon emisyonlarının azaltılması gibi hedefler etkinlik kapsamına girerken; enerji tüketimi, sermaye kullanımı ve bakım maliyetlerinin optimizasyonu verimliliği ifade eder.

Etkinlik ve verimlilik arasındaki ilişki, işletmelerin ekonomik, yönetsel, sosyal ve çevresel başarıyı dengelemesinde önemli bir rol oynar (Cavlak, 2021, s. 105).

Etkinlik düzeyi yüksek işletmeler stratejik yönelimlerinde daha kararlı bir çizgi izlerken, operasyonel verimliliği yüksek olan firmalar rekabet üstünlüğü elde etme eğilimindedir (Singh vd., 2009, s. 199). Örneğin yeni bir üretim hattının devreye alınması stratejik hedeflere ulaşımı gösterirken; bu süreçte enerji ve bakım maliyetlerinin optimize edilmesi kaynak kullanımındaki başarıyı yansıtır. Ancak,

bu iki kavramın dengelenmesi kritik bir gerekliliktir; yalnızca hedef odaklı bir yaklaşım maliyet artışlarına, yalnızca verimlilik odaklı bir tutum ise uzun vadeli hedeflerden sapmalara neden olabilir (Potočan, 2015, s. 8).

2.1. Etkinlik Kavramı

Etkinlik (effectiveness), farklı disiplinlerde çeşitli yaklaşımlarla ele alınan, çok boyutlu bir kavramdır (Cavlak, 2021, s. 100). Bir örgütün, bireyin veya sürecin, belirlenen amaçlara ulaşma düzeyini ya da hedeflenen sonuçları elde etme kapasitesini ifade eder (Potočan, 2015, s. 9). Örneğin örgütsel bağlamda, etkinlik, paydaşların gereksinimlerini karşılarken aynı zamanda kurumun sürdürülebilir rekabet gücünü artırma ve toplumsal yarar sağlama becerisini kapsar (Freeman, 1984, s. 25). Bununla birlikte, etkinlik bireyin kendi amaçlarını gerçekleştirme ve potansiyelini ortaya koyma düzeyini yansıtır; bu süreç, özerklik ve yetkinlik gibi psikolojik ihtiyaçlarla desteklenmektedir (Ryan ve Deci, 2000, s. 68).

2.1.1.Tarihsel Gelişim

Etkinlik kavramının yönetim ve örgüt literatüründeki evrimini yansıtır. Klasik dönemde, etkinlik büyük ölçüde iş gücü verimliliği ve yönetim hiyerarşisi odaklı ele alınmıştır (Taylor, 1911, s. 33; Fayol, 1949, s. 59). Daha sonra, İnsan İlişkileri yaklaşımı, etkinliğin sosyal ve psikolojik faktörlerle ilişkisinin önemini vurgulayarak, örgüt içi iklimin ve çalışan motivasyonunun da çıktılara etkide bulunduğunu göstermiştir (Mayo, 1933, s. 45; Roethlisberger ve Dickson, 1939, s. 27). Ardından, Sistem Yaklaşımı etkinliği örgüt-çevre etkileşimi çerçevesinde değerlendirmiş; çevresel uyum ve girdi-çıktı döngüsüne odaklanmıştır (Katz ve Kahn, 1978, s. 34).

Son dönemde ise araştırmacılar, etkinliği çoklu paydaş beklentileri ve örgüt kültürü boyutunda incelemiş; böylece kavram daha kapsamlı ve çok boyutlu bir yapıya bürünmüştür (Quinn ve Rohrbaugh, 1981, s. 136; Daft, 2021, s. 22).

2.1.1.1. Klasik Yönetim Kuramları Dönemi

20.yüzyılın başlarında, etkinlik iş süreçlerinin verimliliği ve rasyonel hale getirilmesiyle ilişkilendirilmiştir (Taylor, 1911, s. 33).

Frederick W. Taylor, Bilimsel Yönetim yaklaşımıyla işçilerin standartlaştırılmış hareketlerle daha yüksek verim elde etmesini sağlayarak performansı artırmayı amaçlamıştır (Taylor, 1911, s. 35).

Henri Fayol ise, yöneticilerin planlama, örgütleme, komuta, koordinasyon ve kontrol faaliyetlerini etkili bir şekilde yürütmesiyle örgütlerin hedeflerine ulaşabileceğini savunmuş; bu çerçeveyi hiyerarşik düzenle bağdaştırmıştır (Fayol, 1949, s. 62). Bu dönemde, etkinlik nicel çıktılar (örneğin, üretim hızı, maliyet düşürme) üzerinden ölçülmüş; insani faktörler genellikle göz ardı edilmiştir (Scott, 1961, s. 45). Endüstriyel üretimde bu yaklaşım, erken dönemde süreçlerin mekanik optimizasyonuna odaklanmayı yansıtır.

2.1.1.2. İnsan İlişkileri ve Davranışsal Yaklaşımlar

Klasik teorilerin verimlilik odaklı ve kuralcı yaklaşımı, örgüt içinde çalışanların psikolojik ve sosyal ihtiyaçlarını ihmal ettiği gerekçesiyle eleştirilmiştir (Mayo, 1933, s. 45).

- **Elton Mayo** (Hawthorne Deneyleri): Mayo, insanların örgüt içindeki ilişkileri, motivasyon ve grup dinamiklerinin, örgüt performansı ve etkinliğini nasıl etkilediğini ortaya koymuştur (Mayo, 1933, s. 47).
- **Roethlisberger ve Dickson:** Yaptıkları saha çalışmaları sonucunda, örgüt içinde “informal” grupların oluşmasının, iş tatmini ve verimlilik üzerinde belirleyici rol oynadığını göstermiştir (Roethlisberger ve Dickson, 1939, s. 27).

Bu dönemde, örgütsel etkinlik; yalnızca yönetim ilkeleri ve mekanik düzenlemelerle değil, çalışan motivasyonu, lider-çalışan ilişkileri ve örgütsel iklim gibi insani ve sosyal faktörlerle de ilişkili hale gelmiştir (Katz ve Kahn, 1978, s. 32).

2.1.1.3. Sistem Yaklaşımları ve Açık Sistem Perspektifi

1960'lar ve 1970'lerde, örgütler ve süreçler açık sistem olarak ele alınmaya başlanmıştır (Katz ve Kahn, 1978, s. 34).

Açık Sistem Özellikleri: Dış çevreden girdi alan, bu girdileri işlemlerden geçirerek çıktı üreten ve geri bildirim mekanizmalarıyla çevresiyle sürekli etkileşim içinde olan dinamik yapılar (Katz ve Kahn, 1978, s. 36).

Örgütsel Etkinlik ve Çevresel Uyum: Bu yaklaşıma göre etkinlik, örgüt içi yapı ve süreçlerin çevre koşullarıyla uyumlu hale getirilmesiyle mümkün olur. Kurumun sürdürülebilirliği ve rekabet gücü, bu uyum yeteneğinin derecesine bağlıdır (Daft, 2021, s. 22).

Sistem yaklaşımı, örgütlerin tekil bir çıktıya (örneğin kâr veya üretim hızı) odaklanmak yerine, çevreleriyle sürekli etkileşim hâlinde değerlendirilmeleri gerektiğini vurgulayarak etkinlik kavramının daha geniş bir çerçevede ele alınmasına olanak sağlamıştır (Katz ve Kahn, 1978, s. 38).

2.1.1.4. Modern ve Postmodern Yaklaşımlar

1980'lerden itibaren yaşanan küreselleşme, bilgi teknolojilerinin gelişimi ve artan rekabet, örgütlerin performans ölçütlerine yenilik, kalite ve müşteri odaklılık gibi unsurları eklemiştir (Deming, 1986, s. 29).

Toplam Kalite Yönetimi (TKY): Sürekli iyileştirme (continuous improvement), müşteri memnuniyeti ve süreç optimizasyonu gibi kavramlar, örgütsel etkinlik üzerinde doğrudan etkili olmaya başlamıştır (Deming, 1986, s. 31).

Stratejik Yönetim ve Paydaş Teorisi: Stratejik planlama ve paydaş odaklılık, örgütlerin uzun vadeli hedeflerle kısa vadeli sonuçları dengeleme kapasitesini artırarak etkinlik anlayışını zenginleştirmiştir (Freeman, 1984, s. 59).

Postmodern Yaklaşımlar: Postmodern bakış açısı, örgüt kültürü, simgesel etkileşim ve söylem analizi gibi örgütün anlam dünyasına dair unsurları da etkinlik değerlendirmelerine katmıştır (Quinn ve Rohrbaugh, 1981, s. 135).

2.1.2. Etkinlik Kavramının Boyutları

Örgüt veya bireylerin belirlenmiş amaçlara ulaşma düzeyini çok yönlü bir çerçevede ele alır (Cameron, 1981, s. 66).

2.1.2.1. Örgütsel Etkinlik

Örgütlerde etkinlik, kurumun amaç ve vizyon doğrultusunda ürettiği çıktıların niteliği, paydaş memnuniyeti, pazar payı, kârlılık, çalışan bağlılığı gibi çok boyutlu göstergelerin tamamını kapsar (Cameron, 1981, s. 69).

İçsel Faktörler: Liderlik tarzı, örgüt kültürü, yapı, örgüt içi iletişim, karar alma mekanizmaları vb. (Daft, 2021, s. 25).

Dışsal Faktörler: Rekabet koşulları, ekonomik dalgalanmalar, yasal düzenlemeler, teknolojik yenilikler vb. (Katz ve Kahn, 1978, s. 36).

Paydaş Memnuniyeti: Müşteriler, çalışanlar, yatırımcılar ve toplumun genel beklentileri, örgütsel etkinlik düzeyinin kritik bir göstergesidir (Freeman, 1984, s. 62).

2.1.2.2. İş Süreci Etkinliği

İş süreci etkinliği, belirli bir faaliyet veya üretim sürecinin hedeflenen kalite, maliyet ve zaman kriterlerine uygunluğunu değerlendirir (Deming, 1986, s. 34).

Süreç İyileştirme: Verimlilik artışı, israfın azaltılması, kalitenin yükseltilmesi gibi hedefler (Deming, 1986, s. 37).

Yalın Yönetim (Lean Management): Süreçteki gereksiz aşamaların (muda) tespit edilmesi ve yok edilmesi, etkinliği artıran temel yaklaşımlardan biridir (Deming, 1986, s. 39).

Bu çerçevede, süreç performansı ile örgüt genelindeki stratejik hedefler arasında güçlü bir bağ kurulması, iş süreci etkinliğini örgütsel etkinliğin önemli bir bileşeni hâline getirir (Daft, 2021, s. 27).

2.1.2.3. Bireysel Etkinlik

Bireysel etkinlik, kişilerin zaman yönetimi, öz-yeterlilik (self-efficacy), motivasyon ve bireysel beceri düzeylerini yansıtır (Bandura, 1997, s. 56).

Kişisel Hedefler ve Motivasyon: Bireyin kendi belirlediği hedeflere ulaşması, içsel motivasyonun gücüyle doğrudan ilişkilidir; bu da bireysel etkinlik seviyesini belirler (Ryan ve Deci, 2000, s. 70).

Öğrenme ve Gelişim: Bireyin yeni beceriler edinme, hatalardan ders çıkarma ve öz-düzenleme kapasitesi, etkinlik düzeyini büyük ölçüde etkiler (Locke ve Latham, 1990, s. 28).

2.1.2.4. Toplumsal ve Kurumsal Sosyal Etkinlik

Kurumsal sosyal sorumluluk, sürdürülebilirlik, çevre koruma ve toplumsal refaha katkı gibi unsurlar, etkinlik kavramının sosyal boyutunu yansıtır (Quinn ve Rohrbaugh, 1981, s. 140).

Kamusal Kurumlar ve STK'lar: Kamu kurumlarında veya sivil toplum kuruluşlarında, toplumsal faydaya ulaşma derecesi “etkinlik” göstergesinin en kritik unsuru olabilir (Cameron, 1981, s. 71).

Şirketler ve Ortak Değer Yaratma: Şirketlerin sadece kâr odaklı değil, aynı zamanda topluma ve çevreye katkı sağlama çabaları, etkinliklerini ölçmede yeni kriterler sunar (Porter ve Kramer, 2011, s. 5).

2.1.3. Teorik Yaklaşımlar

Sistem Yaklaşımı (System Approach), örgütleri çevreleriyle etkileşim içinde olan açık sistemler olarak ele alır; girdi, dönüşüm süreci ve çıktı arasındaki bütüncül uyuma odaklanır (Katz ve Kahn, 1978, s. 38). Paydaş Yaklaşımı (Strategic Constituencies Approach), örgüt etkinliğini farklı paydaşların (çalışan, müşteri, hissedar vb.) memnuniyetini karşılama derecesiyle ölçer (Cameron, 1981, s. 72). Değer Odaklı Yaklaşım (Value-Based Approach) ise, ekonomik, sosyal ve çevresel katma değeri uzun vadeli bir perspektifle birleştirerek “ortak değer” yaratılmasına vurgu yapar (Freeman, 1984, s. 62). Bu farklı kuramsal çerçeveler, etkinlik kavramının çok boyutlu doğasını ve değişen çevre koşullarına uyum sağlamasının önemini ortaya koyar.

2.1.3.1. Hedef Odaklı Yaklaşım (Goal Approach)

Etkinlik kavramı, örgütlerin veya bireylerin belirlenen amaçlara ulaşma düzeyini farklı açılardan değerlendirmeyi sağlar. Hedef Odaklı Yaklaşım (Goal Approach), etkinliği belirlenen hedeflere ulaşma başarısı üzerinden tanımlar (Campbell, 1977, s. 24).

Avantaj: Sonuçlar doğrudan somut hedeflerle karşılaştırılabildiği için başarı/başarısızlık analizi net yapılabilir (Gaertner ve Ramnarayan, 1983, s. 97).

Dezavantaj: Sadece çıktılara odaklanmak, sürecin niteliği veya paydaş memnuniyetini göz ardı etme riski taşır (Quinn ve Rohrbaugh, 1981, s. 136).

2.1.3.2. Sistem Yaklaşımı (System Approach)

Örgüt, açık bir sistem olarak görülür; çevresinden girdi alır, bunu süreçlerden geçirip çıktı üretir ve geri bildirim döngüsü ile kendini yeniler (Katz ve Kahn, 1978, s. 38).

Özellik: Örgüt ve çevre arasındaki sürekli etkileşimi vurgular (Daft, 2021, s. 29).

Katkı: Etkinlik değerlendirmesinde iç ve dış faktörlerin bir bütün olarak ele alınmasıyla, örgütlerin sürdürülebilirliğe odaklanmasını sağlar (Katz ve Kahn, 1978, s. 40).

2.1.3.3. Paydaş Yaklaşımı (Strategic Constituencies Approach)

Örgüt etkinliğini, örgütün hizmet veya ürün sunduğu, etkileşimde bulunduğu tüm paydaşların (çalışanlar, müşteriler, tedarikçiler, hissedarlar, toplum vb.) beklentilerini karşılama derecesi üzerinden değerlendirir (Cameron, 1981, s. 72).

Çok Boyutlu Değerlendirme: Finansal performans, çalışan bağlılığı, müşteri memnuniyeti, toplumsal katkı gibi farklı göstergelerin hepsi dikkate alınır (Freeman, 1984, s. 59).

Çıkar Çatışmaları: Farklı paydaşların farklı çıkar ve önceliklere sahip olması, tek bir “etkinlik” tanımına ulaşmayı güçleştirebilir (Daft, 2021, s. 31).

2.1.3.4. Değer Odaklı Yaklaşım (Value-Based Approach)

Etkinliği, örgüt veya bireyin yarattığı ekonomik, sosyal ve çevresel değerlerin toplamı olarak tanımlar (Freeman, 1984, s. 62; Porter ve Kramer, 2011, s. 5).

Kurumsal Sosyal Sorumluluk (KSS) ve Sürdürülebilirlik: Uzun vadeli bakış açısıyla, kâr elde etmenin yanı sıra topluma katkı ve çevre koruma temel etkinlik göstergeleri hâline gelebilir (Quinn ve Rohrbaugh, 1981, s. 140).

Ortak Değer Yaratma (CSV-Creating Shared Value): Şirketlerin faaliyetleri, ekonomik değeri toplumsal ilerleme ile entegre ediyorsa gerçek bir “etkinlik” söz konusu olur (Porter ve Kramer, 2011, s. 8).

2.1.4. Etkinlik Ölçümü ve Değerlendirme Yöntemleri

Etkinlik (effectiveness), örgütlerin, bireylerin veya programların belirlenen amaçlara ulaşma düzeyini, yarattıkları değeri ve paydaş beklentilerini ne ölçüde karşıladıklarını göstermesi bakımından stratejik öneme sahip bir kavramdır (Cameron, 1981, s. 66; Daft, 2021, s. 17). Literatürde etkinlik, sadece sonuç odaklı (hedefe ulaşma) değil, aynı zamanda süreç kalitesi, kaynakların verimli kullanımı ve değer yaratma gibi farklı boyutların bütüncül olarak değerlendirilmesiyle ölçülür (Freeman, 1984, s. 56; Quinn ve Rohrbaugh, 1981, s. 135).

2.1.4.1. Temel Performans Göstergeleri (KPI'lar)

KPI (Key Performance Indicators): Herhangi bir örgüt ya da sürece dair en kritik başarı faktörlerini yansıtan ölçütlerdir (Daft, 2021, s. 35).

Finansal KPI'lar: Kârlılık, pazar payı, nakit akışı, yatırım geri dönüşü (ROI).

Operasyonel KPI'lar: Üretim miktarı, hata/arıza oranı, stok devir hızı, teslim süresi.

Pazarlama ve Müşteri KPI'ları: Müşteri memnuniyeti skoru (CSAT), sadakat endeksi (NPS), müşteri kazanma maliyeti (CAC).

Avantaj: Hızlı kıyaslama, trend analizi ve hedeflerle doğrudan ilişkili olması.

Dezavantaj: Tek boyutlu kalabilir, süreç kalitesini veya insani faktörleri tam yansıtmayabilir (Locke ve Latham, 1990, s. 28).

2.1.4.2. Verimlilik ve Kaynak Analizi

Bu yaklaşım, etkinliği girdi-çıktı (input-output) üzerinden nicel biçimde değerlendirmeyi içerir (Taylor, 1911, s. 33).

Verimlilik Oranları: Çalışan başına üretim, birim maliyet, makine kullanımı, zaman başına çıktı (Daft, 2021, s. 27).

Stochastic Frontier Analysis ve Data Envelopment Analysis (DEA):

Özellikle iktisat ve üretim alanında, benzer karar birimlerinin (fabrika, hastane vb.) relatif verimliliğini karşılaştırmak için kullanılır (Cooper vd, 2004, s. 3).

Avantaj: Kolay yorumlanabilir ve karşılaştırılabilir.

Dezavantaj: Sadece nicel çıktılarının olduğu durumlarda etkili; sosyal ya da kalite faktörlerini yakalamakta yetersiz (Deming, 1986, s. 37).

2.1.4.3. ROI (Return on Investment) Yöntemi

ROI, yapılan bir yatırımın ya da projenin finansal geri dönüşünü ölçmek için geliştirilmiştir (Phillips, 2003, s. 14). Özellikle eğitim, pazarlama veya proje yönetimi gibi alanlarda etkilidir.

ROI % = ((Elde Edilen Getiri- Yatırım Maliyeti) / Yatırım Maliyeti) x 100

Phillips ROI Metodu: Eğitim veya insan kaynakları programlarında, kazanılan becerilerin örgüte getirdiği getiriye parasal olarak hesaplamayı hedefler (Phillips, 2003, ss. 42–45).

Avantaj: Yatırım kararları ve bütçe yönetimi için somut bir ölçüt sunar.

Dezavantaj: Etkinliğin sosyal veya nitel boyutları göz ardı edilebilir (Freeman, 1984, s. 59).

2.1.4.4. Balanced Scorecard (BSC)

Kaplan ve Norton (1992), örgütlerin performansını yalnızca finansal kriterlerle değil, dört ana perspektifte ölçmeyi önerir:

Finansal Perspektif: Kârlılık, maliyet yapısı, nakit akışı

Müşteri Perspektifi: Müşteri memnuniyeti, sadakat, pazar payı

İç Süreç Perspektifi: Üretim kalitesi, hata oranı, lojistik süre

Öğrenme ve Gelişim Perspektifi: Çalışan eğitimi, inovasyon kapasitesi, bilgi yönetimi

Avantaj: Çok boyutlu bir bakış sunar; stratejiyle günlük operasyonu bağlar (Kaplan ve Norton, 1992, s. 75).

Dezavantaj: Öz değerlendirmeye dayalı olabildiği için subjektif kalabilir; uygulama için iyi tasarlanmış bir süreç yönetimi gerekir.

2.1.4.5. EFQM (European Foundation for Quality Management)

Mükemmellik Modeli

EFQM Modeli, örgütleri liderlik, strateji, insanlar, iş birliği, kaynaklar ve süreçler gibi alanlarda puanlayarak, müşteri sonuçları, çalışan sonuçları, toplum sonuçları ve iş sonuçları dahil kapsamlı bir değerlendirme yapar (EFQM, 2020).

Öz Değerlendirme: Kurumlar modelde yer alan her kriter için güçlü yönler ve iyileştirme alanları belirler (EFQM, 2020, s. 15).

Sürekli İyileştirme: EFQM, Toplam Kalite Yönetimi (TKY) ilkeleriyle örtüşen bir “mükemmellik kültürü” geliştirmeyi amaçlar.

2.1.4.6. Malcolm Baldrige Ulusal Kalite Ödülü (MBNQA)

ABD merkezli bu program, liderlik, strateji, müşteri, ölçüm-analiz ve bilgi yönetimi, iş gücü, operasyonlar ve sonuçlar gibi kategorilerde kurum performansını değerlendirir (Evans ve Lindsay, 2017, s. 387–390).

Kendini Değerlendirme: Başvuran kurumlar, detaylı soru setleriyle kendi sistemlerini analiz eder, ardından bağımsız değerlendiricilerin incelemesinden geçer.

Kapsamlı Geri Bildirim: Saha ziyaretleri ve raporlar, kurumun hem güçlü hem de geliştirmeye açık yönlerini ortaya koyar (Evans ve Lindsay, 2017, s. 391).

Avantaj: Uygulamalı ve kurumsal öğrenmeyi teşvik eder.

Dezavantaj: Hazırlık ve uygulama maliyeti yüksek olabilir; büyük ölçekli kurumlara daha uygundur (Deming, 1986, s. 42).

2.1.4.7. The Performance Prism

Neely, Adams ve Kennerley tarafından geliştirilen Performance Prism modeli, paydaşların sadece kurumdan ne beklediğini değil, kurumun da paydaşlardan ne beklediğini dikkate alarak çift yönlü bir değer yaratımını vurgular (Kennerley ve Neely, 2003, s. 215).

Paydaş Tatmini (stake holder satisfaction)

Paydaş Katkısı (stake holder contribution)

Stratejiler

Süreçler

Kabileyetler (capabilities)

Bu yaklaşım, paydaş yaklaşımı (strategic constituencies approach) ile stratejik yönetim bakışını birleştirerek daha esnek bir yapı sunar.

2.1.4.8. Diğer Kurumsal Modeller

The Skandia Navigator: Entelektüel sermayeyi bileşenlerine ayırarak işletmelerin bilgi varlıklarını daha etkili yönetmelerini sağlar. Bu yaklaşım, insan sermayesi, yapısal sermaye ve müşteri sermayesi gibi unsurları ölçülebilir hale getirerek bilgi yönetimi performansını artırmayı hedefler (Bontis, 1999, s. 435).

Performance Pyramid: Kurumsal amaçları en üst seviyede tanımlar ve bu amaçları alt seviyedeki departman ve operasyonel hedeflerle ilişkilendirir. Böylece stratejik ve operasyonel planlama arasında dikey bir uyum sağlanır (Neely vd., 1995, s. 85).

2.1.4.9. Sosyal Getiri (Social Return on Investment, SROI)

Özellikle kâr amacı gütmeyen kuruluşlar, sosyal girişimler ve kurumsal sosyal sorumluluk projeleri için kullanılan SROI, finansal getirinin yanı sıra sosyal ve çevresel etkileri parasal olarak ifade etmeyi amaçlar (Nicholls vd., 2009).

Ölçüm Mantığı: Yaratılan sosyal fayda veya çevresel katkı, mümkün olduğunca ekonomik değere dönüştürülür ve yatırılan kaynaklarla karşılaştırılır.

Avantaj: Sosyal projelerin etkinliğini yatırımcı ve paydaşlara somut rakamlarla sunar.

Dezavantaj: Sosyal faydayı parasal ölçüye indirgeme zorlukları; öznel varsayımlar gerekebilir (Freeman, 1984, s. 62).

2.1.4.10. Logic Model ve Program Değerlendirme Yaklaşımları

Sosyal programlar (eğitim, sağlık, toplumsal kalkınma projeleri vb.) için program değerlendirme çerçeveleri kullanılır (McLaughlin ve Jordan, 1999).

Logic Model: Girdi (*inputs*), faaliyet (*activities*), çıktı (*outputs*), sonuç (*outcomes*) ve etki (*impact*) olmak üzere beş aşamadan oluşan nedensel bir şemadır (McLaughlin ve Jordan, 1999, s. 66).

CIPP Modeli (Context, Input, Process, Product): Programların bağlam (context), girdi (input), süreç (process) ve ürün (product) boyutlarında sistematik olarak değerlendirilmesini amaçlayan kapsamlı bir çerçeve sunar (Zhang vd., 2011).

Avantaj: Toplumsal veya kamusal projelerde “etkinliği” çok boyutlu inceleme olanağı sunar.

Dezavantaj: Karma yöntem yaklaşımlarında, geçerli veri üretimi için kapsamlı veri toplama ve sistematik izleme temel gereksinimlerden biridir (Teddle ve Tashakkori, 2009, s. 85).

2.1.4.11. Most Significant Change (MSC) Tekniği

Nitel değerlendirme yöntemlerinden biri olan MSC, bir proje veya program sonucunda ortaya çıkan “en önemli” değişim hikâyelerini toplayarak, etkinin niteliğini ortaya koyar (Davies ve Dart, 2005). Bu teknik, toplumsal projelerde paydaşların kendi deneyimlerini anlatmasına dayalı olarak, “etkinliğin” hikâyesini netleştirmeyi hedefler.

2.1.4.12. Kirkpatrick’ın Dört Düzeyli Modeli

Özellikle eğitim ve geliştirme programlarının etkinliğini ölçmek amacıyla Donald Kirkpatrick tarafından geliştirilen bu model, dört düzey öngörür (Connecticut Department of Administrative Services, 2013):

Reaksiyon: Katılımcı memnuniyeti, eğitime duyulan ilgi.

Öğrenme: Bilgi, beceri veya tutum kazanımı.

Davranış: İş veya günlük yaşamdaki davranış değişikliği.

Sonuçlar: Performans artışı, kalite iyileşmesi, kuruma/kişiye katma değer.

Avantaj: Öğrenme sürecindeki farklı aşamalarda etkinliği tanımlar.

Dezavantaj: Son iki düzeyi ölçmek, organizasyonel ve bireysel değişimi takip etmeyi gerektirdiğinden daha karmaşık ve uzun soluklu olabilir (Phillips ve Phillips, 2019).

2.1.4.13. Phillips’ın ROI Modeli (Eğitim ve Gelişim)

Kirkpatrick modeline ek olarak, beşinci düzey olarak ROI oranı eklenmiştir (Phillips ve Phillips, 2019). Eğitim sonrası oluşan faydanın parasal karşılığı hesaplanarak yatırımın geri dönüşü ölçülür.

2.1.4.14. Kalitatif (Nitel) ve Katılımcı Yöntemler

Verimliliğe ilişkin derinlemesine ve bağlamsal bilgiler sunan araştırma tekniklerini ifade eder. Bu yöntemler, sayı verilerinin ötesine geçerek, insan deneyimi ve örgüt kültürü gibi faktörleri daha iyi anlamaya olanak tanır (Mayo, 1945, s. 49). Örneğin, odak grup görüşmeleri veya yarı yapılandırılmış mülakatlar, çalışanların süreçlerdeki engelleri, motivasyon eksikliklerini veya yeni fırsatları kendi ifadeleriyle ortaya koymasına imkân tanır (Roethlisberger ve Dickson, 1939, s. 27). Ayrıca, katılımcı gözlem veya eylem araştırması (action research) gibi yaklaşımlar, araştırmacının örgüt içi süreçlere aktif olarak dâhil olmasını ve sürekli iyileştirme uygulamalarına doğrudan katkı sunmasını sağlar (Lewin, 1946, s. 215). Böylece, nicel verilerde görülmeyen kültürel ve psikososyal öğeler daha net ortaya çıkar, bu da verimliliği artırmaya yönelik daha bütüncül ve insan odaklı stratejilerin geliştirilmesini mümkün kılar (Katz ve Kahn, 1978, s. 42).

2.1.4.15. Odak Grup Görüşmeleri ve Derinlemesine Mülakatlar

Odak grup ve mülakat teknikleri, örgüt içi veya paydaşların bakış açılarını detaylı biçimde ele almaya yarar (Mayo, 1933, s. 47). Etkinliğin “nasıl” ve “neden” boyutunu aydınlatmak için önemlidir (Roethlisberger ve Dickson, 1939).

2.1.4.16. Delphi Tekniği

Uzmanlardan oluşan bir panelin, birden fazla tur boyunca görüşlerini paylaştığı ve geribildirimle dayalı olarak konsensüs oluşturduğu bir tekniktir (Linstone ve Turoff, 1975). Örgüt veya proje etkinliği konusunda uzman görüşü almak için kullanılır.

2.1.4.17. Eylem Araştırması (Action Research)

Araştırmacının, katılımcı bir yaklaşımla örgüt içinde değişim ve iyileştirme sürecini bizzat yönettiği veya eşlik ettiği yöntemdir (Lewin, 1948). Süreç boyunca etkinlik artırıcı müdahalelerde bulunulur ve sonuçlar anlık olarak değerlendirilir.

2.1.4.18. Karma ve Bütünleşik Çerçeveler

Günümüzde, etkinlik gibi çok boyutlu kavramların analizi hem nicel hem de nitel yöntemleri bütünleştiren araştırma desenleri ile daha sağlıklı sonuçlar verir (Teddlie ve Tashakkori, 2009, s. 99).

Örneğin:

Nicel Veri: KPI'lar, anketler, istatistiksel analizler

Nitel Veri: Odak grup, mülakat, gözlem

Avantaj: Hem genel eğilimleri (nicel) hem de eğilimlerin arkasındaki sebepleri (nitel) ortaya koyar (Deming, 1986, s. 42).

Dezavantaj: Uygulama süreci zaman ve uzmanlık ister (Daft, 2021, s. 40).

2.1.4.19. Veri Zarflama Analizi (Data Envelopment Analysis – DEA)

Veri Zarflama Analizi (DEA), Charnes ve arkadaşları (1978, s. 430) tarafından geliştirilmiş olup, çoklu girdi ve çoklu çıktı yapısına sahip karar verme birimlerinin göreceli etkinliğini ölçer.

Temel modelleri:

CCR(Charnes-Cooper-Rhodes) Modeli: Sabit getiri varsayımı (Constant Returnsto Scale).

BCC (Banker-Charnes-Cooper) Modeli: Değişken getiri varsayımı (Variable Returnsto Scale).

DEA'da doğrusal programlama ile her karar birimi için en uygun ağırlıklar bulunur ve etkinlik puanı $[0,1]$ aralığında hesaplanır. 1 (veya %100) puan alan karar birimleri “etkin” kabul edilir (Cooper vd., 2006, s. 25).

Avantajları:

Fonksiyonel form gerektirmeden çoklu girdi-çıkıtı ilişkisini analiz edebilir.

Uygulaması nispeten basittir ve farklı sektörlerde (bankacılık, hastane, eğitim vb.) yaygın kullanılmaktadır.

Dezavantajları:

Rastgele hatayı (noise) modele dâhil etmez; aykırı değerler (outliers) veya ölçüm hataları sınırı çarpıtabilir.

İstatistiksel hipotez testleri ve tahmin aralıkları kısıtlıdır (Simar ve Wilson, 2003, s. 33).

2.1.4.20. Slack Tabanlı Ölçüm (Slack-Based Measure, SBM) Modeli

DEA literatüründe Slack-Based Measure (SBM) modeli, karar birimlerinin hem girdi fazlası hem çıktı açığını doğrudan dikkate alarak etkinlik düzeyini ölçmekte ve bu sapmaları “cezalandırıcı” şekilde değerlendirmektedir (Tone, 2001, s. 499).

CCR veya BCC gibi klasik DEA modellerinde, radyal bir iyileştirme söz konusudur: Girdiler belli bir oranda azaltılır veya çıktılar belli bir oranda artırılır. Ancak bu iyileştirme yapıldıktan sonra kalan slackler (örneğin gereksiz kaynak kullanımı, eksik çıktı üretimi) göz ardı edilebilir.

SBM Modeli hem girdi fazlalarını hem de çıktı eksiklerini eş zamanlı olarak değerlendirerek, karar biriminin gerçek iyileştirme potansiyelini daha hassas biçimde ortaya koyar. Yani, radyal olmayan bu yaklaşım sayesinde, “radyal etkinlik” elde eden bir karar biriminin aslında daha fazla iyileştirme alanı olup olmadığı saptanabilir (Tone, 2001, s. 500).

SBM Modelinin Avantajları:

Daha Duyarlı Ölçüm: Girdi ve çıktılardaki “slack” miktarlarını bütüncül şekilde cezalandırarak daha gerçekçi bir etkinlik skoru sunar.

Çoklu Girdi-Çıktı Yapısına Uygun: Klasik DEA gibi farklı girdilerin ve çıktının yer aldığı durumlarda da kolayca uygulanabilir.

Radyal Olmayan Yaklaşım: Her girdi ve çıktı ayrı ayrı değerlendirilir, bu sayede tek bir oransal değişime dayalı analiz yerine çok daha ince ayarlı sonuçlar elde edilir.

SBM Modelinin Dezavantajları:

Artan Karmaşıklık: Klasik DEA modellerine kıyasla daha fazla kısıt ve değişken içerir, bu da hesaplamaları görece zorlaştırabilir.

Veri Hassasiyeti: DEA'nın genelinde olduğu gibi SBM de aykırı değerlere (outliers) ve ölçüm hatalarına karşı duyarlıdır; verideki tutarsızlıklar sonuçları ciddi biçimde çarpıtabilir.

Literatürde SBM yaklaşımı, özellikle farklı açılardan verimsizliğin kaynağına inmek ve karar verme birimlerinin hangi boyutlarda (girdi veya çıktı bazında) iyileştirmeye ihtiyaç duyduğunu saptamak isteyen araştırmacı ve yöneticiler için önemlidir.

2.1.4.21. Malmquist Verimlilik Endeksi

Malmquist Endeksi, Caves ve arkadaşları (1982, s. 1395) tarafından önerilen bir yaklaşım olup, zaman içinde verimlilikteki değişimi analiz eder. Färe ve Grosskopf (2004, s.203) ise bu endeksi DEA çerçevesinde somutlaştırmıştır. Malmquist Endeksi iki temel bileşene ayrılır:

Teknik Etkinlik Değişimi (TEC): Karar biriminin verimlilik sınırından uzaklığındaki değişim.

Teknoloji Değişimi (TC): Sınırın kendisinin zaman içinde ileri veya geri kayması (teknolojik gelişme veya gerileme).

Bu yaklaşım, dönemsel verilerle firmaların veya ülkelerin verimlilik performansını dinamik olarak izlemede kullanışlıdır.

2.1.5. Sürekli İyileştirme ve Geri Bildirim Döngüleri

Etkinlik ölçüm sonuçları, çoğu zaman Toplam Kalite Yönetimi, Yalın Yönetim (Lean) veya Altı Sigma gibi çerçevelerle birlikte işlenir (Deming, 1986, s. 44).

PUKÖ Döngüsü (Plan-Do-Check-Act): Planlama, uygulama, kontrol ve düzeltme adımlarının tekrarıyla sürekli geri bildirim ve iyileştirme sağlanır (Deming, 1986, s. 88).

Öğrenen Örgüt Yaklaşımı (Senge, 1990): Bireysel ve örgütsel öğrenme kapasitelerinin artırılması, etkinlik düzeyini uzun vadede sürdürülebilir kılar.

2.1.6. Sonuç ve Değerlendirme

Etkinliği ölçmek ve değerlendirmek, tek boyutlu bir iş olmaktan çıkıp; finansal, operasyonel, insani, toplumsal, çevresel ve öğrenme odaklı pek çok unsuru kapsayan çok boyutlu bir süreçtir (Quinn ve Rohrbaugh, 1981, s. 140). Bu nedenle, literatürde bir dizi yöntem ve model geliştirilmiş, her biri farklı perspektifler ve amaçlarla kullanılabilir hâle gelmiştir:

Klasik Yaklaşımlar: Nicel performans göstergeleri (KPI, verimlilik analizi, ROI)

Çağdaş Çerçeveler: Balanced Scorecard, EFQM, MBNQA, Performance Prism

Sosyal Boyutlu Yaklaşımlar: SROI, Logic Model, CIPP Model, Toplumsal etki değerlendirme yöntemleri

Kişisel ve Eğitim Odaklı Yöntemler: Kirkpatrick Modeli, Phillips ROI Modeli

Nitel ve Katılımcı Yöntemler: Delphi, Eylem Araştırması, Derinlemesine Mülakat, Odak Grup

Karma Yaklaşımlar (Mixed Methods): Nicel ve nitel bulguları entegre ederek daha zengin bir analiz

Sürekli İyileştirme Döngüleri: PUKÖ, TKY, Yalın Yönetim, Altı Sigma

Uygulanan yöntemler, çoğu zaman çalışmanın bağlamına, hedef kitlesine ve eldeki kaynaklara göre belirlenmektedir (Creswell vd., 2011, s. 53). En kapsamlı sonuçlara ise, birden fazla yöntemin birlikte kullanıldığı çoklu değerlendirme (triangulation) tasarımlarıyla ulaşılabileceği görüşü yaygın kabul görmektedir (Deming, 1986, s. 39).

Yapay zekâ, veri analitiği ve otomasyon araçları, etkinlik ölçümünü daha fazla gerçek zamanlı veriyle destekler. Kurumlar, büyük veri analizleri sayesinde süreçlerinde anlık iyileştirme yapabilir (Daft, 2021, s. 42).

Proje yönetiminde yaygınlaşan çevik metodolojiler (Scrum, Kanban vb.), hızlı geribildirim döngüleri ve adaptasyon kapasitesiyle etkinliği artırmayı hedefler (Locke ve Latham, 1990, s. 36).

Yatırımcılar artık sadece kârlılık değil, çevresel, sosyal ve yönetim performansını da değerlendirerek kurumun uzun vadeli etkinliğini ölçmektedir (Porter ve Kramer, 2011, s. 5).

COVID-19 sonrası dönemde dijital araçların ve uzaktan çalışma modellerinin artışı, iş birliği ve etkinlik kavramlarını yeniden şekillendirmiştir (Waizenegger vd., 2020, s. 429).

2.2. Verimlilik Kavramı

Verimlilik (productivity, efficiency), hem mikro ölçekte işletmelerin rekabet gücünde hem de makro ölçekte ekonomilerin büyüme ve refah düzeyinde kritik bir unsur olarak kabul edilmektedir (OECD, 2001, s. 11; Porter, 1990, s. 70). Tarihsel süreç içerisinde farklı disiplinlerden araştırmacılar, verimlilik kavramına çeşitli bakış açıları kazandırmıştır. Bu çalışma, verimlilik kavramının tarihsel ve kuramsal temellerini detaylı biçimde inceleyerek, ölçüm yöntemleri, disiplinler arası yaklaşımlar ve geleceğe dair eğilimleri bir arada sunmayı amaçlamaktadır.

2.2.1. Tarihsel Gelişim ve Kavramsal Çerçeve

Verimlilik ölçümüne dair ilk sistematik fikirler, 18. yüzyılın sonlarında Adam Smith'in (1776) iş bölümü ve uzmanlaşma konusundaki gözlemleriyle şekillenmiştir. Smith, iş bölümü sayesinde aynı kaynaklarla daha yüksek çıktı elde edilebileceğini öngörmüş, bu yaklaşım verimlilik analizine de zemin hazırlamıştır (Smith, 1776, s. 4).

19.yüzyılın sonları ve 20. yüzyılın başlarında, Frederick Winslow Taylor (1911) "Bilimsel Yönetim" anlayışıyla iş süreçlerini parçalı biçimde analiz etmiş; zaman etüdü, hareket etüdü ve standartlaştırma teknikleriyle üretim faaliyetlerinin ölçülmesine öncülük etmiştir (Taylor, 1911, s. 25). Aynı dönemde, Frank ve Gilbreth (1917), zaman-hareket etüdü çalışmalarıyla işin organizasyon ve verimlilik boyutunu daha da derinleştirmiştir (Gilbreth ve Gilbreth, 1917, s. 10).

20.yüzyılın ortalarında, Robert M. Solow (1956; 1957) "toplam faktör verimliliği" (TFV) kavramını geliştirerek teknolojik ilerleme ve örgütsel yeniliklerin makro düzeydeki büyümeye katkısını açıklamıştır (Solow, 1956, s. 66; 1957, s. 315). Özellikle 1970'lerden itibaren, çoklu girdi-çıkıtı yapısına sahip

işletmelerin görelİ etkinliğini ölçmek üzere geliştirilen Veri Zarflama Analizi (DEA), Charnes ve arkadaşları (1978) tarafından ortaya konulmuş ve bu yöntemle kurumların etkinliği çeşitli boyutlarda değİlendirilmiştir (Charnes vd., 1978, s. 429). Günümüzde ise dijital dönüşüm, sürdürülebilirlik ve inovasyon unsurlarının da eklenmesiyle verimlilik ölçümü daha kapsamlı hale gelmiş hem teorik hem de uygulamalı çalışmalar hızlı bir gelişim göstermeye devam etmektedir.

2.2.1.1. İlk Tanımlar ve Sanayi Devrimi Etkisi

Verimlilik fikrinin temelleri, 18. yüzyılın sonu ve 19. yüzyılın başında atılmıştır. Adam Smith (1776, s. 15) iş bölümü ve uzmanlaşmanın toplumsal refahı artırmadaki rolünü vurgulayarak, üretim süreçlerindeki bölümlenmenin verimliliği yükselteceğini belirtmiştir. Modern anlamda ‘verimlilik’ olgusu ise 19. yüzyılın ortalarından itibaren belirginleşmiştir (Färe vd., 1994, s. 66).

20. yüzyılın başında, Frederick Winslow Taylor (1911, s. 10) ‘Bilimsel Yönetim’ yaklaşımıyla iş etüdü, zaman etüdü ve standartlaştırma gibi yöntemler geliştirerek iş istasyonları düzeyinde verimliliği ölçmeye ve artırmaya odaklanmıştır (Taylor, 1911, s. 10; Wrege ve Greenwood, 1991, s. 23). Taylor’un yöntemleri hem mühendislik hem de işletme yönetimi literatürü için dönüştürücü bir etki yaratmıştır.

2.2.1.2. Yüzyılın İkinci Yarısı

Verimlilik çalışmaları, 20. yüzyılın ortasında ekonomi bilimiyle daha da bütünleşmiştir. Solow (1956, s. 70; 1957, s. 314) tarafından geliştirilen büyüme modelleri, ekonomik büyümenin sadece emek ve sermaye artışıyla değil, aynı zamanda *toplam faktör verimliliği* (TFV) adı verilen “artık” faktörle ilişkili olduğunu göstermiştir. Bu, teknolojik gelişme, yenilik, beşerî sermaye ve kurumsal faktörlerle beslenen bir büyüme dinamiğidir (Denison, 1962, s. 5).

Stephen R. Covey (1989, s. 45), yönetsel uygulamalarda ‘verimlilik’ ile ‘etkinlik’ ayrımına dikkat çekmiş; verimliliğin ‘işin doğru şekilde yapılması’, etkinliğin ise ‘doğru işin yapılması’ olduğunu öne sürmüştür. Bu ayrım, örgüt teorisi ve yönetim bilimi alanında temel bir referans noktası olarak kabul edilmeye devam etmektedir.

2.2.2. Disiplinlerarası Yaklaşım

Verimlilik kavramı, farklı disiplinlerin kesişim noktasında yer alan çok boyutlu bir araştırma alanıdır. Geleneksel olarak iktisat bilimi içinde ‘çıktı/girdi’ oranı ve toplam faktör verimliliği (TFV) çerçevesinde ele alınsa da yönetim bilimi, endüstri mühendisliği ve sosyoloji gibi alanlardan gelen katkılarla kapsamı genişlemiştir (Kamacı vd., 2019, s. 23).Örneğin endüstri mühendisliğinde zaman ve hareket etüdü ile yalın yönetim gibi teknik araçlar verimlilik analizi için başvurulan temel uygulamalar iken, örgüt kuramı ve sosyoloji perspektifinde çalışan motivasyonu, örgüt kültürü ve liderlik unsurları da verimlilik üzerinde belirleyici faktörler olarak görülmektedir (Mayo, 1933, s. 12).

Benzer biçimde kamu yönetimi alanı, kamusal hizmetlerin maliyet-etkin ve toplumsal faydayı gözetken bir biçimde sunulmasına odaklanarak verimliliğe yeni bir boyut kazandırmakta; ekonomi politikaları ise ülke düzeyinde büyüme ve rekabet gücünü artırmak amacıyla verimliliğin makro-ekonomik yönlerini ön plana çıkarmaktadır (Pollitt ve Bouckaert, 2011, s. 34). Dolayısıyla verimlilik, yalnızca işletme içinde kaynak kullanımının optimize edilmesi değil, aynı zamanda sosyal, örgütsel ve kurumsal değişkenleri de içeren, disiplinler arası bir yapıyı zorunlu kılan dinamik bir kavramdır.

2.2.2.1. Ekonomi Perspektifi

İktisat teorisinde verimlilik, üretim faktörlerinin (iş gücü, sermaye, teknoloji, hammadde vb.) ne ölçüde etkin kullanıldığını ifade eder (Denison, 1967, s. 10). Burada “kısmi faktör verimliliği” (ör. çıktı/iş gücü) ve “toplam faktör verimliliği (TFV)” (tek bir indekste tüm girdilerin değerlendirilmesi) olmak üzere iki temel ölçüm düzeyi bulunmaktadır (Solow, 1957, s. 316). TFV artışı, ülke düzeyinde uzun dönemli ekonomik büyümenin ve rekabetçiliğin en önemli belirleyicilerinden biri olarak kabul edilir (Färe vd., 1994, s. 66).

2.2.2.2. Yönetim ve Organizasyon Perspektifi

Yönetim literatüründe verimlilik, örgüt içi süreçlerin düzenlenmesi, insan kaynakları yönetimi ve stratejik planlamayla bütünleşik biçimde ele alınır (Robbins ve Coulter, 2012, s. 27).

Yalın üretim ilkeleri, gereksiz zaman, hareket ve stok gibi israfları ortadan kaldırarak süreç verimliliğini artırmayı hedefler. Bu yaklaşım, değer akış haritalaması gibi tekniklerle israfların görselleştirilmesini ve ortadan kaldırılmasını sağlar (Hines ve Rich, 1997, s. 51).

Toplam Kalite Yönetimi (TKY) ve Sürekli İyileştirme (Kaizen) yaklaşımı da yine örgüt içi verimliliği yükseltmek adına kalite, standartlaşma ve müşteri odaklılık gibi unsurlara vurgu yapar (Imai, 1986, s. 5; Crosby, 1979, s. 20).

İş Süreçleri Yeniden Yapılandırma (Business Process Reengineering – BPR) yaklaşımı ise köklü ve radikal süreç tasarım değişiklikleriyle, kurumsal verimlilikte büyük sıçramalar hedefler (Hammer ve Champy, 1993, s. 11).

2.2.2.3. Mühendislik ve Endüstri Mühendisliği Perspektifi

Mühendislik bakış açısı, verimliliği teknik optimizasyon, zaman-maliyet dengelemesi ve süreç iyileştirme perspektifiyle ele almaktadır (Badiru ve Omitaomu, 2011, s. 45). Zaman ve Metot Etüdü, Hat Dengeleme ve Veri Zarflama Analizi (DEA) gibi araçlar, üretim sürecindeki darboğazların ve israfların tespitinde etkin biçimde kullanılmaktadır (Charnes vd., 1978, s. 430; Kamble ve Kulkarni, 2014, s. 2). Stokastik Sınır Analizi (SFA) da benzer şekilde, işletmelerin teknik etkinlik seviyelerini belirleyerek iyileştirme potansiyelini ortaya koyar (Aigner vd., 1977, s. 22).

2.2.2.4. Kamu Yönetimi ve Politikalar Perspektifi

Kamu yönetimi bağlamında verimlilik, kamusal hizmetlerin minimum maliyetle, maksimum sosyal fayda ile sunulmasını amaçlar (Pollitt ve Bouckaert, 2011, s. 30). Performans yönetimi, stratejik planlama ve hesap verebilirlik gibi araçlar, kamu kurumlarının verimli çalışmasını sağlamada önemlidir (Hood, 1991, s. 3). Ancak kamu sektöründe verimlilik analizine, “kamu yararı” ve “hizmet kalitesi” gibi nitel faktörler de eklenmek zorundadır.

2.2.2.5. Sosyoloji ve Örgüt Kültürü Perspektifi

Verimlilik artışı çalışmalarında, insan faktörü ve örgüt kültürü belirleyici olabilir (Mayo, 1933, s. 12). Çalışan motivasyonu, iletişim ve örgüt içi güven gibi sosyolojik unsurlar, sadece teknik veya finansal düzenlemelerle elde edilemeyen verimlilik kazanımlarının önünü açabilir. Bu nedenle günümüzde “insan odaklı” yönetim modelleri, verimlilik stratejilerinin ayrılmaz bir parçası hâline gelmiştir (Freeman, 1984, s. 25).

2.2.3. Verimlilik Ölçüm Yöntemleri

Verimlilik ölçüm yöntemleri, yaklaşımlarına ve analiz kapsamlarına göre kategorize edilebilir. Parametrik ve parametrik olmayan yöntem ayrımı, bu literatürde sıklıkla benimsenen bir çerçevedir (Coelli vd., 2005, s. 5). Ayrıca, kısmi verimlilik, toplam faktör verimliliği, endeks tabanlı yöntemler ve çok kriterli analiz gibi çeşitli yaklaşımlar mevcuttur.

2.2.3.1. Kısmi Verimlilik Ölçütleri

Kısmi verimlilik, çıktının tek bir girdi tipine oranlanması temeline dayanır. Literatürde sıkça karşılaşılan bazı kısmi verimlilik ölçütleri şunlardır:

İş Gücü Verimliliği (Emek Verimliliği): Çıktı / İş gücü (saat veya kişi).

Sermaye Verimliliği: Çıktı / Sermaye kullanımı (makine parkı, ekipman değeri, finansal sermaye).

Enerji Verimliliği: Çıktı / Enerji tüketimi (kilowatt-saat vb.).

Avantajları:

Hesaplaması ve yorumlaması görece kolaydır (Sumanth, 1984, s. 25).

Spesifik bir kaynağın etkin kullanımını hızla değerlendirmeye olanak tanır.

Dezavantajları:

Diğer girdilerin sabit veya ihmal edilebilir olduğu varsayılır.

Çıktının çok boyutlu niteliğini göz ardı etme eğilimindedir (Tangen, 2004, s. 727).

2.2.3.2. Toplam Faktör Verimliliği (TFV)

Toplam Faktör Verimliliği (TFV), aynı anda birden fazla girdiyi (iş gücü, sermaye, ara mallar, enerji vb.) dikkate alır (Solow, 1957, s. 316). Büyüme muhasebesinde ve makroekonomik analizlerde yaygın olarak kullanılan bu kavram, üretim artışının ne kadarının girdi artışlarından ne kadarının verimlilik artışından (teknolojik ilerleme, örgütsel yenilik vb.) kaynaklandığını ölçer (Denison, 1962, s. 5).

Örnek:

Tipik bir üretim fonksiyonu olarak Cobb-Douglas formu:

$$Y = A \times K^{\alpha} \times L^{1-\alpha}$$

Burada Y çıktı, K sermaye, L iş gücü, A ise verimliliği temsil eder. Zaman içinde A'nın artışı TFV artışına işaret eder (Solow, 1956, s. 70).

Avantajları:

Büyüme analizlerinde, uzun dönem ekonomik performansı açıklama gücü yüksektir.

Birden fazla girdiyi bütünleştirebildiği için tek boyutlu yaklaşımlara kıyasla daha kapsamlıdır.

Dezavantajları:

Fonksiyonel form (ör. Cobb-Douglas, CES, Translog) varsayımına dayalı olması eleştiriye açıktır.

Mikro düzeyde (işletme bazında) veriye indirgenmesi ve analizi karmaşık olabilir (Coelli vd., 2005, s. 11).

2.2.3.3. Parametrik Yöntemler

Parametrik yöntemler, bir üretim veya maliyet fonksiyonunun belirli bir matematiksel biçimde tanımlanmasına dayanır. Ekonometrik tahmin teknikleriyle hem parametreler hem de verimsizlik düzeyleri tahmin edilir.

Stokastik Sınır Analizi (Stochastic Frontier Analysis – SFA)

Stokastik Sınır Analizi (SFA), Aigner ve arkadaşları (1977, s. 22) tarafından geliştirilmiştir. Model, üretim sınırını (*production frontier*) tanımlar ve her

gözlemin (ör. işletme, firma) bu sınırdan ne kadar uzaklaştığını ölçer. Toplam hata terimi iki kısma ayrılır:

Rastgele hata bileşeni (v_i): Ölçüm hataları, beklenmeyen şoklar.

Verimsizlik bileşeni (u_i): Firma veya karar biriminin teknik etkinlikten sapma derecesi.

Matematiksel olarak:

$$Y_i = f(x_i, \beta) e^{v_i - u_i}$$

Fonksiyonel form genellikle Cobb-Douglas veya Translog olarak seçilir (Kumbhakar ve Lovell, 2000, ss. 15–16). SFA, özellikle ekonomik araştırmalarda yaygındır; zira gürültü ve verimsizlik arasındaki ayrımı netleştirir.

Avantajları:

Rastgele gürültüyü (ölçüm hatalarını) modele dâhil eder.

Parametrik tahminle istatistiksel çıkarım (t-testi, güven aralığı vb.) yapılabilir.

Dezavantajları:

Fonksiyonel form ve dağılım (ör. yarı-normal, eksponansiyel) varsayımları, sonuçları etkileyebilir (Coelli vd., 2005, s. 196).

Çoklu çıktının aynı anda analizi görece daha karmaşıktır.

Diğer Parametrik Yaklaşımlar

Genelleştirilmiş Metotlar: Maliyet sınır analizi, kâr sınır analizi gibi türev yaklaşımlar (Kumbhakar ve Lovell, 2000, s. 45).

Panel Veri Yaklaşımları: Zaman serisi ve kesitsel verinin birleşimini kullanarak, verimsizliğin durağan veya dinamik olup olmadığını sorgular (Battese ve Coelli, 1995, s. 326).

2.2.3.4. Parametrik Olmayan (Non-Parametrik) Yöntemler

Parametrik olmayan yaklaşımlar, herhangi bir üretim fonksiyonu varsayımına dayanmaz. Veride gözlemlenen işletmelerin girdileri ve çıktıları üzerinden “en iyi uygulama sınırı” (best practice frontier) elde edilir.

Diğer Non-Parametrik Endeksler

Törnqvist Endeksi: Girdi ve çıktı fiyat/miktar değişimlerini ağırlıklı ortalama biçiminde bütünleştirir (Diewert, 1976, s. 115).

Fisher Endeksi: Farklı dönemlerin fiyat ve miktar endekslerini geometrik ortalama olarak birleştirir (Triplett, 1992, s. 20).

Luenberger Göstergesi: Yönlü mesafe fonksiyonları kullanarak kâr veya maliyet bazlı verimlilik değişimini inceler (Chambers vd., 1998, s. 351).

2.2.3.5. Çok Kriterli Karar Verme (MCDM) ve Entegre Yaklaşımlar

Günümüzde verimlilik ölçümü, yalnızca ekonomik çıktılara veya teknik etkinliğe odaklanmaktan öte, sosyal ve çevresel göstergeleri de içeren bir çerçeveye evrilmektedir (Zhou vd., 2008, s. 2). Bu nedenle Çok Kriterli Karar Verme (MCDM) yöntemleriyle verimlilik analizi entegre edilebilmektedir:

- DEA + AHP (Analitik Hiyerarşi Süreci) veya DEA + TOPSIS hibrit yaklaşımları, bir yandan örgütlerin teknik verimliliğini ölçerken diğer yandan nitel kriterleri de (inovasyon düzeyi, kalite, müşteri memnuniyeti, çevresel etki vb.) değerlendirmeye olanak tanır.
- Sürdürülebilir verimlilik analizlerinde, karbon emisyonu, atık miktarı veya enerji tasarrufu gibi göstergeler eklenerek “yeşil DEA” veya “çevresel verimlilik” modelleri oluşturulur (Zhou vd., 2008, s. 4).
- Bu yaklaşım, verimliliği sadece çıktıyı maksimize etmek olarak değil, aynı zamanda sosyal ve ekolojik sorumlulukları da optimize etmek şeklinde genişleten bir perspektif sunar.

2.2.3.6. Yöntem Seçiminde Etkili Faktörler

Verimlilik ölçüm yönteminin seçimi, çeşitli parametrelere bağlı olarak değişir:

Veri Yapısı:

- Yeterli veri yoksa veya veri kalitesi düşükse, karmaşık parametrik yöntemler yanıltıcı olabilir (Coelli vd., 2005, s. 25).

- Non-parametrik yöntemler, az gözlemlili çalışmalarda (ör. küçük birim sayısına sahip işletmeler) daha esnek olabilir.

Analiz Boyutu (Zaman – Kesit – Panel):

- Zaman içindeki değişimi incelemek isteniyorsa Malmquist Endeksi veya panel veri tabanlı SFA tercih edilebilir (Färe vd., 1994, s. 69).
- Yalnızca tek bir dönemdeki görelili etkinliğı incelemek için DEA veya kesitsel SFA yeterli olabilir.

Analizin Amacı:

- Mikro düzeyde (işletme performansı, şube karşılaştırması) DEA oldukça popülerdir (Charnes vd., 1978, s. 432).
- Makro düzeyde (sektör veya ülke analizi) toplam faktör verimliliğı ve büyüme muhasebesi yaklaşımları öne çıkar (Denison, 1962, s. 6).

Çıktıların ve Girdilerin Niteliğı (Tek Boyut vs. Çok Boyut):

- Tek bir çıktının olduğı üretim süreçlerinde, parametrik yöntemler fonksiyonel form varsayımıyla kolayca uygulanabilir.
- Çok boyutlu çıktıların söz konusu olduğı sektörlerde, DEA gibi non-parametrik yöntemler daha doğru sonuçlar verebilmektedir (Emrouznejad ve Yang, 2018, s. 5).

Rastgele Gürültü (Noise) ve Aykırı Değerler (Outliers):

- SFA, gürültüyü modele dâhil eder; DEA ise gürültüyü verimsizliğe yansıtır. Eğer veri setinde ciddi ölçüm hataları veya aykırı değerler varsa, DEA sonuçları daha fazla çarpılabilir (Simar ve Wilson, 2007, s. 33).
- Slack-Based Measure (SBM) modelinde de benzer şekilde aykırı değerler, “slack” değerlerini aşırı etkileyebilir.

2.2.3.7. Literatürdeki Eleştiriler ve Son Yönelimler

Fonksiyonel Form Varsayımları

Parametrik yöntemler (SFA vb.) için Cobb-Douglas veya Translog varsayımları her zaman gerçeğı yeterince yansıtmayabilir. Bazı araştırmacılar, esnek biçimli fonksiyonlar (flexible functional forms) veya yarı-parametrik yöntemler kullanmayı savunur (Kumbhakar ve Lovell, 2000, ss. 47–49).

Gürültü ve Aykırı Değer Sorunu

DEA gibi non-parametrik yöntemler, verideki her gözlemi “sınırı” belirlerken kritik alana yerleştirir (Charnes vd., 1978, s. 432). Dolayısıyla veri setinde hatalı veya ekstrem değerler varsa, etkinlik sınırını yapay biçimde değiştirebilir. Bu sorunu hafifletmek için robust DEA (sağlam DEA) veya Jackknife/Bootstrap gibi istatistiksel teknikler önerilir (Simar ve Wilson, 2007, ss. 35–36).

Çok Boyutlu Çıktılar ve Kalite Unsuru

Verimlilik ölçümünün salt niceliksel çıktıya indirgenmesi, hizmet sektörü veya kamu sektörü gibi alanlarda yeterli olmayabilir (Pollitt ve Bouckaert, 2011, s. 35). Kalite, vatandaş memnuniyeti, iş güvenliği, yenilik kapasitesi gibi unsurların da verimlilik analizine dahil edilmesi gerektiği savunulur (Neely vd., 2005, s. 1230). Bu amaçla kalite ayarlı DEA modelleri, ağırlıklandırılmış çıktı fonksiyonları veya çok kriterli karar verme yöntemleri kullanılmaktadır.

Sürdürülebilirlik ve Yeşil Verimlilik

Günümüzde çevresel faktörlerin ve sürdürülebilirlik kriterlerinin verimlilik analizine dahil edilmesi giderek önem kazanmaktadır (Zhou vd., 2008, s. 3). Green DEA, Eco-Efficiency veya Ekolojik Verimlilik gibi kavramlar öne çıkmış; girdi veya çıktı setine atıklar, emisyonlar, geri dönüşüm oranları vb. eklenmiştir. Böylece ekonomik çıktının yanında çevresel çıktı/input da hesaba katılarak gerçek verimlilik düzeyi analiz edilebilmektedir (Chambers vd., 1998, s. 352).

Dijital Dönüşüm, Büyük Veri ve Makine Öğrenmesi

Endüstri 4.0, Nesnelerin İnterneti (IoT), Büyük Veri ve Makine Öğrenmesi gibi yeni teknolojik trendler, verimlilik ölçümünde kullanılabilecek veri hacmini ve veri çeşitliliğini artırmıştır (Kagermann vd., 2013, s. 10). Geleneksel yöntemler büyük veri kümeleriyle uğraşmakta zorlanabilirken, makine öğrenmesi tabanlı yaklaşımlar (ör. rasgele ormanlar, yapay sinir ağları) üretim süreçlerini dinamik olarak modelleyerek gerçek zamanlı verimlilik analizi yapma potansiyeli taşımaktadır. Ancak bu yöntemlerin henüz klasik verimlilik kuramlarıyla tam entegre olduğu söylenemez; bu alanda yeni araştırmalara ihtiyaç duyulduğu vurgulanmaktadır (Lee vd., 2015, s. 19).

Genel Değerlendirme ve Gelecek Perspektifleri

Verimlilik ölçüm yöntemlerinin gelişimi, ekonomik ve teknolojik ilerlemelerle paralel seyretmiştir. 20. yüzyılın ortalarında toplam faktör verimliliği, büyüme modellerinin temel bileşeni hâline gelirken; 1970'lerden itibaren Veri Zarflama Analizi ve Stokastik Sınır Analizi, işletme ve sektörel düzeyde verimlilik ölçümlerinde popülerlik kazanmıştır (Aigner vd., 1977, s. 23; Charnes vd., 1978, s. 429). Sonraki dönemde DEA'nın klasik modelleri (CCR/BCC) yanında Slack-Based Measure (SBM) gibi yaklaşımlar geliştirilerek, verimsizliğin farklı boyutları daha hassas şekilde analiz edilebilmiştir (Tone, 2001, s. 499).

Günümüzde sürdürülebilirlik, kurumsal sosyal sorumluluk, kalite yönetimi, yenilikçilik ve dijitalleşme gibi temalar verimlilik ölçümünün kapsamını genişletmekte, çok boyutlu ve entegre modellerin geliştirilmesine zemin hazırlamaktadır (Zhou vd., 2008, s. 4). Örneğin Malmquist Endeksi veya Green DEA gibi yaklaşımlar hem zamana bağlı değişimi hem de çevresel faktörleri dikkate alarak verimlilik performansına daha derinlemesine bir bakış sunar (Färe vd., 1994, s. 69).

Gelecekte veri analitiği, makine öğrenmesi, yapay zekâ ve gerçek zamanlı izleme sistemlerinin kullanımı yaygınlaştıkça, verimlilik ölçümünün de yalnızca geriye dönük bir değerlendirme aracı olmaktan çıkıp anlık iyileştirme ve karar destek mekanizmalarına dönüşmesi beklenmektedir (Lee vd., 2015, s. 20). Bu doğrultuda, karma yöntem (mixed methods) yaklaşımları, simülasyon ve optimizasyon teknikleriyle birleştirilmiş verimlilik ölçümleri, uygulama sahasında daha büyük yer edinebilir.

2.2.4. Verimlilik Artış Stratejileri

Sanayi işletmelerinde verimliliğin artırılması hem rekabet gücünün korunması hem de sürdürülebilir kalkınma hedeflerine ulaşılması açısından stratejik bir öneme sahiptir. Bu doğrultuda, teknoloji entegrasyonu, süreç iyileştirme, yalın üretim uygulamaları, çalışan motivasyonunun artırılması ve kaynak kullanımının optimize edilmesi gibi çeşitli stratejiler işletmeler tarafından

benimsenmektedir. Bu bölümde, literatürde öne çıkan başlıca verimlilik artış stratejileri ele alınarak sanayi üretim süreçlerine olan etkileri irdelenecektir.

2.2.4.1. Teknolojik Yenilik ve Dijital Dönüşüm:

Yapay zekâ, robotik otomasyon, büyük veri ve Nesnelerin İnterneti (IoT) gibi teknolojiler üretim süreçlerinin hızını ve doğruluğunu artırır (Van Ark, 2016, s. 6; Kagermann vd., 2013, s. 5).

2.2.4.2. Beşerî Sermaye Gelişimi:

Eğitim, mesleki gelişim programları ve çalışan motivasyonunu artıran uygulamalar, verimlilikte kalıcı iyileşmeyi destekler (Hanushek ve Woessmann, 2008, s. 615).

2.2.4.3. İş Süreçleri İyileştirme ve Yalın Yaklaşım:

Sürekli iyileştirme (Kaizen), 5S, Kanban ve Just-in-Time gibi yalın üretim yöntemleri, israfı minimize ederek üretim akışının daha verimli ve dengeli hale gelmesini sağlar (Özdaoğlu ve Rebiş, 2016; Ekşi, 2017).

2.2.4.4. Organizasyonel Esneklik ve Kültür:

Yatay ve esnek örgüt yapıları, karar alma süreçlerinin hızlanmasına ve yenilikçi fikirlerin desteklenmesine katkı sağlar (Mintzberg, 1992, s. 112).

2.2.4.5. Stratejik Ortaklıklar ve Tedarik Zinciri Yönetimi:

Tedarik zincirinde etkin entegrasyon, stok ve lojistik maliyetlerini düşürerek toplam verimliliği artırır (Masa'deh vd., 2022, s. 3). Dış kaynak kullanımı (out sourcing) ile işletmeler, uzmanlaşmadıkları alanları dış firmalara devrederek temel yetkinliklerine odaklanabilir (Iheriohanma ve Wokoma, 2021, s. 12).

2.2.4.6. Sürdürülebilirlik ve Yeşil Verimlilik:

Atık yönetimi, enerji verimliliği ve çevre dostu teknolojilerin kullanımı hem maliyet avantajı sağlar hem de çevresel sorumlulukların yerine getirilmesine katkı

sunar (Ghisellini vd., 2016, s. 12). Bu yaklaşım, “Üçlü Sorumluluk” (Triple Bottom Line) kapsamında sosyal, çevresel ve ekonomik performansı bütünleştirir.

2.2.4.7. Politika Reformları ve Kurumsal Yönetişim:

Hukukun üstünlüğü, rekabetçi piyasa yapısı, Ar-Ge teşvikleri ve istikrarlı makroekonomik çerçeve, verimliliği destekleyen kurumsal zemini oluşturur (North, 1990, s. 54).

2.2.5. Verimlilik ile İlgili Kavramlar

Verimlilik (Efficiency), belirli bir çıktının en az kaynakla elde edilmesi anlamına gelirken; etkinlik (Effectiveness), doğru işin yapılmasına odaklanır (Ghisellini vd., 2016, s. 12).

2.2.6. Verimlilik ve Performans İlişkisi

Performans, verimliliği de kapsayan daha geniş bir kavramdır (Neely vd., 2005, s. 1230). Verimlilik, performansın özellikle ekonomik ve teknik boyutunu temsil eder; ancak kalite, yenilik ve müşteri memnuniyeti gibi diğer boyutlar da örgütsel performansın önemli bileşenleridir.

2.2.7. Verimlilik ve Rekabetçilik

Küresel piyasalarda rekabet gücü, çoğunlukla verimli üretim altyapısı ve yenilikçi kapasite ile ilişkilidir (Porter, 1990, s. 22). Verimlilik artışı, bir işletmenin veya ülkenin daha düşük maliyetle daha yüksek kalite sunabilmesini sağlar.

2.2.8. Yeni Eğilimler ve Gelecek Perspektifleri

Sanayi üretimi alanında yaşanan teknolojik dönüşümler, dijitalleşme, çevresel sürdürülebilirlik talepleri ve toplumsal beklentiler, verimlilik analizlerine yönelik yeni yaklaşımların doğmasına neden olmuştur. Endüstri 4.0, yapay zekâ destekli karar mekanizmaları, döngüsel ekonomi modelleri ve yeşil üretim uygulamaları gibi eğilimler hem üretim süreçlerinin hem de performans değerlendirme kriterlerinin yeniden tanımlanmasına yol açmaktadır. Bu bölümde,

çimento sektörü başta olmak üzere sanayi üretiminde öne çıkan güncel gelişmeler ile geleceğe dönük stratejik perspektifler ele alınacaktır.

2.2.8.1. Endüstri 4.0 ve Dijital Dönüşüm

Siber-fiziksel sistemler, bulut bilişim, büyük veri analitiği ve yapay zekâ uygulamaları, üretim süreçlerini gerçek zamanlı olarak izleyip optimize etme olanağı sunar (Kagermann vd., 2013, s. 8; Lee vd., 2015, s. 19). Bu gelişmeler, üretim ve hizmet sektörlerinde çarpıcı verimlilik artışlarını beraberinde getirmektedir.

2.2.8.2. Sürdürülebilir Verimlilik

Ekonomik başarının yanı sıra sosyal ve çevresel sorumlulukların gözetilmesi gerektiği fikri, “yeşil verimlilik” veya “sürdürülebilir verimlilik” kavramını öne çıkarır (Zhou vd., 2016, s. 142). Yenilenebilir enerji kullanımı, karbon ayak izinin azaltılması ve atık yönetimi, işletmelerin uzun vadede hem itibarını artırır hem de maliyet tasarrufu sağlar.

2.2.8.3. Paylaşım Ekonomisi ve Platform Modeller

Airbnb, Uber, Alibaba gibi platformlar; var olan kaynakların (ev, araba, depo vb.) etkin kullanımını sağlayarak toplumsal düzeyde yeni bir verimlilik anlayışını doğurmaktadır (Schor, 2014, s. 4). Paylaşım ekonomisi, arz ile talebi gerçek zamanlı eşleştirerek kapasite kullanım oranlarını yükseltir.

2.2.8.4. Uzaktan Çalışma ve Esnek Modeller

Özellikle COVID-19 sonrası dönemde hızlanan uzaktan çalışma ve hibrit modeller, işletmelerin mekân maliyetlerini azaltırken çalışan verimliliğini de farklı şekillerde etkilemektedir (Barrero vd., 2021, s. 4). Uygun planlama ve dijital altyapı ile bu modellerin verimlilik artışına katkısı büyüktür (Gajendran ve Harrison, 2007, s. 1525).

2.2.9. Sonuç ve Değerlendirme

Verimlilik kavramı, tarihsel süreçte Sanayi Devrimi'nden günümüze çok boyutlu bir gelişim göstermiş; başlangıçta iş bölümü ve standartlaşma üzerinde yoğunlaşırken, 20. yüzyılda toplam faktör verimliliği, teknolojik ilerleme ve örgütsel yönetime uzanan geniş bir kuramsal çerçeveye kavuşmuştur (Färe vd., 1994, s. 69; Taylor, 1911, s. 11). Farklı disiplinlerin (ekonomi, yönetim, mühendislik, kamu yönetimi, sosyoloji vb.) bakış açıları, verimliliği yalnızca “çıktı/girdi oranı” ile sınırlı bir ölçüt olmaktan çıkararak, kültürel, kurumsal ve teknolojik faktörlerle harmanlanmış bir analiz düzeyine taşımıştır.

Günümüzde dijital dönüşüm, sürdürülebilirlik ve paylaşım ekonomisi gibi olgular, verimliliğe daha bütüncül ve yenilikçi açılardan yaklaşılmasını gerektirmektedir. Örneğin Endüstri 4.0 uygulamaları, gerçek zamanlı veri toplama ve büyük veri analizi sayesinde üretim süreçlerinde radikal iyileştirmeler vaat eder (Kagermann vd., 2013, s. 9). Sürdürülebilirlik ekseninde ise ekonomik verimlilik ile toplumsal/çevresel sorumlulukların nasıl dengelenebileceği gündeme gelmektedir (Elkington, 1997, s. 37).

Verimlilik, yalnızca maliyeti düşürmek veya çıktıyı artırmakla ilgili değildir; örgüt kültüründen çalışan motivasyonuna, toplumsal faydadan çevresel etkilere dek uzanan geniş bir etki alanına sahiptir (Mayo, 1933, s. 14). Bu nedenle, gelecekteki çalışmaların ve politikaların, teknik ve finansal çözümlerle insan odaklı, sürdürülebilir yaklaşımları bütünleştirmesi beklenmektedir. Böylece verimlilik artışı hem kurumsal hem de toplumsal düzeyde kalıcı ve kapsayıcı değer yaratabilir.

3. UYGULAMADA KULLANILAN YÖNTEMLER

Bu çalışma kapsamında, çimento üretim sektöründe faaliyet gösteren bir fabrikanın performansını değerlendirmek amacıyla Veri Zarflama Analizi (VZA), Slacks-Based Measure (SBM) ve Malmquist Toplam Faktör Verimlilik Endeksi yöntemleri kullanılmıştır. Bu yöntemler, çoklu girdiler ve çıktılarla işletmelerin relatif etkinliğini ve zaman içindeki verimlilik değişimlerini ölçmede etkili araçlar sunmaktadır. Enerji yoğun bir sektör olan çimento üretiminde, bu yöntemler teknik etkinlik, operasyonel performans ve çevresel etkilerin analizine olanak tanımaktadır. Aşağıda, her bir yöntemin teorik temelleri, matematiksel formülasyonları ve çimento sektörü bağlamındaki uygulanabilirliği ayrıntılı bir şekilde açıklanmıştır.

3.1. Veri Zarflama Analizi

Veri Zarflama Analizi (VZA), karar verme birimlerinin (KBB'ler) etkinliğini değerlendirmek için kullanılan doğrusal programlama tabanlı parametrik olmayan bir yöntemdir (Charnes vd., 1978, s. 429). VZA, özellikle çok girdi ve çok çıktılı üretim süreçlerinde performans ölçümü için yaygın olarak kullanılmaktadır. Geleneksel istatistiksel yöntemlerin aksine, VZA herhangi bir üretim fonksiyonunu varsaymaz ve gözlemlenen verilere dayanarak etkinlik sınırlarını belirler (Cooper vd., 2011, s. 12).

3.1.1. Veri Zarflama Analizinin Matematiksel Formülü

VZA, karar verme birimlerinin (KBB) etkinliğini ölçmek için doğrusal programlama modellerinden faydalanır. Bir KBB'nin etkinliği, girdileri (x) kullanarak çıktıları (y) üretme yeteneğiyle değerlendirilir.

Veri Zarflama Analizinde kullanılan temel doğrusal programlama modeli şu şekilde ifade edilir:

$$\max h_k = \frac{\sum_{r=1}^s u_r y_{rk}}{v_i x_{ik}}$$

Bu modelde;

- u ve v değişkenleri çıktı ve girdiler için belirlenen ağırlıkları temsil eder,
- h_k karar verme biriminin etkinlik skorunu ifade eder,

- y_{rk} ve x_{ik} , sırasıyla k karar birimi için çıktılar ve girdiler anlamına gelir.

Bu model, etkinliği 1 veya 100% olan birimlerin etkin kabul edilmesine olanak tanır (Charnes vd., 1978, s. 431).

3.1.2. Veri Zarflama Analizi Modelleri

Veri Zarflama Analizi (VZA), karar birimlerinin teknik etkinlik düzeylerini ölçmek amacıyla geliştirilen ve farklı model yapılarına göre uyarlanabilen esnek bir yöntemdir. Girdi ve çıktı yönelimli temel modellerin yanı sıra, sabit ve değişken getiriye göre ölçek varsayımlarıyla şekillenen çok sayıda VZA modeli literatürde yer almaktadır. Ayrıca zaman serisi analizlerine olanak tanıyan dinamik yapılar, çevresel faktörleri dikkate alan modeller ve slack (girdi fazlası–çıktı açığı) odaklı yaklaşımlar da metodolojik çeşitliliği artırmaktadır. Bu bölümde, VZA'nın temel model türleri açıklanacak; sabit ve değişken getiriye göre ölçek modelleri, yönelim farkları, SBM (Slack-Based Measure) modeli ve Malmquist verimlilik endeksi gibi uygulamada sıkça kullanılan yapılar kavramsal düzeyde ele alınacaktır.

3.1.2.1. CCR Modeli (Charnes, Cooper ve Rhodes Modeli)

CCR Modeli, 1978 yılında Charnes, Cooper ve Rhodes tarafından geliştirilmiştir. Bu model, ölçeğe göre sabit getiri (constant return to scale- CRS) varsayımına dayanır ve teknik etkinlik ile ölçek etkinliğinin birleşiminden oluşan toplam etkinliği ölçer (Charnes vd., 1978, s. 431).

CCR modeli, girdi yönelimli ve çıktı yönelimli olmak üzere iki şekilde ele alınabilir. Girdi yönelimli model, belirli bir çıktı düzeyini sağlamak için girdilerin minimize edilmesini amaçlarken, çıktı yönelimli model mevcut girdilerle elde edilebilecek maksimum çıktıyı belirlemeyi hedefler. Her iki model de doğrusal programlama teknikleri kullanılarak çözülmekte ve karar verme birimlerinin etkinlik skorlarını hesaplamaktadır (Cooper vd., 2011, s. 45).

CCR Modelinin Matematiksel Yapısı

CCR modeli, doğrusal programlama temelli bir etkinlik ölçüm modelidir. Matematiksel olarak, her bir KVB için etkinlik skoru aşağıdaki gibi tanımlanır:

Maksimize Amaç Fonksiyonu: $h_o \frac{\sum_{r=1}^s u_r y_{ro}}{v_i x_{io}}$

Burada:

h_o : İlgili KVB'nin etkinlik skoru

y_{ro} : o numaralı KVB için numaralı çıktı miktarı,

x_{io} : o numaralı KVB için i numaralı girdi miktarı,

u_r ve v_i : Çıktı ve girdilere ait ağırlıklar.

Bu modelin kısıtları şu şekilde ifade edilir:

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

ve

$$u_r, v_i \geq 0 \forall r, i$$

Bu doğrusal programlama modeli her bir KVB için çözülerek etkinlik skorları hesaplanır. Eğer bir KVB'nin etkinlik skoru 1 ise, bu birim etkin olarak kabul edilir. Skoru 1'den küçük olan KVB'ler ise etkin olmayan birimlerdir ve iyileştirme önerileri alırlar (Cooper vd., 2011, s. 45).

Girdi ve Çıktı Yönelimli Modeller

CCR modeli iki farklı biçimde ele alınır:

Girdi Yönelimli Model: Belirli bir çıktı seviyesini koruyarak girdileri minimize etmeyi amaçlar. Bu model, maliyet düşürme ve kaynakların daha verimli kullanımı için uygundur.

Çıktı Yönelimli Model: Girdiler sabit tutularak maksimum çıktı elde etmeye odaklanır. Üretim artırımı ve büyüme stratejileri açısından önemlidir (Charnes vd., 1978, s. 431).

Bu iki model arasındaki seçim, uygulamanın doğasına ve karar vericinin önceliklerine bağlıdır.

CCR Modelinin Avantajları ve Sınırlamaları

Avantajları

- Parametrik Olmaması: CCR modeli, üretim fonksiyonuna herhangi bir varsayım getirmez, bu da modelin esnekliğini artırır.
- Çoklu Girdi ve Çıktı Değerlendirme Yeteneği: Geleneksel oran analizlerinden farklı olarak, birden fazla girdi ve çıktı ile çalışabilme avantajına sahiptir.
- Karar Verme Sürecine Katkı: Model, etkin olmayan birimlerin neden etkin olmadığını ve nasıl iyileştirilebileceğini göstererek yöneticilere rehberlik eder (Thanassoulis, 2001, s. 67).

Sınırlamaları

- Ölçeğe Göre Sabit Getiri Varsayımı: Tüm birimlerin aynı ölçek verimliliğinde çalıştığını varsayar. Ancak, gerçek hayatta birçok KVB farklı ölçeklerde faaliyet göstermektedir.
- Veri Duyarlılığı: Model, kullanılan veriye duyarlıdır ve yanlış veri girişi etkinlik sonuçlarını ciddi şekilde etkileyebilir.
- Klasik CCR modeli, sadece pozitif veri ile çalışabilmektedir; ancak daha yeni yaklaşımlar negatif değerleri dikkate alabilen genişletilmiş modeller önermektedir (Emrouznejad ve Yang, 2018, s. 6).

Uygulama Alanları

CCR modeli birçok sektörde geniş bir uygulama alanına sahiptir:

Bankacılık Sektörü: Şubelerin etkinlik değerlendirilmesi.

Sağlık Hizmetleri: Hastanelerin veya kliniklerin performans ölçümü.

Eğitim Kurumları: Üniversitelerin ve bölümlerin etkinlik analizi.

Üretim ve Endüstri: Fabrikaların, tedarik zincirlerinin ve üretim hatlarının verimliliğinin değerlendirilmesi (Cooper vd., 2000, s. 112).

Uygulanabilirlik

Çimento üretiminde VZA, enerji tüketimi, hammadde kullanımı gibi girdiler ile üretim hacmi ve kalite gibi çıktıları analiz ederek fabrikanın rölatif

performansını değerlendirmede kullanılmıştır. Bu yöntem, fabrikanın diğer benzer birimler veya dönemlerle karşılaştırılmasında etkili bir araçtır.

Sonuç ve Değerlendirme

CCR modeli, etkinlik analizinde önemli bir yer tutan ve çok sayıda sektörde kullanılan güçlü bir yöntemdir. Modelin sunduğu avantajlar, karar vericilere kaynakların daha verimli kullanılmasını sağlamada rehberlik etmektedir. Ancak, ölçeğe göre sabit getiri varsayımı gibi sınırlamaları göz önünde bulundurulmalı ve gerektiğinde alternatif modeller ile uygulanmalıdır.

3.1.2.2. BCC Modeli (Banker, Charnes ve Cooper Modeli)

Banker, Charnes ve Cooper (BCC) modeli, 1984 yılında Charnes, Cooper ve Rhodes'un (CCR) sabit getiri varsayımına dayalı modelini esnek hâle getirerek ölçeğe göre değişken getiri (VRS) varsayımını içerecek şekilde genişletmiştir (Banker vd., 1984, s. 1081). Bu model, özellikle farklı ölçeklerde faaliyet gösteren karar birimlerinin etkinlik analizini yaparken, ölçek ekonomilerinin etkisini göz önünde bulundurarak daha gerçekçi sonuçlar sunmaktadır.

BCC modelinin geliştirilmesi, gerçek dünyadaki üretim süreçlerinin daha doğru bir şekilde modellenmesine olanak sağlamıştır. CCR modelinde varsayılan sabit getiri leği, birçok endüstri ve hizmet sektöründe geçerli olmamakta, bu nedenle ölçeğe göre değişken getiri varsayımı daha geniş bir uygulama alanı sunmaktadır (Cooper vd., 2011, s. 74). Bu bağlamda, BCC modeli, küçük ve büyük ölçekli karar birimlerinin etkinlik analizinde önemli bir rol oynamaktadır.

BCC Modelinin Teorik Temelleri

BCC modeli, VZA'nın gelişmiş bir versiyonu olup, karar birimlerinin yalnızca teknik etkinliklerini değil, aynı zamanda ölçek etkinliklerini de analiz etmeyi mümkün kılar. BCC modeli, CCR'a kıyasla ölçek getirisinde esneklik sağlayarak küçük ve büyük ölçekli birimler arasında daha adil kıyaslama yapılmasına olanak tanır (Emrouznejad ve Yang, 2018, s. 5). Böylece model etkinlik değerlendirmesinde daha hassas bir yaklaşım sunar.

BCC modelinin en belirgin farkı, üretim sürecinde artan, azalan veya sabit getiri durumlarını ele alabilmesidir. Bu doğrultuda, karar birimleri ölçeklerine bağlı olarak farklı etkinlik seviyelerinde faaliyet gösterebilirler. BCC modeli, etkinlik sınırını belirlerken ölçek etkisini de göz önünde bulundurur ve bu sayede bir birimin ölçek etkin olup olmadığını analiz edebilir (Banker vd., 1984, s. 1083).

Ölçek Etkinliği ve BCC Modeli

BCC modelinin en büyük avantajlarından biri ölçek etkinliğini analiz edebilmesidir. Ölçek etkinliği üç farklı kategoriye ayrılabilir:

Artan Getiri: Girdi miktarındaki artışın, çıktıyı daha büyük oranda artırdığı durumdur.

Azalan Getiri: Girdi artışıyla birlikte çıktının daha düşük oranda arttığı veya azaldığı durumdur.

Sabit Getiri: Girdi ve çıktının aynı oranda arttığı durumdur.

BCC modelinde ölçek etkinliği hesaplanarak, karar biriminin hangi getiri durumunda olduğu belirlenebilir.

Matematiksel Yapı ve Çözüm Yöntemleri

BCC modelinin matematiksel yapısı, klasik doğrusal programlama yaklaşımı ile formüle edilir. Modelin temel amacı, belirli girdi ve çıktıları kullanarak bir karar biriminin etkinliğini maksimize etmektir.

BCC modelinin primal formu şu şekilde yazılabilir:

$$\max \theta_k$$

Kısıtlar:

$$\sum_{j=1}^n u_j y_{jk} - \sum_{i=1}^m v_i x_{ik} + u_0 \leq 0, \forall k$$

$$\sum_{i=1}^m v_i x_{ik} = 1$$

$$u_j, v_i \geq 0, \forall i, j$$

Burada u_0 terimi ölçek ekonomisinin etkisini gösterir.

BCC modelinin dual formülasyonu ise, her karar birimi için etkin sınırın nasıl oluştuğunu belirler ve gölge fiyatları kullanarak etkinliği hesaplar.

BCC Modelinin Uygulama Alanları

Sağlık Sektöründe Kullanımı

BCC modeli, hastaneler, klinikler ve sağlık kuruluşlarının etkinliklerini değerlendirirken sıklıkla kullanılmaktadır. Örneğin, Türkiye’de yapılan bir çalışmada, özel ve devlet hastanelerinin etkinlikleri BCC modeli ile karşılaştırılmış ve kamu hastanelerinin ölçek etkinliğinin daha düşük olduğu bulunmuştur (O’Neill vd., 2008, s. 220).

Bankacılık Sektöründe Kullanımı

BCC modeli, bankaların etkinlik analizlerinde de kullanılmaktadır. Bir çalışmada, gelişmekte olan ülkelerdeki bankaların etkinlik seviyeleri karşılaştırılmış ve büyük ölçekli bankaların ölçek etkinliklerinin genellikle daha yüksek olduğu gösterilmiştir (Berger ve Humphrey, 1997, s. 184).

Eğitim Sektöründe Kullanımı

Üniversitelerin etkinliğini değerlendirmek için BCC modeli sıkça kullanılmaktadır. Özellikle öğrenci başına düşen akademik çıktı miktarına dayalı karşılaştırmalar, üniversitelerin ölçek etkinliklerinin analiz edilmesini sağlamaktadır (Johnes, 2006, s. 255).

BCC Modelinin Avantajları ve Kısıtları

Avantajları

- Ölçek ekonomilerini dikkate alarak daha gerçekçi etkinlik sonuçları sunar.
- Farklı büyüklüklerdeki karar birimlerini kıyaslama imkânı sağlar.
- Sabit getiri varsayımı yerine değişken getiri kullanarak geniş bir uygulama alanı sunar.

Kısıtları

- Büyük veri setleri için hesaplama maliyeti yüksektir.
- Modelin doğruluğu, kullanılan verilerin kalitesine bağlıdır.
- Ölçek etkinliği hesaplanırken hatalı sonuçlar ortaya çıkabilir.

Sonuç ve Değerlendirme

BCC modeli, ölçek etkinliğini analiz etme yeteneği sayesinde birçok sektörde geniş bir uygulama alanına sahiptir. Sağlık, bankacılık ve eğitim gibi alanlarda etkinlik analizleri için güvenilir bir yöntem olarak öne çıkmaktadır. Gelecekte, modelin daha sofistike analizler için kullanılabilmesi adına yeni optimizasyon teknikleri ile entegrasyonu önerilmektedir.

3.1.2.3. Süper Etkinlik Modeli

Süper Etkinlik Modeli (Super Efficiency Model), Veri Zarflama Analizi (VZA) kapsamında geliştirilmiş ileri bir tekniktir. Standart VZA modellerinde etkinlik skoru 1 olarak belirlenen karar verme birimlerinin (KVB) kendi aralarındaki farklılıkların ortaya konamaması bir sorun olarak kabul edilmektedir. Bu sorunun üstesinden gelmek için Andersen ve Petersen (1993) tarafından geliştirilen Süper Etkinlik Modeli, etkin birimler arasında ayırım yaparak ötesinde bir etkinlik derecelendirmesi yapma olanağı sunmaktadır (Andersen ve Petersen, 1993, s. 1261).

Süper Etkinlik Modelinin Tarihsel Gelişimi ve Kavramsal Çerçeve

Süper Etkinlik Modeli, klasik VZA'nın sınırlamalarını aşmak amacıyla geliştirilmiştir. Charnes ve arkadaşları (1978) tarafından geliştirilen temel VZA modeli, karar verme birimlerinin göreceli etkinliklerini ölçerken, etkin olan birimlerin kendi içindeki sıralamasını yapamamaktadır (Charnes vd., 1978, s. 430). Bu eksikliği gidermek için Andersen ve Petersen (1993) tarafından Süper Etkinlik Modeli önerilmiştir. Bu modelde, etkin birimler sistem dışına alınarak etkinlik skoru 1'in üzerinde hesaplanmaktadır. Böylece, sadece etkin birimler arasındaki farklılıklar değil, etkin olmayan birimlere kıyasla ne derece üstün oldukları da ortaya konulmaktadır (Andersen ve Petersen, 1993, s. 1263).

Matematiksel Formülasyon

Süper Etkinlik Modeli, geleneksel CCR (Charnes vd., 1978) modelinin bir genişletilmiş halidir.

Süper Etkinlik Model'inde etkin olarak belirlenen birim referans kümesinden çıkarılarak aşağıdaki gibi yeniden modellenir:

$$\max \theta_k = \sum_{r=1}^s u_r y_{rk}$$

$$\sum_{i=1}^m u_i x_{ik} = 1$$

$$\sum_{r=1}^s u_r y_{rj} - \sum_{i=1}^m v_i x_{ij} \leq 0, \quad \forall j \neq k$$

$$v_i, u_r \geq 0, \quad \forall i, r$$

Bu şekilde etkinlik skoru 1'in üzerinde hesaplanarak etkin birimler arasındaki farklılıklar belirlenebilir (Andersen ve Petersen, 1993, s. 1265).

Literatürdeki Uygulamalar

Süper Etkinlik Modeli, çeşitli alanlarda etkinlik ölçümleri için kullanılmıştır. Aşağıda bu modelin kullanıldığı bazı önemli uygulama alanları sıralanmıştır:

Bankacılık ve Finans: Banka şubelerinin operasyonel etkinliklerinin karşılaştırılması (Berger ve Humphrey, 1997, s. 178).

Sağlık Hizmetleri: Hastanelerin performans analizleri ve sağlık hizmetlerinde etkinlik ölçümü (Hollingsworth, 2003, s. 205).

Eğitim Sektörü: Üniversitelerin ve araştırma kurumlarının akademik performanslarının değerlendirilmesi (Johnes, 2006, s. 275).

Enerji ve Çevre: Enerji üretim tesislerinde enerji verimliliğinin değerlendirilmesi ve bu değerlendirmenin sürdürülebilir kalkınma hedefleriyle ilişkilendirilmesi, özellikle Türkiye örneğinde önemli stratejik boyutlar taşımaktadır (Aydın, 2016, s. 415).

Lojistik ve Ulaştırma: Lojistik şirketlerinin ve havaalanlarının verimlilik analizlerinde kullanımı (Kutlar ve Kartal, 2004, s. 52).

Avantajlar ve Sınırlılıklar

Süper Etkinlik Modeli, aşağıdaki avantajlara sahiptir:

Daha Hassas Sıralama: Etkin birimler arasındaki farkları belirleyerek detaylı bir analiz sunar.

Uygulama Esnekliği: Çeşitli sektörlerde kullanılabilir ve parametrik olmayan bir yöntemdir.

Stratejik Karar Alma: Karar vericilere optimal kaynak tahsisi için daha fazla bilgi sağlar (Johnes, 2006, s. 277).

Ancak modelin bazı sınırlılıkları da bulunmaktadır:

Matematiksel Karmaşıklık: Modelin çözüm süreci standart VZA'ya kıyasla daha fazla hesaplama gerektirir (Hollingsworth, 2003, s. 207).

Duyarlılık Problemleri: Referans kümesinden çıkarılan etkin birimler nedeniyle sonuçlarda farklılıklar olabilir.

Sonuç ve Değerlendirme

Süper Etkinlik Modeli, VZA'nın etkinlik analizine getirdiği derinlemesine bakış açısıyla, KVB'lerin performans değerlendirmelerinde önemli bir araçtır. Özellikle etkin birimlerin kendi aralarındaki sıralamasını yapma imkânı sunarak, yöneticilere ve araştırmacılara daha detaylı bilgiler sağlar. Ancak, modelin uygulanmasında dikkatli olunmalı ve sonuçlar titizlikle yorumlanmalıdır.

3.1.2.4. Pencereli Veri Zarflama Analizi (PVZA)

Pencereli VZA kavramı, geleneksel VZA'nın zaman serisi analizine entegrasyonu ihtiyacından doğmuştur. İlk olarak Banker ve arkadaşları (1984) tarafından ölçek etkilerini analiz etmek için geliştirilmiş olan BCC modeli, zaman içerisinde genişletilerek dinamik analizler için Pencereli VZA'ya temel oluşturmuştur. Daha sonra, Tone ve Tsutsui (2010) tarafından geliştirilen dinamik VZA modelleri, özellikle sektör bazlı performans ölçümlerinde yaygınlaşmıştır.

Pencereli VZA, özellikle sağlık, eğitim, finans ve enerji gibi sektörlerde karar alma süreçlerinde önemli bir rol oynamaktadır (Färe vd., 1994, s. 67). Veri Zarflama Analizi (VZA), karar verme birimlerinin (KVB) etkinliğini ölçmek için geliştirilmiş parametrik olmayan bir yöntemdir. Geleneksel VZA, zaman serisi

verileri dikkate almadan etkinlik hesaplaması yaparken, Pencereli VZA bu eksikliği gidermek amacıyla tasarlanmıştır (Charnes vd., 1978, s. 430).

Pencereli VZA, belirlenen zaman pencereleri boyunca tekrar eden VZA uygulamalarıyla etkinlik değişimlerini izler (Emrouznejad ve Yang, 2018, s. 319).

Matematiksel Modelleme

Her bir t zaman dilimi için model şu şekilde ifade edilir:

$$\text{Minimize } \theta_t$$

$$\text{Kısıtlar: } \sum_{j=1}^n \lambda_{jt} x_{ijt} \leq \theta_t x_{iot}, \quad i = 1, 2, \dots, m$$

$$\sum_{j=1}^n \lambda_{jt} y_{rjt} \geq y_{rot}, \quad r = 1, 2, \dots, s$$

$$\lambda_{jt} \geq 0, \quad j = 1, 2, \dots, n, \quad \forall t$$

(Tone ve Tsutsui, 2010, s. 245).

Pencereli VZA'nın Uygulama Alanları

Bankacılık: Bankaların zaman içindeki etkinlik değişimleri (Casu vd., 2004, s. 271).

Sağlık sektörü: Hastanelerin maliyet etkinliği değerlendirmesi (Sherman, 1984, s. 905).

Eğitim: Üniversitelerin akademik performans analizleri (Johnes, 2006, s. 527).

Pencereli VZA'nın Avantajları ve Dezavantajları

Avantajları

- **Zaman serisi analizi sunar:** Karar verme birimlerinin performansındaki dönemsel eğilimleri ortaya koyarak verimlilik değerlendirmelerinde ileriye dönük öngörüler sunar (Kolambe ve Arora, 2024, s. 576).
- **Dinamik performans ölçümü yapar:** KVB'lerin zaman içindeki etkinliğini izleyebiliriz (Färe vd., 1994, s. 67).

Dezavantajları

- **Pencere genişliğinin etkileri:** Farklı pencere büyüklükleri çeşitli sonuçlara yol açabilir (Johnes, 2006, s. 527).
- **Veri ihtiyacı fazladır:** Zaman serisi verisi gerektirdiği için uygulanması zordur (Casu vd., 2004, s. 2521).

Sonuç ve Değerlendirme

Pencereli VZA, geleneksel VZA'nın eksikliklerini gidermeye yönelik geliştirilmiş, zaman serisi bazlı etkinlik değerlendirmesi sunan güçlü bir analiz yöntemidir. Ancak, pencere genişliği ve veri ihtiyacı gibi konular dikkat edilmesi gereken unsurlardır. Grafik analizleri, karar vericilere performans değişimlerini görselleştirme ve stratejik kararlar alma konusunda rehberlik edebilir (Färe vd., 1994, s. 67). Pencereli VZA, geleneksel VZA'nın eksikliklerini gidermeye yönelik geliştirilmiş, zaman serisi bazlı etkinlik değerlendirmesi sunan güçlü bir analiz yöntemidir. Ancak, pencere genişliği ve veri ihtiyacı gibi konular dikkat edilmesi gereken unsurlardır (Färe vd., 1994, s. 67).

Ağ Veri Zarflama Analizi (Network Data Envelopment Analysis-NDEA)

Geleneksel DEA modelleri, karar verme birimlerini (KVB) "kara kutu" olarak ele alarak, sistemin iç süreçlerini dikkate almadan toplam girdiler ve çıktılar arasındaki ilişkiyi analiz eder. Ancak, birçok gerçek dünya uygulaması, birbirine bağlı birden fazla alt süreçten oluşmakta ve geleneksel VZA'nın bu sistemlerin değerlendirilmesinde yetersiz kaldığı görülmektedir. Bu ihtiyacı karşılamak için

geliştirilen Ağ Veri Zarflama Analizi (Network DEA- NDEA), sistemin iç yapısını ve süreçler arası ilişkileri modele dahil ederek daha gerçekçi bir performans analizi yapmayı mümkün kılmaktadır (Färe ve Grosskopf, 2000, s. 35).

Kavramsal Çerçeve ve Literatür

Ağ Veri Zarflama Analizi, geleneksel VZA'nın iki ana eksikliğini gidermeyi amaçlamaktadır:

İç Süreçlerin Modellemesi: Geleneksel VZA, KVB'yi tek bir düzeyde ele alırken, NDEA sistemde yer alan alt süreçleri dikkate alarak daha detaylı bir analiz sunar.

Ara Girdi ve Ara Çıktılar: NDEA, bir alt sürecin çıktısının diğer bir sürecin girdisi olarak kullanılabilmesi için çok aşamalı yapılara uygundur (Tone ve Tsutsui, 2009, s. 243).

NDEA'nın teorik temelinde, serbest dışarlanma (freedisposal) ve teknik etkinlik (technical efficiency) gibi VZA'nın temel varsayımları yer almaktadır. Ancak, farklı aşamalara sahip süreçlerde etkinlik ölçerken, hiyerarşik bir yapı oluşturularak analiz yapılması gerekmektedir (Kao ve Hwang, 2010, s. 437).

Matematiksel Modelleme

Verilenler:

x_i : KVB'nin kullandığı girdiler

z_k : Bir sürecin ara girdisi veya ara çıktısı

y_j : Nihai çıktılar

λ : Karar değişkenleri

Matematiksel Model

$$\max \theta$$

$$S. t.$$

$$\sum_k \lambda_k x_{ik} \leq x_i, \forall_i$$

$$\sum_k \lambda_k z_{ik} \geq z_k, \forall_k$$

$$\sum_k \lambda_k y_{jk} \geq \theta_{yi}, \forall_j$$

Bu model, her bir alt sürecin etkinliğini bireysel olarak hesaplamakta ve sistemin genel etkinliğiyle ilişkisini ortaya koymaktadır (Chen vd., 2012, s. 612).

Uygulama Alanları

NDEA, eğitim, sağlık, finans, tedarik zinciri ve enerji sektörleri gibi birçok alanda yaygın olarak kullanılmaktadır:

Sağlık Sektörü: Hastanelerin farklı departmanları arasındaki bağılılığı analiz ederek etkinlik ölçümü (Khushalani ve Ozcan, 2017, s. 16).

Eğitim Sektörü: Üniversitelerin araştırma ve eğitim performansının ayrı ayrı incelenmesi (Kao, 2014, s. 3).

Tedarik Zinciri Yönetimi: Çok aşamalı üretim ve lojistik süreçlerinde verimlilik analizleri (Chen vd., 2009, s. 688).

Bankacılık ve Finans: Şube bazında kredi tahsis süreçlerinin analiz edilmesi ve risk yönetimi uygulamaları (Fukuyama ve Weber, 2017, s. 650).

Avantajlar ve Sınırlamalar

Avantajlar

- Çok aşamalı süreçleri analiz eder: Geleneksel DEA'nın tek aşamalı yapısının aksine, NDEA, iç süreçleri modele entegre ederek detaylı bir analiz sunar (Tone ve Tsutsui, 2009, s. 243).
- Daha gerçekçi modelleme yapısı: Gerçek dünya süreçlerini daha doğru bir şekilde temsil eder (Tone ve Tsutsui, 2009, s. 243).

Sınırlamalar

- **Matematiksel karmaşıklık:** Daha fazla karar değişkeni ve kısıt içerdiği için hesaplama yükü daha fazladır (Cook ve Zhu, 2014, s. 3).
- **Veri gereksinimi:** Modelleme sürecinde doğru veri toplamak zor olabilir.

- **Belirsizlik Faktörü:** Stokastik süreçler içeren sistemlerde belirsizliklerin modellenmesi daha karmaşıktır.

Sonuç ve Değerlendirme

Ağ DEA (Network DEA) modelleri, çok aşamalı süreçlerde performansın bütünsel şekilde değerlendirilmesine imkân sunar ve gelecekte stokastik, dinamik yapılarla geliştirilmesi öngörülmektedir (Emrouznejad ve Yang, 2018, s. 7). Ayrıca, makine öğrenmesi ve yapay zekâ ile entegrasyonu sayesinde süreçlerin daha detaylı modellenmesi mümkün hale gelecektir.

3.1.2.6. Stokastik Veri Zarflama Analizi

Geleneksel VZA modelleri, belirli girdilerle belirli çıktılar arasında deterministik bir ilişki varsayar. Ancak, gerçek dünyada girdi ve çıktılar genellikle rastgele değişkenlik gösterir. Bu nedenle, VZA modellerine stokastik yapıyı entegre eden Stokastik Veri Zarflama Analizi (Stochastic DEA- SDEA) geliştirilmiştir (Cooper vd., 2007, s. 283).

Stokastik VZA'nın Temelleri

Stokastik VZA, klasik VZA modelinin aksine, ölçüm hataları, çevresel faktörler ve rassal değişkenliklerin etkisini dikkate alır. Geleneksel VZA, karar verme birimlerinin (DMU) etkinliklerini belirlerken tüm girdilerin ve çıktılarının kesin olarak bilindiğini varsayar. Ancak, gerçek dünyada ölçüm hataları ve dışsal şoklar nedeniyle bu varsayım genellikle geçerli değildir. Bu noktada stokastik model devreye girerek, karar verme birimlerinin etkinlik değerlerini daha gerçekçi bir çerçevede belirlemeye yardımcı olur (Simar ve Wilson, 2000, s. 36).

Stokastik VZA'nın ortaya çıkışı, özellikle ekonometrik analizlerde karşılaşılan rastgele hata terimlerinin etkinlik ölçümlerine olan etkisini azaltma ihtiyacından doğmuştur. Geleneksel VZA'nın deterministik doğası, modelin çevresel belirsizliklere duyarlılığını artırırken, stokastik yaklaşım ölçüm hataları ve dışsal değişkenleri modele entegre ederek daha güvenilir sonuçlar elde etmeyi amaçlar. Bu model, genellikle stokastik sınır analizine (Stochastic Frontier

Analysis- SFA) benzer bir yaklaşımla, rastgele hata terimlerini içeren doğrusal programlama teknikleri kullanılarak oluşturulur.

- Stokastik VZA'nın temel varsayımları şunlardır:
- Girdi ve çıktı değişkenleri rassal bileşenler içerebilir.
- Hata terimi hem ölçüm hatalarını hem de çevresel faktörleri kapsar.
- Üretim fonksiyonu belirli bir olasılık dağılımına tabi olabilir.
- Verimlilik skoru, deterministik bir sınırdan ziyade olasılıklı bir dağılım içinde değerlendirilir (Kumbhakar ve Lovell, 2003, s. 54).

Bu varsayımlar sayesinde, stokastik VZA modelleri, geleneksel VZA yöntemlerine kıyasla daha esnek ve güvenilir sonuçlar üretebilmektedir. Stokastik VZA, klasik VZA modelinin aksine, ölçüm hataları, çevresel faktörler ve rassal değişkenliklerin etkisini dikkate alır. Geleneksel VZA'nın yetersiz kaldığı bu durumlarda, stokastik model karar verme birimlerinin (DMU) etkinlik değerlerini daha gerçekçi bir çerçevede belirler (Simar ve Wilson, 2000, s. 36). Bu model, genellikle stokastik sınır analizine (Stochastic Frontier Analysis- SFA) benzer bir yaklaşımla, rastgele hata terimlerini içeren doğrusal programlama teknikleri kullanılarak oluşturulur.

Stokastik VZA'nın Matematiksel Formülasyonu

Stokastik VZA modeli, geleneksel VZA modellerinden farklı olarak rassal hatalar içeren bir doğrusal programlama problemi ile ifade edilir. Tipik olarak bir üretim fonksiyonu şu şekilde tanımlanır:

$$Y = f(X) + \varepsilon$$

Burada:

- Y çıktı vektörünü
- X girdi vektörünü
- ε ise rassal terimini temsil etmektedir (Olesen ve Petersen, 2016, s. 3)

Stokastik VZA modelinde, etkinlik skoru şu şekilde tanımlanır:

$$E = \frac{\sum_{r=1}^s u_r Y_r}{\sum_{i=1}^m v_i X_i} + \epsilon_i$$

Bu ifade, geleneksel VZA modelindeki deterministik kısıtı genişleterek rassal hata terimlerini model içerisine entegre eder (Kumbhakar ve Lovell, 2003, s. 54).

Stokastik VZA'nın Uygulama Alanları

Stokastik VZA, özellikle sağlık sektörü, finansal analiz, lojistik yönetimi ve eğitim performans ölçümü gibi belirsizliğin yüksek olduğu alanlarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Örneğin, bir hastanenin etkinliğini değerlendirirken hasta sayısı, yatak doluluk oranı gibi değişkenlerin rassal değişkenler olarak ele alınması gerekir. Stokastik VZA, bu tür belirsizlikleri göz önünde bulundurarak daha doğru bir analiz yapma olanağı sağlar (Hollingsworth, 2008, s. 1110).

Buna ek olarak, stokastik VZA'nın tarım sektöründe de önemli bir yeri vardır. Çiftçilerin üretim verimliliğini değerlendirirken, hava koşulları, toprak kalitesi ve iklim değişiklikleri gibi rastgele faktörlerin dikkate alınması gerekmektedir. Stokastik VZA, bu değişkenlerin etkilerini hesaba katarak tarımsal üretim etkinliğini daha iyi modelleyebilir.

Enerji sektöründe ise, elektrik üretim tesislerinin performansı değerlendirilirken yakıt fiyat dalgalanmaları ve talep belirsizlikleri gibi faktörler devreye girmektedir. Stokastik VZA, bu tür değişken faktörleri göz önüne alarak enerji üretim tesislerinin etkinliğini optimize etmek için kullanılmaktadır.

Banka ve sigortacılık sektörlerinde de stokastik VZA uygulamaları mevcuttur. Bankalar, kredi risklerini yönetirken ve şube verimliliğini değerlendirirken, finansal piyasalardaki dalgalanmaların etkisini göz önünde bulundurmalıdır. Sigorta şirketleri ise hasar oranları, müşteri talepleri ve piyasa belirsizlikleri gibi faktörleri değerlendirerek daha sağlam risk yönetim stratejileri oluşturabilirler.

Son olarak, kamu yönetimi ve belediyeçilik alanında da stokastik VZA kullanımı yaygındır. Kamu hizmetlerinin verimli şekilde sunulabilmesi için bütçe tahminleri, nüfus değişimleri ve ekonomik faktörler gibi rastgele değişkenlerin analiz edilmesi gerekmektedir. Stokastik VZA, belediyelerin ve devlet kurumlarının performanslarını daha doğru değerlendirmelerine yardımcı olmaktadır. Stokastik VZA, özellikle sağlık sektörü, finansal analiz, lojistik

yönetimi ve eğitim performans ölçümü gibi belirsizliğin yüksek olduğu alanlarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Örneğin, bir hastanenin etkinliğini değerlendirirken hasta sayısı, yatak doluluk oranı gibi değişkenlerin rassal değişkenler olarak ele alınması gerekir. Stokastik VZA, bu tür belirsizlikleri göz önünde bulundurarak daha doğru bir analiz yapma olanağı sağlar (Hollingsworth, 2008, s. 1110).

Stokastik VZA'nın Avantajları ve Dezavantajları

Avantajları

- Rassal Faktörleri İçerebilmesi: Klasik VZA'nın deterministik yapısının aksine, ölçüm hataları ve çevresel değişkenler model içinde dikkate alınabilir (Banker ve Natarajan, 2008, s. 50).
- Gerçekçi Etkinlik Ölçümü: Klasik VZA modeline göre daha gerçekçi etkinlik tahminleri sunar (Banker ve Natarajan, 2008, s. 51).
- Veri Gürültüsüne Karşı Duyarlılığı Azaltma: Verideki rastgele değişimlerin modelleme sürecinde daha iyi ele alınmasına olanak tanır (Banker ve Natarajan, 2008, s. 52).

Dezavantajları

- Matematiksel karmaşıklık içerir. Klasik DEA modellerine göre daha gelişmiş yapıya sahip olsa da SDEA'nın çözüm süreci doğrusal olmayan ve istatistiksel olarak daha karmaşık formülasyonlar içerir.
- İstatistiksel yöntem gerektirir. Modelin uygulanabilmesi için istatistiksel varsayımlar (örneğin hata terimlerinin dağılımı) gereklidir ve bu, ileri düzey analiz bilgisi gerektirir.
- Hesaplama yükü fazladır. Özellikle büyük veri setlerinde, rassal bileşenlerin hesaba katılması hesaplama süresini ve model çözüm maliyetini artırır.
- Model sonuçları varsayımlara duyarlıdır. Elde edilen etkinlik skorları, hata terimlerinin dağılımına oldukça duyarlıdır. Varsayımlardaki sapmalar sonuçların güvenilirliğini etkileyebilir.

- Yorumlama karmaşıklığı oluşturur. Sonuçların istatistiksel anlamda değerlendirilmesi, klasik DEA'ya göre daha fazla uzmanlık ve dikkat gerektirir (Simar & Wilson, 2007, s. 35).

Sonuç ve Değerlendirme

Stokastik Veri Zarflama Analizi, geleneksel VZA'nın deterministik doğasını genişleterek rastgele hataları ve belirsizlikleri modele dahil eden bir yaklaşımdır. Bu yöntem, özellikle belirsizliğin yüksek olduğu karar verme problemlerinde daha güvenilir ve esnek etkinlik ölçümleri sunmaktadır. Ancak, modelin uygulanabilirliği karmaşık istatistiksel yöntemler gerektirdiğinden, ileri düzey matematiksel ve istatistiksel bilgiye ihtiyaç duyulmaktadır.

3.1.2.7. Dinamik Veri Zarflama Analizi (Dynamic DEA) Modeli

Dinamik DEA modeli, geleneksel VZA'nın statik doğasını aşarak karar birimlerinin zaman serisi içinde nasıl geliştiğini analiz etmeye olanak tanır. Bu modelde, özellikle bağlı değişkenler (linking variables) olarak adlandırılan ve bir dönemden diğerine taşınan değişkenler kullanılır. Bu tür değişkenler, sermaye stokları, yatırım seviyeleri ve öğrenme etkileri gibi süreçleri içerebilir. Dinamik DEA, böylece bir karar biriminin geçmiş dönem kararlarının ve çıktılarının mevcut performansına etkisini değerlendirerek, karar alma süreçlerine yönelik daha kapsamlı içgörüler sunar (Tone ve Tsutsui, 2014, s. 126).

Dinamik DEA Modelinin Matematiksel Temelleri

Dinamik DEA, klasik CCR ve BCC modellerine dayalı olabilir, ancak zaman bağımlılığını içeren ek kısıtlar ve değişkenlerle genişletilir. Genel olarak model, aşağıdaki doğrusal programlama yapısı ile formüle edilir:

$$\max \theta_t = \sum_{j=1}^n u_j y_{jt} - \sum_{i=1}^m v_i x_{it}$$

$$\text{tüm dönemler için: } \sum_{j=1}^n u_j y_{jt} - \sum_{i=1}^m v_i x_{it} + \sum_{l=1}^p w_l z_{lt} \leq 0$$

Burada:

x_{it} giriş değişkenlerini,

y_{jt} çıktı değişkenlerini,

z_{it} ise bağılı değişkenleri temsil etmektedir.

Dinamik DEA modeli, karar birimlerinin belirli bir dönem için etkinliğini ölçerken, önceki ve sonraki dönemlere olan etkilerini göz önünde bulundurur. Böylece karar alma süreçlerinde belirsizlikleri azaltarak daha güvenilir tahminler yapılmasını sağlar (Tone ve Tsutsui, 2014, s. 126).

Dinamik DEA'nın Kullanım Alanları

Finansal Performans Analizi: Dinamik DEA modeli, bankalar ve sigorta şirketleri gibi finansal kuruluşların zaman içindeki verimlilik değişimlerini değerlendirmek amacıyla yaygın olarak kullanılmaktadır (Fukuyama ve Weber, 2017, s. 650).

Sağlık Sektörü: Hastanelerin zaman bazlı hasta bakım etkinliğini değerlendirmek için dinamik DEA modelleri sağlık sektöründe etkin biçimde uygulanmaktadır (Kao, 2014, s. 3).

Eğitim Sektörü: Üniversitelerin akademik çıktıları ile bütçe yönetim etkinlikleri dinamik DEA yöntemiyle değerlendirilmektedir (Sueyoshi ve Goto, 2019, s. 438).

Enerji ve Çevre: Dinamik DEA modelleri, sürdürülebilir enerji üretimi ve çevresel verimlilik analizlerinde kullanılmaktadır (Zhou vd., 2008, s. 1).

Dinamik DEA'nın Avantajları ve Dezavantajları

Avantajları

Zaman Bağımlılığı: Karar birimlerinin etkinlik analizinde zaman içindeki değişimler dikkate alınır.

Bağılı Değişkenler: Fiziksel sermaye, eğitim gibi dönemler arası geçişkenliği yüksek olan değişkenler modele entegre edilebilir.

Doğrusal Programlama Esnekliği: Modelin doğrusal yapısı, büyük veri setleri üzerinde optimize edilmesini kolaylaştırır (Emrouznejad ve Yang, 2018, s. 1435).

Dezavantajları

Model Karmaşıklığı: Dinamik DEA modelleri, geleneksel DEA modellerine kıyasla daha karmaşık bir yapıya sahiptir. Bu durum, modelin

oluşturulması ve çözülmesi için daha fazla hesaplama gücü ve veri gereksinimi doğurur (Emrouznejad ve Yang, 2018, s. 5).

Veri Gereksinimi: Zaman serisi boyunca tutarlı ve güvenilir veri sağlanması, dinamik DEA modellerinin başarısı için kritiktir. Özellikle bağlı değişkenlerin doğru şekilde belirlenmesi ve ölçülmesi, modelin doğruluğunu doğrudan etkiler (Fukuyama ve Weber, 2017, s. 650).

Öznellik: Dinamik DEA modellerinde, hangi değişkenlerin bağlı değişken olarak seçileceği ve nasıl işleneceği konusunda belirli bir öznellik bulunmaktadır. Bu durum, farklı araştırmacılar tarafından farklı sonuçlar elde edilmesine neden olabilir (Sueyoshi ve Goto, 2019, s. 438).

Hesaplama Zorluğu: Büyük veri kümeleri ve uzun zaman serileriyle çalışırken, dinamik DEA modellerinin hesaplama yükü artar. Bu da analiz sürecini yavaşlatabilir ve daha karmaşık optimizasyon algoritmalarının kullanılmasını gerektirebilir (Tone ve Tsutsui, 2014, s. 126).

Sonuç ve Değerlendirme

Dinamik DEA modeli, karar birimlerinin zaman içerisindeki etkinlik değişimlerini analiz eden güçlü bir yöntemdir. Geleneksel VZA modellerine kıyasla daha kapsamlı içgörüler sunarak, özellikle uzun vadeli stratejik karar alma süreçlerinde kritik bir rol oynar. Modelin esnek yapısı, farklı sektörlerde geniş bir uygulama alanı bulmasını sağlamaktadır. Gelecekte, makine öğrenmesi ve yapay zekâ gibi yöntemlerle birleştirilerek Dinamik DEA'nın etkinliği daha da artırılabilir (Tone ve Tsutsui, 2014, s. 126).

3.1.3. Veri Zarflama Analizinin Uygulama Alanları

Bankacılık Sektörü: Bankaların finansal verimliliğini ölçmek, şube performanslarını karşılaştırmak ve kredi tahsis süreçlerini optimize etmek için kullanılır (Berger ve Humphrey, 1997, s. 175).

Sağlık Hizmetleri: Hastanelerin, sağlık merkezlerinin ve doktorların etkinliğini analiz etmek için DEA sağlık hizmetlerinde yaygın biçimde kullanılmaktadır (Hollingsworth, 2008, s. 1110).

Eğitim Kurumları: Üniversitelerin akademik başarılarını, öğretim üyelerinin performanslarını ve öğrenci kaynak kullanımını değerlendirmek için uygulanır (Johnes, 2006, s. 529).

Tarım ve Gıda Endüstrisi: Tarımsal üretim süreçlerinin ve gıda tedarik zincirinin verimliliğini ölçmek için kullanılır (Coelli, 1996, s. 130).

Enerji Sektörü: Elektrik üretim tesislerinin, yenilenebilir enerji kaynaklarının ve enerji verimliliği politikalarının değerlendirilmesinde kullanılır (Fare vd., 1994, s. 85).

Lojistik ve Ulaşım: Havaalanları, limanlar, taşımacılık firmaları ve lojistik operasyonlarının etkinlik analizlerinde yaygın olarak kullanılır (Sarkis, 2007, s. 112).

3.1.4. VZA'nın Avantajları ve Dezavantajları

Avantajlar:

- **Parametrik olmayan esneklik:** Herhangi bir fonksiyonel form varsayımı yapmaz.
- **Çoklu girdi ve çıktı kullanımına uygunluk:** Geleneksel yöntemlerden farklı olarak birçok girdiyi ve çıktıyı eş zamanlı analiz edebilir.
- **Karşılaştırmalı analiz imkânı:** Karar birimleri arasındaki göreceli etkinliği değerlendirir.
- **Ölçek etkinliği belirleme yeteneği:** Karar biriminin etkinlik düzeyini belirler ve ölçek ekonomilerinin etkisini ölçer.

Dezavantajlar:

- **Girdi ve çıktı seçiminde öznel kararlar gerektirir:** Modelin doğruluğu, kullanılan değişkenlerin uygun seçilmesine bağlıdır.
- **Hatalı veya eksik veri ile çalışmak zor olabilir:** Gürültülü veri sonuçları ciddi şekilde etkileyebilir.
- **Büyük veri kümeleri için hesaplama maliyeti yüksektir:** Özellikle çok fazla karar birimi ve değişken içeren uygulamalarda optimizasyon süreci zaman alabilir.

3.1.5. Sonuç ve Değerlendirme

Veri Zarflama Analizi (VZA), karar verme birimlerinin performansını ölçmek için güçlü bir yöntem olarak ortaya çıkmıştır. Bu yöntem, parametrik olmayan yapısı sayesinde farklı sektörlerde geniş bir kullanım alanına sahiptir. VZA'nın en büyük avantajlarından biri, herhangi bir üretim fonksiyonuna bağımlı olmadan verimlilik sınırlarını belirleyebilmesidir.

VZA'nın kullanımı özellikle bankacılık, sağlık, eğitim, enerji ve lojistik gibi alanlarda yaygınlaşmıştır. Bu sektörlerdeki karar verme birimlerinin etkinliklerinin ölçülmesi, kaynakların daha verimli kullanılması açısından büyük önem taşımaktadır. Sağlık sektöründe hastanelerin performansını değerlendirmek, eğitimde üniversitelerin kaynak kullanımını optimize etmek veya bankacılık sektöründe şube verimliliğini analiz etmek gibi pek çok uygulama alanı bulunmaktadır.

Ancak VZA'nın bazı sınırlamaları da mevcuttur. Modelin hassasiyeti, kullanılan veri setlerinin kalitesine bağlıdır. Eksik veya hatalı veriler, analiz sonuçlarını doğrudan etkileyebilir. Ayrıca büyük ölçekli veri setlerinde hesaplama süreci uzun sürebilir. Bu nedenle, gelecekteki çalışmaların, büyük veri analitiği ve makine öğrenmesi yöntemleriyle VZA'nın entegrasyonuna odaklanması gerekmektedir.

VZA'nın gelecekte daha geniş bir kullanım alanına sahip olması beklenmektedir. Özellikle stokastik ve dinamik modellerin geliştirilmesiyle, değişken piyasa koşullarına veya belirsizlik içeren çevresel faktörlere daha iyi uyum sağlayan modeller üretilecektir. Bunun yanı sıra, gerçek zamanlı VZA uygulamaları sayesinde sürekli güncellenen performans ölçümleri yapmak mümkün hale gelecektir.

Sonuç olarak, VZA, karar verme süreçlerinde etkin bir değerlendirme aracı olarak önemli bir yer tutmaktadır. Veri kalitesinin artırılması, model optimizasyonların yapılması ve yeni analitik yaklaşımlarla desteklenmesi, VZA'nın daha geniş ve etkin bir şekilde kullanımını sağlayacaktır.

3.2. Malmquist Index

Malmquist Verimlilik Endeksi, zaman içinde verimlilik değişimlerini ölçen önemli bir araçtır. İlk olarak Sten Malmquist tarafından tüketici davranışları analizinde kullanılmış, daha sonra Caves ve arkadaşları (1982, s. 1395) tarafından üretim verimliliği analizine uyarlanmıştır). Bu endeks, özellikle Veri Zarflama Analizi (Data Envelopment Analysis- DEA) ile kullanılarak, firmaların, sektörlerin veya ülkelerin verimlilik performanslarını değerlendirmek için yaygın bir şekilde tercih edilmektedir.

3.2.1. Malmquist Endeksinin Teorik Temelleri

Malmquist Endeksi, üretim teorisi ve verimlilik analizi temellerine dayanır. Endeks, iki dönem arasındaki verimlilik değişimini ölçmek için girdi ve çıktı verilerini kullanır. Temel olarak, üretim teknolojisindeki değişimleri ve firmanın bu teknolojiyi kullanma becerisindeki değişimleri ayırtırmayı amaçlar.

Malmquist Endeksi, aşağıdaki formülle ifade edilir:

$$MI = \left(\frac{D^t(x^{t+1}, y^{t+1})}{D^t(x^t, y^t)} \times \frac{D^{t+1}(x^{t+1}, y^{t+1})}{D^{t+1}(x^t, y^t)} \right)$$

Burada,

- D^t ve D^{t+1} , sırasıyla t ve $t+1$ dönemlerine ait verimlilik uzaklık fonksiyonlarını,

- x ve y , girdi ve çıktı vektörlerini temsil eder

Endeks, 1'den büyük olduğunda verimliliğin arttığını, 1'den küçük olduğunda azaldığını ve 1'e eşit olduğunda ise verimliliğin değişmediğini gösterir (Färe vd., 1994, s. 66).

3.2.2. Malmquist Endeksinin Bileşenleri

Malmquist Endeksi, iki ana bileşene ayrılabilir:

Teknik Etkinlik Değişimi (Efficiency Change-EC): Bu bileşen, bir firmanın mevcut teknolojiyi kullanma becerisindeki değişimi ölçer. EC, firmanın üretim sınırına ne kadar yaklaştığını veya uzaklaştığını gösterir. Matematiksel olarak şu şekilde ifade edilir:

$$EC = \frac{D^{t+1}(x^{t+1}, y^{t+1})}{D^t(x^t, y^t)}$$

Teknolojik Değişim (Technological Change-TC): Bu bileşen, üretim sınırındaki kaymayı ifade eder. Teknolojik ilerleme veya gerileme, bu bileşen aracılığıyla ölçülür. TC, aşağıdaki formülle hesaplanır:

$$TC = \left(\frac{D^t(x^{t+1}, y^{t+1})}{D^{t+1}(x^{t+1}, y^{t+1})} \times \frac{D^t(x^t, y^t)}{D^{t+1}(x^t, y^t)} \right)^{1/2}$$

Bu iki bileşen, Malmquist Endeksini aşağıdaki şekilde ifade etmek için kullanılır:

$$MI = EC \times TC$$

3.2.3. Malmquist Endeksinin Hesaplanması

Malmquist Verimlilik Endeksi'nin hesaplanması, genellikle doğrusal programlama teknikleri kullanılarak gerçekleştirilir. Bu süreçte, çok sayıda girdi ve çıktıyı aynı anda analiz edebilme yeteneği sayesinde Veri Zarflama Analizi (DEA) temel bir araç olarak kullanılmaktadır (Coelli vd., 2005, s. 178).

DEA tabanlı Malmquist Endeksi hesaplaması, aşağıdaki adımları içerir:

- Her bir dönem için ayrı ayrı DEA modelleri kurulur.
- Girdi ve çıktı verileri kullanılarak verimlilik skorları hesaplanır.
- Zaman içindeki verimlilik değişimleri, Malmquist Endeksi formülü kullanılarak ölçülür.
- Endeks, teknik etkinlik değişimi ve teknolojik değişim bileşenlerine ayrıştırılır.

3.2.4. Uygulama Alanları

Malmquist Endeksi, birçok sektörde verimlilik analizi için kullanılmaktadır. Aşağıda, bu endeksin uygulandığı bazı önemli alanlar ve örnek çalışmalar yer almaktadır:

Bankacılık Sektörü:

Avkiran (2000), Avustralya bankacılık sektöründe Malmquist Endeksini kullanarak verimlilik değişimlerini analiz etmiştir. Çalışma, bankaların

verimliliklerinin zaman içinde nasıl değiştiğini ve bu değişimlerin nedenlerini incelemiştir (Avkiran, 2000, s. 122).

Sağlık Sektörü:

Hollingsworth ve Parkin (2003), İngiltere'deki hastanelerin verimlilik performanslarını Malmquist Endeksi ile değerlendirmiştir. Çalışma, hastanelerin teknik etkinlik ve teknolojik değişim performanslarını ayırtmıştır (Hollingsworth ve Parkin, 2003, s. 1105).

Enerji Sektörü:

Zhang ve Choi (2013), Çin'in enerji sektöründe Malmquist Endeksini kullanarak çevresel verimlilik değişimlerini analiz etmiştir. Çalışma, enerji firmalarının çevresel performanslarını ölçmüş ve teknolojik ilerlemelerin etkisini incelemiştir (Zhang ve Choi, 2013, s. 549).

Eğitim Sektörü:

Johnes (2006), İngiltere'deki üniversitelerin verimlilik performanslarını Malmquist Endeksi ile değerlendirmiştir. Çalışma, üniversitelerin zaman içindeki verimlilik değişimlerini ve bu değişimlerin nedenlerini analiz etmiştir (Johnes, 2006, s. 1).

3.2.5. Malmquist Endeksinin Avantajları ve Sınırlılıkları

- Panel veri kullanarak zaman içindeki verimlilik değişimlerini ölçebilir.
- Teknik etkinlik değişimi ve teknolojik değişimi ayırtabilir.
- Çok sayıda girdi ve çıktıyı aynı anda analiz edebilir. Ancak, endeksin bazı sınırlılıkları da bulunmaktadır:
- Veri kalitesi ve eksiksizliği, endeksin doğruluğunu etkiler.
- Ölçek seçimi ve model spesifikasyonu, sonuçları etkileyebilir.
- DEA tabanlı hesaplamalar, istatistiksel çıkarımlara izin vermez (Coelli vd., 2005, s. 178).

3.2.6. Çimento Sektöründe Uygulanabilirlik

Malmquist Endeksi, fabrikanın 2018-2022 yılları arasındaki performans değişimlerini analiz etmede kullanılmıştır. Teknik etkinlik değişimi, fabrikanın

mevcut kaynakları kullanma becerisindeki gelişimi; teknolojik değişim ise enerji tasarrufu teknolojileri veya proses yenilikleri gibi faktörlerin etkisini yansıtmaktadır. Bu yöntem, zaman içindeki verimlilik trendlerini belirleyerek stratejik planlamaya katkı sağlar.

3.2.7. Sonuç ve Değerlendirme

Malmquist Endeksi, verimlilik analizinde etkili bir araç olarak kabul edilmektedir. Ancak, gelecekte yapılacak çalışmalarda, endeksin sınırlılıklarını aşmak için yeni metodolojik yaklaşımlar geliştirilmesi önemlidir. Özellikle, stokastik sınır analizi (Stochastic Frontier Analysis- SFA) gibi parametrik yöntemlerle entegre edilmesi, endeksin daha güvenilir sonuçlar üretmesine katkı sağlayabilir.

3.3. Slack-Based Measure (SBM) VZA Modeli

Geleneksel VZA modelleri, girdilerin ve çıktıların orantılı olarak değiştiğini varsayarken, Slack-Based Measure (SBM) modeli, karar birimlerindeki fazlalık ve eksiklikleri (slacks) doğrudan dikkate alarak daha hassas bir etkinlik ölçümü sunar (Tone, 2001, s. 498).

SBM modeli, özellikle girdi fazlalıkları ve çıktı eksikliklerinin etkinlik skoru üzerindeki doğrudan etkilerini dikkate alarak klasik VZA modellerinin eksikliklerini gidermeyi amaçlamaktadır. Bu modelin temel amacı, geleneksel radyal ve non-radyal modellerin ötesinde, etkinliği düşüren faktörleri ayrı ayrı analiz edebilmektir (Cooper vd., 2007, s. 125).

3.3.1. SBM Modelinin Tarihçesi ve Gelişimi

Veri Zarflama Analizi (DEA), ilk olarak Charnes ve arkadaşları (1978) tarafından geliştirilen CCR Modeli ile ortaya çıkmıştır (Charnes vd., 1978, s. 429). Daha sonra, Banker ve arkadaşları (1984) tarafından BCC Modeli önerilmiş ve değişken getiriler altında etkinlik ölçümüne imkân sağlanmıştır (Banker vd., 1984, s. 1078).

Ancak, bu modeller radyal varsayımıyla çalıştığından, girdi ve çıktıların orantısız olarak değiştiğini kabul eder. Orantısız değişimlerin modellenmesi

ihtiyacı, SBM modelinin geliştirilmesine yol açmıştır. Tone (2001), SBM modelini geliştirerek VZA'ya yeni bir boyut kazandırmıştır (Tone, 2001, s. 499).

SBM modelinin geliştirilmesinden sonra, şu varyasyonlar literatüre kazandırılmıştır:

- **Non-Oriented SBM Modeli** (Tone, 2001)
- **Network SBM Modeli** (Tone ve Tsutsui, 2009)
- **Malmquist SBM Modeli** (Tone, 2004)
- **Stochastic SBM Modeli** (Huang ve Li, 2017)

3.3.2. SBM Modelinin Temel Özellikleri

SBM modelinin diğer VZA modellerinden ayrılan iki temel özelliği bulunmaktadır:

Birimlerden Bağımsızlık (Units Invariant): Model, kullanılan veri birimlerinden bağımsızdır; yani, girdilerin ve çıktıların ölçü birimleri etkinlik skorunu etkilemez.

Monotonluk (Monotonicity): Girdi fazlalıkları veya çıktı eksiklikleri arttıkça etkinlik skoru azalır. Bu, modelin monoton azalan bir yapıya sahip olduğunu gösterir (Tone, 2001, s. 499).

Bu özellikler sayesinde SBM modeli, farklı ölçeklerdeki ve birimlerdeki VZA'ların etkinliklerini doğrudan karşılaştırmada güçlü bir araç olarak kullanılır (Zhu, 2014, s. 230).

3.3.3. SBM Modelinin Matematiksel Formülasyonu

Bir n adet karar verme birimi (KVB) bulunduğunu ve her KVBj'nin m adet girdi (x_{ij}) ve s adet çıktı (y_{rj}) kullandığını varsayalım. SBM modelinin doğrusal olmayan matematiksel formülasyonu şu şekilde tanımlanır:

$$p^* = \min \frac{1 - \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m s_i^- / x_{io}}{1 + \frac{1}{s} \sum_{r=1}^s s_r^+ / y_{ro}}$$

Kısıtlar:

$$x_{io} = \sum_{j=1}^n \lambda_j x_{ij} + s_i^-, \forall i$$

$$y_{ro} = \sum_{j=1}^n \lambda_j y_{rj} - s_r^+, \quad \forall_r$$

$$\sum_{j=1}^n \lambda_j = 1, \quad \lambda_j \geq 0, \quad s_i^- \geq 0, \quad s_r^+ \geq 0$$

Bu modelin amacı, girdi ve çıktı fazlalıklarını minimize ederek etkinlik seviyesini hesaplamaktır (Tone, 2001, s. 500).

3.3.4. SBM Modelinin Çözüm Yöntemleri

SBM modeli doğrusal olmayan bir optimizasyon problemi içerdiği için doğrudan çözümü karmaşık ve zaman alıcıdır. Bu nedenle, literatürde modelin çözümünü hızlandırmak için farklı yöntemler geliştirilmiştir.

3.3.4.1. Doğrusal Programlama Yaklaşımı (Linearization of SBM)

SBM modeli, başlangıçta doğrusal olmayan bir optimizasyon problemi olarak formüle edilmiştir. Ancak doğrusal olmayan modellerin çözümü hesaplama maliyetlerini artırdığından, SBM modelini doğrusal hale getirmek için fraksiyonel programlama teknikleri kullanılır.

Tone (2001), Charnes-Cooper dönüşümünü (Charnes ve Cooper, 1962, s. 181) kullanarak SBM modelini doğrusal bir programlama problemine dönüştürmüştür.

3.3.4.2. İç Nokta Yöntemleri (Interior Point Methods, IPM)

Doğrusal olmayan programlama problemlerinde IPM (Interior Point Methods), çözüm sürelerini kısaltmak için sıkça kullanılır. IPM yöntemi, iteratif bir teknik kullanarak çözüm kümesine içten yaklaşarak optimal çözümü belirler (Wright, 1997, s. 58).

SBM modelinin çözümünde IPM, özellikle büyük ölçekli veri kümeleri ile çalışırken avantaj sağlar.

3.3.4.3. Evrimsel Algoritmalar ve Yapay Zekâ Tabanlı Yöntemler

Geleneksel optimizasyon yöntemleri SBM modelinin çözümünü kolaylaştırır da çok büyük veri kümeleri için daha hızlı ve esnek algoritmalara

ihtiyaç duyulmaktadır. Bu nedenle yapay zekâ (AI) ve evrimsel algoritmalar SBM modelinin çözümünde sıklıkla kullanılmaktadır:

- Genetik Algoritmalar (GA), evrimsel stratejilerle SBM modelini optimize edebilir.
- Yapay Sinir Ağları (ANN), büyük veri setleriyle çalışırken hızlı ve tahmine dayalı çözümler üretmektedir.
- Karınca Kolonisi Optimizasyonu (ACO) gibi doğadan esinlenen yöntemler, yeşil tedarik zinciri gibi karmaşık ortamlarda SBM benzeri karar destek sistemlerinde başarıyla uygulanmıştır (Şenaras vd., 2025, s. 12).

3.3.4.4. SBM Modelinin Farklı Varyasyonları ve Modifikasyonları

SBM modelinin geliştirilmesinden sonra, farklı sistemler ve veri yapıları için modifiye edilmiş versiyonlar literatüre kazandırılmıştır.

Non-Oriented SBM Modeli

Klasik SBM modeli, girdi veya çıktı yönelimli olabilir. Ancak bazı durumlarda hem girdilerin azaltılması hem de çıktıların artırılması hedeflenir. Bu gibi durumlar için Non-Oriented SBM Modeli geliştirilmiştir (Tone, 2004, s. 92).

Bu model hem girdileri hem de çıktıları optimize etmeye çalışan bir çift yönlü etkinlik analizi yapmaktadır.

Network SBM Modeli

Birden fazla aşamalı süreçlerin etkinliğini ölçmek için Network SBM modeli geliştirilmiştir. Özellikle tedarik zinciri yönetimi, üretim sistemleri ve çok kademeli organizasyonlar için kullanılır (Tone ve Tsutsui, 2009, s. 78).

Örneğin, bir banka şubesinin iki ana aşamadan oluştuğunu düşünelim:

- Müşteri başvurularının alınması
- Kredi işlemlerinin gerçekleştirilmesi

Bu durumda Network SBM modeli, her iki aşamanın ayrı ayrı etkinliğini hesaplar.

Stochastic SBM Modeli

Verilerin belirsizlik içerdği durumlar için geliştirilmiş bir SBM modelidir. Geleneksel SBM modelleri, kesin değerler kullanarak karar verir. Ancak gerçek dünyada belirsizlikler ve rastgele değişimler mevcuttur. Stochastic SBM Modeli, olasılık dağılımlarını kullanarak karar verme sürecini optimize eder (Li vd., 2023, s. 5).

Dynamic SBM Modeli

Zaman serileri ile etkinlik ölçümü yapmak için geliştirilmiş bir SBM modelidir. Örneğin, bir üniversitenin 10 yıllık performans değişimini ölçmek için Dynamic SBM modeli kullanılır (Tone ve Tsutsui, 2010, s. 150).

3.3.5. SBM Modelinin Uygulama Alanları

Sağlık Sektörü

- **Hastane Performans Analizi:** SBM modeli, hastanelerin verimlilik analizlerinde kullanılmaktadır (Hollingsworth, 2008, s. 420). SBM modeli, hastanelerin verimlilik analizlerinde kullanılmaktadır. Hasta başına düşen doktor sayısı, yatak kapasitesi, hizmet kalitesi gibi değişkenler göz önünde bulundurularak etkinlik değerlendirmesi yapılır.
- **Sağlık Sigortaları:** SBM modeli, sağlık sigortası şirketlerinin hizmet sağlayıcılar arasındaki performansını ölçmek için kullanılmaktadır (Harrison ve Ansell, 2002, s. 105). SBM modeli, sağlık sigortası şirketlerinin hizmet sağlayıcılar arasındaki performansını ölçmek için kullanılmaktadır.
- **İlaç Endüstrisi:** SBM modeli, ilaç şirketlerinin Ar-Ge yatırımlarının ve üretim verimliliğinin değerlendirilmesine yardımcı olur (Ramanathan, 2005, s. 212). SBM modeli, ilaç şirketlerinin Ar-Ge yatırımlarının ve üretim verimliliğinin değerlendirilmesine yardımcı olur.

Eğitim Sektörü

- **Üniversite Performans Ölçümü:** SBM modeli, akademik kurumların kaynak kullanımını ve çıktılarını (mezun sayısı, akademik başarı) analiz eder (Johnes, 2006, s. 275). SBM modeli, akademik kurumların kaynak kullanımını ve çıktılarını (mezun sayısı, akademik başarı) analiz eder.
- **Okul Etkinlik Değerlendirmesi:** İlk ve orta dereceli okulların eğitim performansı SBM ile ölçülebilir.

Finans ve Bankacılık Sektörü

- **Banka Şubelerinin Etkinlik Analizi:** Şube bazlı performans değerlendirmelerinde SBM modeli kullanılır (Avkiran, 2004, s. 183). Şube bazlı performans değerlendirmelerinde SBM modeli kullanılır.
- **Sigorta Şirketlerinin Risk Yönetimi:** SBM modeli, sigorta şirketlerinin poliçe yönetim süreçlerini etkinlik açısından analiz etmek için kullanılır.

Çevre ve Enerji Yönetimi

- **CO₂ Salınımı ve Yeşil Ekonomi:** SBM modeli, karbon salınımını azaltma çabalarının etkinliğini analiz etmek için kullanılmaktadır (Zhou vd., 2008, s. 5). SBM modeli, karbon salınımını azaltma çabalarının etkinliğini analiz etmek için kullanılmaktadır.
- **Yenilenebilir Enerji Kaynaklarının Etkinlik Analizi:** Rüzgâr, güneş ve hidroelektrik santrallerinin verimliliği SBM modeli ile analiz edilmektedir.

Üretim ve Fabrika Yönetimi

- **Üretim Hatlarının Verimlilik Analizi:** SBM modeli, üretim hatlarında oluşan verimsizlikleri belirleyerek enerji, zaman ve kaynak kullanımını optimize etmeyi hedefler (Tone, 2001, s.505). SBM modeli, üretim süreçlerindeki verimsizlikleri tespit etmek için kullanılmaktadır. Özellikle enerji tüketimi, iş gücü kullanımı ve hammadde israfı gibi faktörler SBM ile analiz edilir.

- **Makine ve Ekipman Kullanım Etkinliği:** Fabrikalarda makinelerin kullanım verimliliği SBM modeli ile ölçülerek gereksiz enerji tüketimi ve âtıl kapasite önlenir.
- **Tedarik Zinciri Yönetimi:** SBM modeli, tedarik süreçlerindeki darboğazları ve verimsizlikleri analiz ederek üretim süreçlerinin daha verimli hale getirilmesine katkı sağlar.

3.3.6. SBM Modelinin Avantajları ve Dezavantajları

Avantajları

- **Orantısız Girdi ve Çıktı Değişimlerine Duyarlıdır:** Geleneksel CCR ve BCC modelleri, girdilerin ve çıktıların orantılı olarak değiştiğini varsayar. SBM modeli ise her bir fazlalık ve eksikliği ayrı ayrı analiz eder (Tone, 2001, s. 503).
- **Birimlerden Bağımsızdır:** SBM modeli, verilerin ölçü birimlerinden bağımsız olarak çalışır. Örneğin, bir sağlık sektöründe hasta sayısı, doktor sayısı ve yatak kapasitesi farklı birimlerle ölçülse bile, SBM modeli doğru analiz yapabilir (Zhu, 2014, s. 214).
- **Özelleştirilebilir:** SBM modeli, Network SBM, Stochastic SBM ve Dynamic SBM gibi modifikasyonlarla genişletilebilir.

Dezavantajları

- **Hesaplama Süresi Uzunudur:** SBM modeli doğrusal olmayan bir yapıdadır ve karmaşık hesaplamalar gerektirir. Büyük veri setlerinde çözüm süresi artar (Tone, 2001, s. 507).
- **Veri Gürültüsüne Duyarlıdır:** SBM modeli, girdi ve çıktı değerlerinde küçük değişikliklere duyarlıdır ve bu durum sonuçları önemli ölçüde etkileyebilir (Zhou vd., 2008, s. 9).

3.3.7. Çimento Sektöründe Uygulanabilirlik

Çimento üretiminde enerji israfı, bakım maliyetleri gibi girdi fazlalıkları ve CO_2 , NO_x gibi istenmeyen çıktılar önemli verimsizlik kaynaklarıdır. SBM, bu faktörleri ayrı ayrı analiz ederek fabrikanın hangi alanlarda iyileştirme yapması gerektiğini belirlemede kullanılır. Tezde, her yılın bir KVB olarak ele alınmasıyla,

SBM skorları fabrikanın teknik ve çevresel performansını ölçmede temel oluşturmıştır.

3.3.8. Sonuç ve Değerlendirme

Slack-Based Measure (SBM) modeli, karar verme birimlerinin etkinliklerini değerlendirirken, geleneksel Veri Zarflama Analizi (VZA) modellerine kıyasla daha detaylı ve hassas sonuçlar sunmaktadır (Tone, 2001, s. 498). SBM modeli, girdi fazlalıkları ve çıktı eksikliklerini doğrudan dikkate alarak, karar birimlerinin verimsizliklerinin daha iyi analiz edilmesine olanak tanımaktadır.

BM modelinin geniş uygulama alanları arasında sağlık, eğitim, finans, çevre yönetimi ve üretim sektörleri bulunmaktadır (Hollingsworth, 2008, s. 1115). Hastanelerden üniversitelere, bankalardan fabrikalara kadar birçok farklı organizasyonda SBM modeli kullanılarak etkinlik analizleri yapılmaktadır. Modelin sağladığı detaylı analizler, karar vericilerin kaynak tahsislerini daha verimli yönetmelerine ve süreçlerini iyileştirmelerine katkıda bulunmaktadır.

Gelecekte, SBM modelinin yapay zekâ ve makine öğrenmesi ile entegrasyonu, büyük veri setleriyle daha etkili analizler yapılmasını sağlayabilir (Emrouznejad ve Yang, 2018, s. 8). Ayrıca, sürdürülebilir kalkınma ve çevresel etkinlik ölçümleri gibi alanlarda SBM modelinin daha fazla kullanılması beklenmektedir. Sonuç olarak, SBM modeli, karar verme süreçlerinde daha iyi analizler yapmak isteyen araştırmacılar ve yöneticiler için güçlü bir araç olmaya devam etmektedir.

4. UYGULAMA

Bu bölümde, Türkiye'nin İç Anadolu Bölgesi'nde yer alan ve çimento üretiminde uzun yıllardır faaliyet gösteren büyük ölçekli bir fabrikanın 2018–2022 dönemine ait yıllık verileri kullanılarak gerçekleştirilen çok boyutlu verimlilik analizine yer verilmektedir. Analizlerde, teknik etkinlik ve toplam faktör verimliliği ölçülerek üretim süreci sürdürülebilirlik perspektifinden kapsamlı biçimde değerlendirilmiştir.

İlgili fabrika, üretim kapasitesi, enerji tüketimi ve emisyon düzeyleri açısından sektör genelini temsil edebilecek niteliktedir. Bu yönüyle yapılan analiz, yalnızca spesifik bir kuruluşa değil, sektöre yönelik çıkarımlar üretme potansiyeline de sahiptir. Analiz sürecinde, geleneksel Veri Zarflama Analizi (VZA) yaklaşımlarından farklı olarak Slacks-Based Measure (SBM) modeli tercih edilmiştir. SBM modeli, karar birimlerinin girdi fazlalarını ve çıktı yetersizliklerini eş zamanlı ve doğrusal olmayan biçimde ele alarak daha duyarlı ve ayrıntılı bir etkinlik değerlendirmesi sunmaktadır. Bu yönüyle, özellikle çevresel etkilerin dikkate alındığı sürdürülebilirlik temelli analizler için daha uygun bir yöntem olarak öne çıkmaktadır.

Çimento sektörünün yoğun enerji ve kaynak kullanımı ile çevresel etkileri göz önünde bulundurularak, bu süreçler çok boyutlu verimlilik analizi kapsamında incelenmiştir. Sürdürülebilirlik ilkeleri doğrultusunda teknik, çevresel ve zaman boyutlu verimlilik değişimleri analiz edilmiş; ileri düzey yöntemlerle desteklenmiştir. Çalışmanın metodolojik çerçevesi, SBM modeli ile teknik etkinlik ölçümünü, Malmquist Endeksi ile dönemsel verimlilik değişimini, Bootstrap yöntemiyle istatistiksel sağlamlık analizini, senaryo analizleriyle politika düzeyinde testleri ve eko-verimlilik hesaplamalarıyla çevresel performansın bütüncül değerlendirmesini içermektedir.

Uygulama kapsamında gerçekleştirilen analizler, hem saha düzeyinde karar vericilere stratejik planlama açısından yol gösterici veriler sunmakta, hem de literatüre metodolojik katkı sağlayacak bilimsel bir çerçevede yapılandırılmıştır. Tüm değerlendirmeler, karar birimi olarak ele alınan fabrikanın 2018–2022 yılları arasındaki yıllık performans verileri üzerinden yürütülmüştür.

4.1. Python Ortamında Uygulama Altyapısı

Çalışma kapsamında kullanılan veri zarflama, etkinlik ve verimlilik analizleri Python programlama dili ile gerçekleştirilmiştir. Uygulama sürecinde, verilerin işlenmesi, normalize edilmesi, analiz modellerinin oluşturulması ve grafik çıktılarının üretilmesi işlemleri Python ortamında yürütülmüştür. Bu sayede analizlerin hem tekrarlanabilirliği sağlanmış hem de hesaplamaların doğruluğu artırılmıştır.

Analizler Python 3.11.5 sürümü kullanılarak, Jupyter Notebook ortamında gerçekleştirilmiştir. Uygulamada kullanılan temel kütüphaneler şunlardır:

- pandas: Veri işleme ve yönetimi
- numpy: Sayısal hesaplamalar
- matplotlib, seaborn: Grafiksel görselleştirme
- pulp: SBM modeli için doğrusal programlama çözümleme altyapısı
- pyomo: Bazı senaryo tanımlamalarında doğrusal model kurulumu
- scikit-learn: Kümeleme ve PCA analizleri

Veri seti öncelikle pandas kütüphanesi ile işlenmiş, ardından normalize edilerek pulp kütüphanesi üzerinden manuel tanımlanan SBM modeli ile skor ve slack değerleri hesaplanmıştır.

Aynı şekilde Malmquist Endeksi, özelleştirilmiş fonksiyonlarla teknik etkinlik ve teknolojik gelişme bileşenleri ayrıştırılarak elde edilmiştir.

Bootstrap analizlerinde, simülasyon-tabanlı örnekleme yöntemi uygulanmıştır.

Elde edilen skorlar ve katsayılar, matplotlib ve seaborn kütüphaneleri ile görselleştirilmiş; sonuçlar tablo ve grafiklerle desteklenmiştir.

Bu uygulama altyapısı sayesinde yalnızca istatistiksel değil, aynı zamanda algoritmik olarak da yeniden üretilebilir sonuçlar elde edilmiş; analizlerin akademik geçerliliği ve uygulama güvenilirliği artırılmıştır.

4.2. Veri Seti ve Değişkenleri

Veri seti, 2018-2022 yılları arasında faaliyet gösteren bir çimento fabrikasının yıllık operasyonel ve çevresel performans kayıtlarından oluşturulmuştur. Değişkenlerin seçimi, çimento üretim süreçlerinde kaynak

kullanımını, üretim başarımını ve çevresel etkileri doğrudan temsil etmeleri esas alınarak yapılmıştır. Literatürde sıklıkla karşılaşılan değişkenler dikkate alınmış, ayrıca saha uzmanlarıyla yapılan görüşmeler sonucu sektörel geçerliliği yüksek göstergeler tercih edilmiştir.

4.2.1. Girdi Değişkenleri

Makine Sayısı (adet): Sermaye yoğunluğu göstergesi olarak üretim kapasitesini temsil etmektedir. Literatürde sermaye girdisi olarak sıklıkla kullanılmakta olup, üretim esnekliği ve otomasyon düzeyine ilişkin bilgi sağlar. Ayrıca bakım maliyetleri, enerji tüketimi gibi diğer operasyonel değişkenlerle ilişkili bir temel girdidir (Färe vd., 2010, s. 311).

Bakım Maliyeti (bin TL): Üretim süreçlerinde ekipmanların güvenli ve sürekli çalışabilirliğini sağlayan bu değişken, operasyonel verimliliğin sürdürülebilirliğiyle doğrudan ilişkilidir. Plansız duruşlar ve sistemsel arızalar hem çıktıyı azaltır hem de enerji verimliliğini düşürür (Wang ve Chin, 2011, s. 690).

Enerji Tüketimi (kWh): Çimento sektörü, en yüksek enerji yoğunluğuna sahip sektörlerden biridir. Bu nedenle enerji, yalnızca bir üretim girdisi değil; aynı zamanda karbon salımının da doğrudan kaynağıdır. Literatürde VZA çalışmalarında en yaygın kullanılan girdilerden biridir (Zhou vd., 2008, s. 5).

İşletme Süresi (saat): Tesisin yıllık toplam çalışma süresini ifade eder. Kapasite kullanım oranını destekleyen bu gösterge, üretim planlaması, duruş süresi ve proses yönetiminin etkinliği hakkında dolaylı bilgi verir (Sánchez ve Pérez, 2005, s. 688).

4.2.2. Çıktı ve İstenmeyen Çıktı Değişkenleri

Kapasite Kullanım Oranı (%): Teknik etkinlik açısından temel çıktıdır. Tesisin tam kapasiteye yakın çalışıp çalışmadığı hem enerji verimliliği hem de maliyet yönetimi açısından belirleyicidir (Boyd ve Pang, 2000, s. 293).

Müşteri Memnuniyeti (endeks): Kalite, teslim süresi, satış sonrası hizmet gibi konularda müşterilerin algısını temsil eder. Dolaylı fakat stratejik bir çıktıdır; özellikle iç pazar başarısı açısından önemlidir (Kicova vd., 2023, s. 575).

Ar-Ge Proje Sayısı (adet): İnovasyon kapasitesi, teknolojik adaptasyon yeteneği ve geleceğe hazırlık açısından kritik bir göstergedir. Teknolojik değişim (TC) bileşeninin doğrudan yansımasıdır (Chen vd., 2020, s. 460).

İstenmeyen Çıktılar:

CO_2 Emisyonu (ton): Çimento üretimi, dünya genelinde en yüksek karbon salımı yaratan sanayi faaliyetlerinden biridir. Bu nedenle CO_2 emisyonu, sektörel çevresel performansın değerlendirilmesinde en kritik göstergelerden biri olarak kabul edilmektedir (Worrell vd., 2001, s. 304).

NO_x (Kg): Çimento üretiminde, yüksek sıcaklıklarda gerçekleşen yakma işlemleri sırasında oluşan azot oksitleri (NO_x), çevresel etkileri nedeniyle önemli bir göstergedir. NO_x emisyonları hem yakıtın içeriğinden hem de yüksek sıcaklıklarda havadaki azotun oksidasyonundan kaynaklanır (Liu vd., 2021, s. 1637).

SO_x (Kg): Çimento üretiminde, özellikle yüksek sıcaklıklarda gerçekleşen yanma işlemleri sırasında oluşan kükürt oksitleri (SO_x), hava kalitesini doğrudan etkileyen ve çevresel lisans süreçlerinde izlenen önemli göstergelerdir. Bu emisyonların azaltılması, sürdürülebilirlik stratejilerinde öncelikli hedefler arasındadır (Liu vd., 2021, s. 1635).

4.2.3. Ham Veri Seti

Veri seti, 2018-2022 yılları arasında fabrikanın operasyonel ve çevresel performansını ölçen 10 ana metriği içermektedir. Bu veri seti, analizlerin şeffaflığını ve tekrarlanabilirliğini sağlamak amacıyla Tablo 2’de sunulmuştur

Tablo 2. 2018-2022 Ham Veri Seti

Yıl	GİRDİLER				ÇIKTILAR			İSTENMEYEN ÇIKTILAR		
	Makine Sayısı (Adet)	Bakım Maliyeti (bin TL)	Enerji (kWh)	Süre (saat)	Kapasite (%)	Müşteri Memnuniyeti (%)	Ar-Ge (adet)	CO ₂ (ton)	NO _x (kg)	SO _x (kg)
2018	20	420	5.200.000	3200	81	78	3	17.000	900	650
2019	22	440	5.000.000	3300	86	82	4	15.800	850	600
2020	23	450	5.100.000	3400	88	85	5	15.600	820	580
2021	24	470	5.400.000	3500	83	79	4	17.200	880	630
2022	25	500	5.700.000	3600	76	73	2	18.500	940	690

Kaynak: Yazar tarafından oluşturulmuştur.

Veri seti, fabrikanın performansındaki yıllık değişimleri açıkça ortaya koymaktadır. Örneğin, enerji tüketimi 2018’de 5,200,000 kWh iken 2022’de 5,700,000 kWh’ye yükselmiş, kapasite kullanımı ise 2020’de %88 ile en yüksek seviyesine ulaştıktan sonra 2022’de %76’ya düşmüştür. Bu değişimler, analizlerin temelini oluşturmuştur.

4.2.4. Kullanılan Yöntemlerin Teorik Altyapısı ve Formülasyonları

Bu bölümde kullanılan analiz yöntemleri, çimento sektöründeki verimliliğin çok boyutlu değerlendirilmesini sağlayan matematiksel modellere dayanmaktadır. Aşağıda her bir yöntemin teorik temeli, formülü ve çalışmada nasıl uygulandığı detaylı biçimde sunulmuştur.

4.2.4.1. Slacks-Based Measure (SBM) Veri Zarflama Modeli

SBM modeli, klasik VZA modellerinden farklı olarak her karar birimindeki girdi fazlalıklarını ve çıktı eksikliklerini (slack’leri) doğrudan dikkate alır. Bu

özellik, özellikle istenmeyen çıktılar içeren çevresel modellerde daha gerçekçi sonuçlar elde edilmesini sağlar (Tone, 2001, s. 499).

Matematiksel Formül:

$$\text{Minimize } p = (1 - \frac{1}{m \sum (s_r^- / x_i)}) / (1 + \frac{1}{s [\sum S_r^+ / y_r) + \sum (\frac{b_k^+}{b_k})]})$$

Kısıtlar:

- $x_0 = X\lambda + s^-$
- $y_0 = Y\lambda - s^+$
- $b_0 = B\lambda + b^+$
- $\lambda \geq 0, s^- \geq 0, s^+ \geq 0, b^+ \geq 0$

Burada;

- x : girdi vektörü,
- y : istenen çıktı vektörü,
- s^- : girdi fazlalıkları (input slacks),
- s^+ : çıktı eksiklikleri (output slacks),
- b^+ : istenmeyen çıktı artışlarıdır.

Bu çalışmada kullanılan SBM modeli doğrultusunda, karar birimlerine ait orijinal (ham) veriler normalize edilerek modele dahil edilmiştir. Normalize işlemi, tüm değişkenlerin farklı ölçeklerde olması nedeniyle çözüm kararlılığını artırmak ve değişkenler arası karşılaştırmayı mümkün kılmak amacıyla uygulanmıştır. Normalize işlemi, farklı birim ve büyüklüklerdeki verilerle çalışan SBM modelinin çözüm kararlılığını artırmak amacıyla sıklıkla kullanılmaktadır. Literatürde, Veri Zarflama Analizi (VZA) uygulamalarında normalizasyonun, modelin ağırlık yapısının bozulmasını önlediği ve değişkenler arası orantısal kıyaslamayı mümkün kıldığı belirtilmiştir (Cooper vd., 2011, s. 34; Tone, 2001, s. 499). Bu bağlamda, bu çalışmada da Min-Max normalizasyon yöntemi tercih edilmiştir. Normalize edilen veri seti aşağıda Tablo 4’te sunulmaktadır:

Tablo 3. Normalize Edilmiş Veri Seti (2018-2022)

Yıl	Makine	Bakım Maliyeti	Enerji	Süre	Kapasite	Müşteri	Ar-Ge	CO ₂	NO _x	SO _x
2018	0.00	0.000	0.286	0.00	0.417	0.417	0.333	0.483	0.667	0.636
2019	0.40	0.250	0.000	0.25	0.833	0.750	0.667	0.069	0.250	0.182
2020	0.60	0.375	0.143	0.50	1.000	1.000	1.000	0.000	0.000	0.000
2021	0.80	0.625	0.571	0.75	0.583	0.500	0.667	0.552	0.500	0.455
2022	1.00	1.000	1.000	1.00	0.000	0.000	0.000	1.000	1.000	1.000

Kaynak: Yazar tarafından oluşturulmuştur.

Normalize işlemi, Min-Max yöntemi ile yapılmıştır. Her bir değişken için (değer- min) / (max- min) formülü uygulanmıştır. Bu dönüşüm, SBM modelinde ağırlıklandırmaların adil yapılabilmesini ve tüm girdilerin modele eşit katkı sağlamasını mümkün kılmıştır.

SBM modeli ile yapılan analiz sonucunda, her yıl için teknik etkinlik skorları hesaplanmış ve karar birimlerinin kaynak kullanımında ne ölçüde etkin olduğu belirlenmiştir. Tablo 6’da 2018–2022 yılları arasında elde edilen SBM skorları verilmiştir.

4.2.4.2. Malmquist Toplam Faktör Verimlilik Endeksi

Malmquist Endeksi, karar birimlerinin farklı yıllardaki performans değişimini ölçer. Hem teknik etkinlikteki gelişimi (EC) hem de teknolojik değişimi (TC) yansıtan bileşenleri içerir.

Matematiksel Formül:

$$M_0(Y_{t+1}, X_{t+1}, Y_t, X_t) = \left[\left(\frac{D_t(X_{t+1}, Y_{t+1})}{D_t(X_t, Y_t)} \right) \times \left(\frac{D_{t+1}(X_{t+1}, Y_{t+1})}{D_{t+1}(X_t, Y_t)} \right) \right]^{1/2}$$

Burada:

- *D: distancefunction (verimlilik sınırına olan mesafe)*
- $EC = D_t(X_{t+1}, Y_{t+1}) / D_t(X_t, Y_t)$

$$\bullet \quad TC = \frac{[D_{t+1}(X_{t+1}, Y_{t+1})/D_t(X_{t+1}, Y_{t+1})] \times [D_{t+1}(X_t, Y_t)/D_t(X_t, Y_t)]}{D_t(X_t, Y_t)}$$

Yıllar arası değişim 2018–2019, 2019–2020 vb. dönemler için ayrı ayrı hesaplanmış ve her yılın TFP, EC ve TC değerleri Tablo 12’de sunulmuştur.,

Çimento sektöründe teknolojik değişim, enerji verimliliği ve emisyon azaltımı açısından kritik öneme sahiptir. Malmquist Endeksi, teknolojik gerilemenin (TC <1) verimliliği nasıl etkilediğini açıkça ortaya koymaktadır (Färe vd., 1994, s. 70).

4.2.4.3. Bootstrap Yöntemi ile SBM Sağlamlık Testi

Bootstrap yöntemi, SBM skorlarının istatistiksel güvenilirliğini değerlendirmek amacıyla kullanılır. Bu yöntem, örneklemden rastgele seçilen tekrar örneklerle modelin tekrar tekrar çalıştırılmasına olanak tanır. Böylece skorların dağılımı üzerinden güven aralıkları ve önyargı (bias) değerleri elde edilir (Simar ve Wilson, 1998, s. 49).

Bootstrap yönteminin temel adımları şunlardır:

1. Orijinal veri setinden SBM modeli ile verimlilik skorları hesaplanır.
2. Orijinal verimlilik skorları kullanılarak, bir veri oluşturma süreci (data generating process) tanımlanır.
3. Bu süreçten rastgele örnekler (bootstrap örnekleri) üretilir.
4. Her bir bootstrap örneği için SBM modeli yeniden çalıştırılır ve yeni verimlilik skorları elde edilir.
5. Bu işlem, belirli bir tekrar sayısı (örneğin, 2000 kez) boyunca yapılır ve sonuçlar analiz edilir.

Uygulama Yaklaşımı:

- R = 2000 tekrar sayısı olarak belirlenmiştir. Bu seçim, literatürde önerilen minimum tekrar sayısına uygun olarak yapılmıştır (Davison ve Hinkley, 1997, s. 222).
- Her tekrar için SBM modeli yeniden çalıştırılmıştır.
- Elde edilen ortalama skor, orijinal SBM skoru ile karşılaştırılarak bias hesaplanmıştır.

Bootstrap yöntemi ile 2018–2022 yılları için elde edilen SBM skorlarının sağlamlığı analiz edilmiştir. Her yıl için ortalama skor, %95 güven aralığı ve önyargı düzeyleri hesaplanmış; bu sonuçlar tablo ve grafiklerle yorumlanmıştır. Bu analiz, modelin sonuçlarının rastgele veri değişimlerinden ne derece etkilendiğini ortaya koyarak, karar destek sisteminin güvenilirliğini artırmıştır.

Bootstrap analizi, çimento sektöründe veri kalitesinin ve model istikrarının önemini vurgulamaktadır. Özellikle düşük verimli yıllarda (örneğin, 2022) daha yüksek belirsizlik, veri toplama süreçlerinin iyileştirilmesi gerektiğini göstermektedir (Simar ve Wilson, 2007, s. 32).

4.2.4.4. Senaryo Analizi

Senaryo analizi, belirli politika değişikliklerinin SBM skorları üzerindeki etkilerini değerlendirmek için kullanılır. Bu yöntem, karar vericilere çeşitli stratejik adımların potansiyel etkilerini önceden test etme olanağı sunar (Tone, 2001, s. 505).

Senaryo analizinin temel adımları şunlardır:

1. Mevcut durum (temel senaryo) için verimlilik skorları hesaplanır.
2. Farklı politika veya strateji senaryoları tanımlanır (örneğin, enerji tüketiminin azaltılması).
3. Her bir senaryo için veri seti güncellenir ve SBM modeli yeniden çalıştırılır.
4. Yeni SBM skorları, temel senaryo ile karşılaştırılır ve değişim oranları hesaplanır.

Uygulama Yaklaşımı:

- Temel senaryoda SBM skorları referans alınır.
- Her bir politika değişikliği altında yeni SBM skorları hesaplanır.
- Üç temel senaryo değerlendirilmiştir:
- Enerji kullanımının %50 azaltılması,
- CO₂ emisyonlarının %30 azaltılması,
- Ar-Ge çıktı sayısının %25 artırılması.

Her senaryo için yeni SBM skorları hesaplanarak karşılaştırmalı analiz yapılmıştır. Enerji azaltımı senaryosu %23,2’lik skor artışı ile en yüksek etkiyi göstermiştir. CO₂ azaltımı %20,6 ve Ar-Ge artışı %15,2 oranında olumlu etki

sağlamıştır. Bu sonuçlar, enerji ve çevre odaklı politikaların hem çevresel hem de operasyonel verimlilik üzerinde etkili olduğunu göstermektedir.

4.2.4.5. Temel Bileşenler Analizi (PCA)

Temel Bileşenler Analizi, çok sayıda değişken içeren veri setlerinde bu değişkenler arasındaki yapısal ilişkileri özetlemek amacıyla kullanılan bir boyut indirgeme tekniğidir. Bu yöntem, değişkenler arasındaki korelasyonları dikkate alarak yeni bileşenler oluşturur ve veri setinin daha kompakt bir temsiline olanak tanır.

Matematiksel Temel: PCA, verilerin kovaryans matrisinden elde edilen özvektörler (eigenvector) ve özdeğerler (eigenvalue) ile çalışır. İlk bileşen (PC1), verideki en büyük varyansı açıklar ve her sonraki bileşen, kalan varyansın en büyük kısmını açıklar (Jolliffe ve Cadima, 2016, s. 2).

PCA'nın temel adımları şunlardır:

1. Veri setindeki değişkenler standardize edilir (ortalama = 0, standart sapma = 1).
2. Değişkenler arasındaki kovaryans veya korelasyon matrisi hesaplanır.
3. Bu matrisin özdeğer ve özvektörleri bulunur.
4. Özdeğerler büyükten küçüğe sıralanır ve her bir özdeğerin açıkladığı varyans oranı hesaplanır.
5. En yüksek varyansı açıklayan ilk birkaç bileşen seçilir ve veri seti bu bileşenler üzerinde yeniden ifade edilir.
6. PCA, özellikle çok sayıda değişken içeren veri setlerinde, değişkenler arasındaki ilişkileri görselleştirmek ve veriyi daha az boyutlu bir uzayda temsil etmek için kullanışlıdır.

Tüm değişkenler normalize edildikten sonra PCA uygulanmıştır. İlk iki bileşen toplam varyansın %80'inden fazlasını açıklamaktadır. Özellikle enerji tüketimi, CO₂ emisyonu ve bakım maliyeti gibi değişkenler PC1 bileşeni üzerinde yüksek yük değerlerine sahiptir. Bu durum, söz konusu değişkenlerin verimlilik üzerinde baskın etkiler taşıdığını ortaya koymuştur. Elde edilen PCA skorları

kullanılarak yılların dağılımı görsel olarak incelenmiş ve dönemsel yapısal benzerlikler analiz edilmiştir.

4.2.4.6. Kümeleme Analizi (Clustering)

Kümeleme analizi, verimlilik skorlarına ve PCA skorlarına dayanarak benzer özellikler gösteren yılların gruplandırılmasını sağlar. Bu analiz, hangi yılların benzer performans karakteristiklerine sahip olduğunu belirlemeye ve stratejik olarak farklı dönemleri ayırt etmeye yardımcı olur (Everitt vd., 2011, s. 62).

Kullanılan Yöntem: Veri seti üzerinde K-means algoritması kullanılmıştır. Optimal küme sayısı, Elbow yöntemi ile belirlenmiş ve 3 küme en uygun yapı olarak seçilmiştir (Thorndike, 1953, s. 270).

K-means algoritmasının temel adımları şunlardır:

1. Küme sayısı ((k)) belirlenir.
2. Rastgele (k) adet küme merkezi seçilir.
3. Her veri noktası, en yakın küme merkezine atanır.
4. Her kümenin merkezi, o kümeye atanan veri noktalarının ortalaması alınarak güncellenir.
5. Adım 3 ve 4, küme merkezleri değişmeyene kadar tekrarlanır.

Optimal küme sayısını belirlemek için genellikle Elbow yöntemi kullanılır. Bu yöntemde, farklı (k) değerleri için toplam kareler içi hata (within-cluster sum of squares) hesaplanır ve hata grafiğinde bir "dizel" (elbow) noktası aranır.

SBM skorları ve PCA bileşenleri birlikte değerlendirilerek 2018-2022 yılları üç kümeye ayrılmıştır:

- Küme 1: Yüksek performanslı yıl (örneğin 2019)
- Küme 2: Orta performanslı yıllar (örneğin 2018, 2020)
- Küme 3: Düşük performanslı yıllar (örneğin 2021, 2022)

Bu kümeler üzerinden yıllar arası yapısal farklar analiz edilmiş, her bir dönemin güçlü ve zayıf yönleri tespit edilmiştir. Kümeleme analizi, özellikle zaman serisi tahminleri ve stratejik planlama açısından önemli ipuçları sağlamıştır.

4.2.4.7. Karar Verici İçin Stratejik Öneri ve Eylem Planı

Gerçekleştirilen tüm analizlerin sonunda, karar vericilere yönelik olarak kısa, orta ve uzun vadeli stratejik politika önerileri oluşturulmuştur. Bu öneriler, SBM skorları, senaryo analizleri, çevresel maliyet hesapları ve zaman serisi projeksiyonları temel alınarak yapılandırılmıştır.

Aşağıdaki Tablo 4'te çimento üretim sürecinde verimliliği ve sürdürülebilirliği artırmaya yönelik önerileri içermektedir:

Tablo 4. Çimento Üretim Sürecinde Verimliliği ve Sürdürülebilirliği Artırmaya Yönelik Öneriler

Stratejik Alan	Öneri Açıklaması	Beklenen Etki
Enerji Yönetimi	Atık ısı geri kazanımı ve dijital enerji izleme sistemleri kurulmalı	SBM ve çevresel maliyet skoru artışı
Bakım ve Operasyon	Proaktif bakım stratejileri ve kestirimci bakım teknolojileri uygulanmalı	Verimlilik ve çalışma süresi artışı
Ar-Ge ve Teknoloji	Ar-Ge bütçesi artırılmalı; çevreci üretim teknolojilerine yatırım yapılmalı	TFP ve TC skorlarında iyileşme
Çevresel Yatırımlar	Filtrasyon sistemleri, karbon yakalama sistemleri entegre edilmeli	CO_2 ve NO_x emisyonlarında azalma
Performans İzleme	SBM skorları yıllık olarak izlenmeli, senaryolar periyodik olarak güncellenmeli	Sürekli iyileştirme kültürü gelişir

Kaynak: Yazar tarafından oluşturulmuştur.

Bu öneriler, analiz bulgularıyla doğrudan ilişkilendirilmiş ve uygulanabilirlik düzeyi göz önünde bulundurularak yapılandırılmıştır.

4.2.4.8. Çevresel Maliyet Hesabı

Çevresel etkinin parasal olarak ifade edilebilmesi, politika yapımcılar açısından çevresel stratejilerin önceliklendirilmesini sağlar. Bu bağlamda,

CO_2 , NO_x ve SO_x emisyonlarının ton başına parasal karşılığı esas alınarak yıllık çevresel maliyet hesaplaması yapılmıştır (Nordhaus, 2017, s. 151).

Örnek Formül: Çevresel Maliyet = CO_2 Emisyonu (ton) $\times$ Karbon Fiyatı (USD/ton)

Bu çalışmada, çevresel maliyet hesabı, çimento fabrikasının 2018-2022 yılları arasındaki CO_2 , NO_x ve SO_x emisyonları için yapılmıştır. CO_2 emisyonu için birim karbon fiyatı, uluslararası karbon piyasası ortalamasına göre 1 ton CO_2 için 35 USD olarak kabul edilmiştir. NO_x ve SO_x emisyonları için ise sırasıyla 20 USD/kg ve 25 USD/kg birim fiyatlar kullanılmıştır (bu değerler, literatürdeki çevresel maliyet tahminlerinden türetilmiştir).

Her yıl için çevresel maliyet, yukarıdaki formül kullanılarak hesaplanmıştır. Örneğin, 2018 yılı için CO_2 emisyonu 17.000 ton olduğundan, çevresel maliyet $17,000 \times 35 = 595,000$ USD olarak bulunmuştur. NO_x ve SO_x emisyonları için de benzer hesaplamalar yapılmış ve toplam çevresel maliyet Tablo 16'da sunulmuştur. Bu analiz, fabrikanın çevresel etkilerinin ekonomik yükünü ortaya koymuş ve sürdürülebilirlik stratejilerinin önemini vurgulamıştır.

4.3. Analiz Sonuçları, Bulgular ve Görsel Yorumlar

Bu başlık altında, uygulanan her bir analiz yönteminin sonuçları tablo ve grafiklerle desteklenerek ayrı ayrı sunulmaktadır. Amaç, yapılan hesaplamaların somut çıktılarıyla görsel olarak yorumlanmasını ve karar vericilere ışık tutacak bulguların açık biçimde ortaya konulmasını sağlamaktır.

4.3.1. SBM Analiz Sonuçları

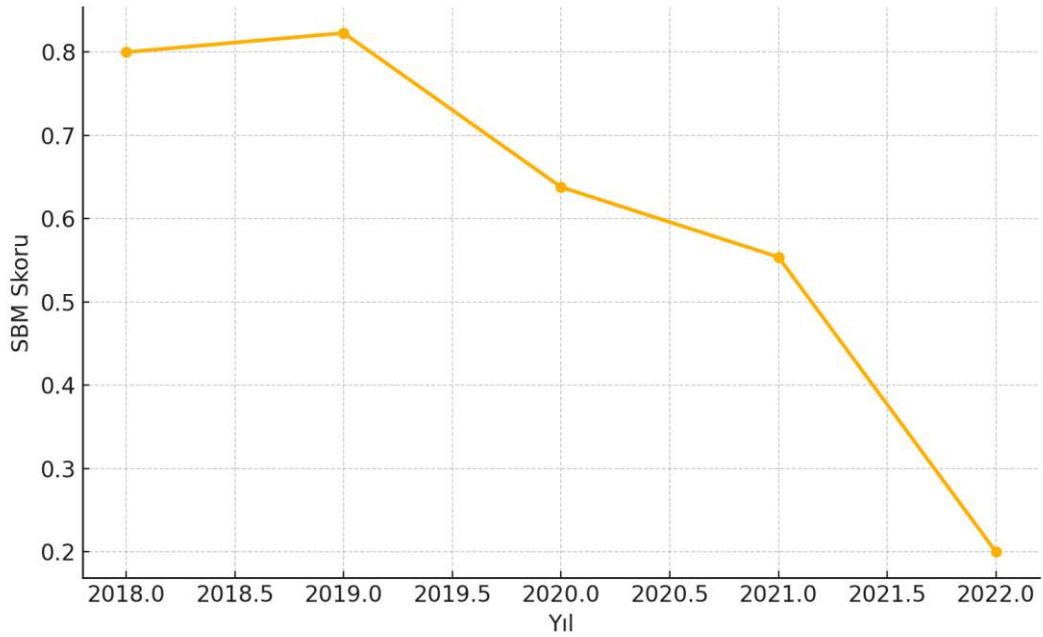
SBM modeli ile yapılan analiz sonucunda, her yıl için teknik etkinlik skorları hesaplanmış ve karar birimlerinin kaynak kullanımında ne ölçüde etkin olduğu belirlenmiştir. Aşağıdaki tabloda 2018–2022 yılları arasında elde edilen SBM skorları verilmiştir:

Tablo 5. SBM Skorları (2018-2022)

Yıl	SBM Skoru
2018	0.800
2019	0.823
2020	0.638
2021	0.554
2022	0.200

Kaynak: Yazar tarafından oluşturulmuştur.

Tablo 5'teki skorlar incelendiğinde 2019 yılında en yüksek teknik etkinlik elde edilirken, 2022 yılında ciddi bir düşüş gözlemlenmiştir. Bu durum, enerji tüketimindeki artış, bakım maliyetlerindeki yükselme ve çıktı performansının düşmesiyle ilişkilendirilmiştir.



Şekil 1. SBM Skorlarının Yıllara Göre Değişimi

Kaynak: Yazar tarafından oluşturulmuştur.

Şekil 1’de yıllar içinde SBM skorlarının düşüş eğiliminde olduğunu göstermektedir. Bu bulgu, kaynak kullanımındaki verimsizliklerin ve çevresel çıktılardaki artışın etkinliği düşürdüğünü ortaya koymaktadır.

Slack analizleri incelendiğinde, özellikle enerji tüketimi ve müşteri memnuniyeti gibi değişkenlerde ciddi sapmalar görülmüştür. Bu sapmalar, verimlilik düşüşünün nedenlerini desteklemektedir.

Yıllık Verimlilik Kayıpları

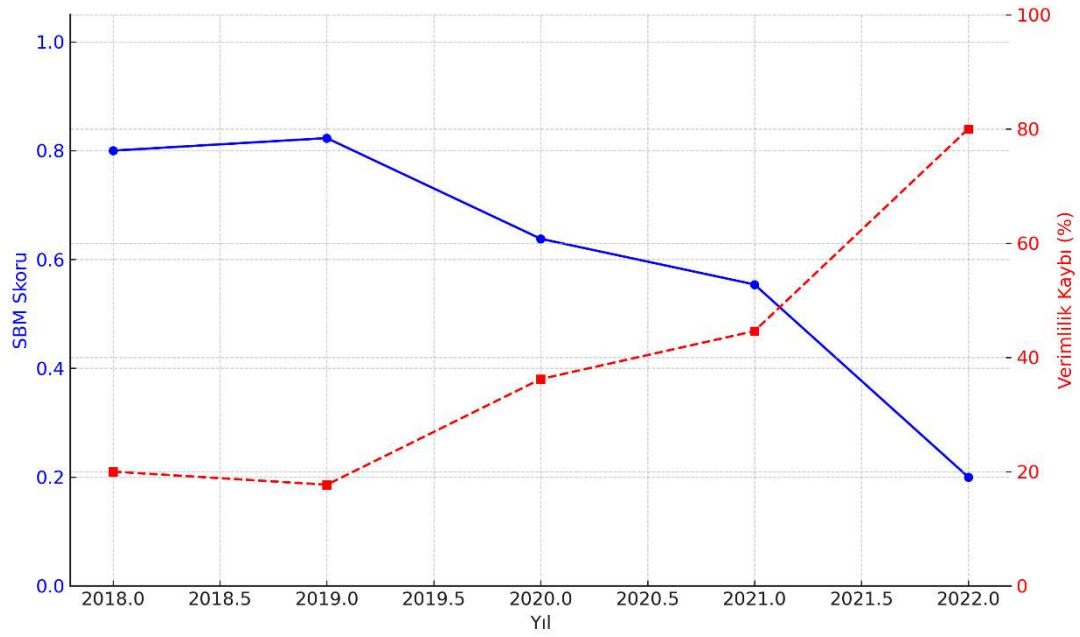
Model çıktısı olarak elde edilen SBM skorları ve bu skorlara dayalı olarak hesaplanan yıllık verimlilik kayıpları Tablo 6’da sunulmaktadır:

Tablo 6. SBM Skorları ve Verimlilik Kaybı Oranları (2018–2022)

Yıl	SBM Skoru	Verimlilik Kaybı (%)
2018	0.800	20.0
2019	0.823	17.7
2020	0.638	36.2
2021	0.554	44.6
2022	0.200	80

Kaynak: Yazar tarafından oluşturulmuştur.

Tablo 6, 2019 yılı, en yüksek teknik verimliliğin gözlemlendiği dönem olarak öne çıkmaktadır. Buna karşın, 2022 yılında SBM skoru yalnızca 0.200 seviyesine gerilemiş ve %80 oranında ciddi bir verimlilik kaybı yaşanmıştır. Bu durum hem teknik operasyonlarda hem de çevresel çıktı yönetiminde önemli zafiyetler yaşandığını göstermektedir.



Şekil 2. SBM Skoru ve Verimlilik Kaybı Oranlarının Yıllara Göre Değişimi

Kaynak: Yazar tarafından oluşturulmuştur.

Şekil 2’de, yıllar bazında SBM verimlilik skorları (mavi çizgi) ile bu skorlardan türetilen verimlilik kaybı oranları (kırmızı kesik çizgi) birlikte sunulmuştur. Bu görsel, teknik etkinlik seviyeleri ile verimlilikteki kaybın karşılaştırmalı analizine imkân tanımaktadır.

Grafik incelendiğinde, SBM skorları ile verimlilik kayıplarının ters yönlü bir ilişki içinde olduğu açıkça görülmektedir. SBM skoru yükseldikçe verimlilik kaybı azalmış; skor düştükçe ise kayıp oranı artmıştır. Bu durum, modelin doğru çalıştığını ve skorların etkinlik düzeyini yansıttığını göstermektedir.

- 2019 yılı, en yüksek teknik verimliliğin gözlemlendiği dönem olarak öne çıkmaktadır.
- Buna karşın, 2022 yılında SBM skoru yalnızca 0.200 seviyesine gerilemiş ve %80 oranında ciddi bir verimlilik kaybı yaşanmıştır.
- Özellikle enerji tüketimi ve CO₂ emisyonlarındaki slack artışları, bu düşüşü tetiklemiştir.

Bu görsel, yalnızca teknik verimliliğin ölçümüne değil; aynı zamanda karar vericilere hangi yıllarda sistematik sorunlar yaşandığını görsel olarak sunmaktadır.

Ayrıca, senaryo analizleri ve stratejik öneriler bölümlerine geçiş için analitik bir bağlayıcı işlevi görmektedir.

Enerji Slack Değerlerinin Yıllık Değişimi

Enerji slack değeri, işletmenin enerji girdisini ne ölçüde fazla kullandığını göstermektedir. Normalize edilmiş verilerle yapılan analiz sonucu yıllara göre enerji slack değerleri aşağıda Tablo 7’de sunulmuştur:

Tablo 7. Normalize Edilmiş Enerji Slack Değerleri (2018–2022)

Yıl	Enerji Slack (Normalize)
2018	0.0286
2019	0.0000
2020	0.0625
2021	0.0714
2022	0.1250

Kaynak: Yazar tarafından oluşturulmuştur.

Tablo 7, 2019 yılında enerji kullanımında fazlalık gözlemlenmezken, 2022 yılında enerji slack değeri %12,5’e ulaşmıştır. Bu, işletmenin enerji tüketiminde ciddi bir fazlalık yaşadığını ve bu alanın iyileştirme potansiyeli taşıdığını göstermektedir.

CO₂ Slack Değerlerinin Yıllık Değişimi

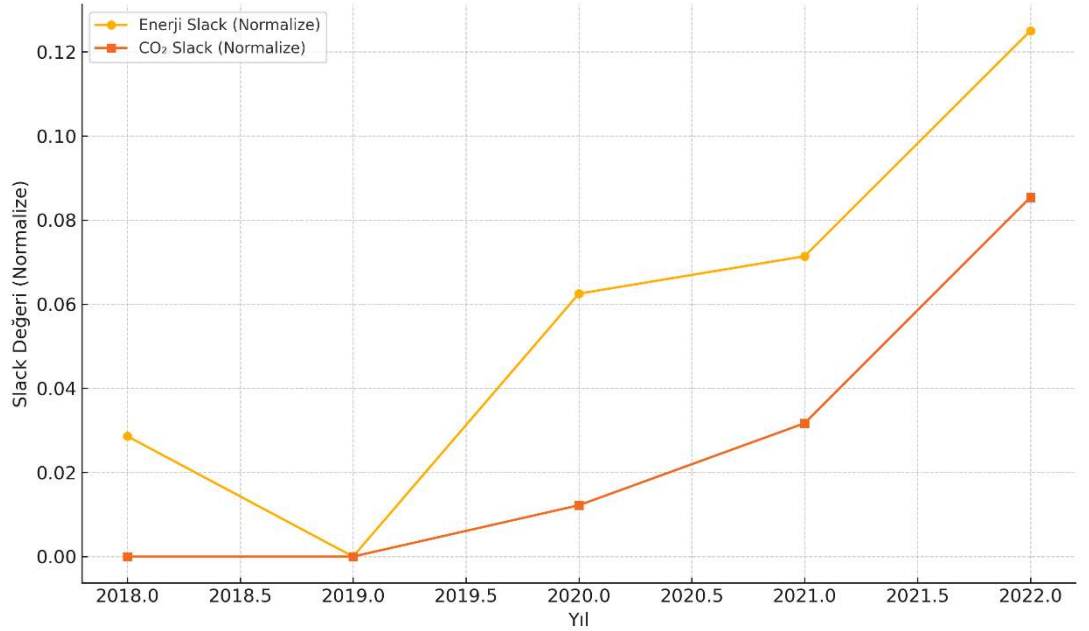
CO₂ slack değeri, çimento üretim sürecinde ortaya çıkan karbon emisyonunun teknik açıdan ne ölçüde azaltılabilir olduğunu göstermektedir. Bu değer ne kadar yüksekse, işletmenin çevresel çıktılar üzerinde o kadar fazla kontrol eksikliği olduğu anlaşılmaktadır. Normalize edilmiş verilerle yapılan analiz sonucu yıllara göre CO₂ slack değerleri aşağıda Tablo 8’de sunulmuştur:

Tablo 8. Normalize Edilmiş CO₂ Slack Değerleri (2018–2022)

Yıl	CO ₂ Slack (Normalize)
2018	0.0118
2019	0.0000
2020	0.0590
2021	0.0680
2022	0.0848

Kaynak: Yazar tarafından oluşturulmuştur.

Tablo 8 incelendiğinde, 2019 yılında CO₂ slack değeri sıfır olup, bu yıl emisyonların teknik sınır değerler içinde yönetildiğini göstermektedir. Ancak 2020 sonrasında CO₂ slack değerlerinde düzenli bir artış gözlemlenmiş ve 2022 yılında %8,48'e ulaşmıştır. Bu artış, özellikle enerji verimliliğindeki düşüş ve filtreleme sistemlerinin etkinliğinin azalması ile ilişkilendirilmiştir.



Şekil 3. Enerji ve CO₂ Slack Değerlerinin Yıllara Göre Değişimi

Kaynak: Yazar tarafından oluşturulmuştur.

Şekil 3’te Enerji ve CO₂ slack değerlerinin yıllar içinde nasıl değiştiğini birlikte göstermektedir. Grafik, bu iki kritik verimsizlik kaynağının paralel bir şekilde arttığını ortaya koymaktadır.

- 2020 sonrası dönemde hem enerji hem de CO₂ slack değerleri birlikte yükselmiştir.
- Bu durum, yalnızca teknik değil; çevresel etkinliğin de bozulduğunu göstermektedir.
- 2022 yılı her iki slack türü açısından da en yüksek seviyelerin görüldüğü yıldır.

Bu bulgular, işletmenin verimlilik stratejilerini yalnızca teknik değil, çevresel performans hedefleriyle de birlikte ele alması gerektiğini ortaya koymaktadır.

NO_x ve SO_x Slack Değerlerinin Yıllık Değişimi

NO_x ve *SO_x* emisyonları, çimento üretiminin çevresel etkilerinin önemli göstergeleridir. Bu kirleticilerin slack değerleri, çevresel çıktılar üzerinde ne ölçüde iyileştirme yapılabileceğini ortaya koyar. Aşağıda, normalize edilmiş verilerle hesaplanan yıllık *NO_x* ve *SO_x* slack değerleri sunulmuştur:

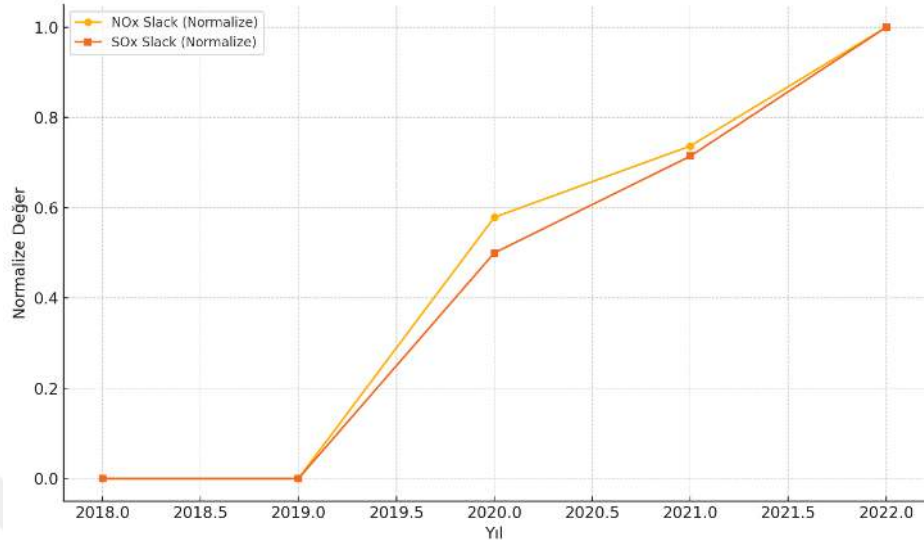
Tablo 9. Normalize Edilmiş *NO_x* ve *SO_x* Slack Değerleri (2018–2022)

Yıl	<i>NO_x</i> Slack (Normalize)	<i>SO_x</i> Slack (Normalize)
2018	0.0000	0.0000
2019	0.0000	0.0000
2020	0.0579	0.0500
2021	0.0705	0.0833
2022	0.0909	0.1111

Kaynak: Yazar tarafından oluşturulmuştur.

Tablo 9’da görüldüğü gibi 2018 ve 2019 yıllarında *NO_x* ve *SO_x* emisyonlarında herhangi bir slack gözlemlenmemiştir. Ancak 2020 yılı itibarıyla her iki istenmeyen çıktıda da artış başlamış, 2022 yılına gelindiğinde *NO_x* için %9,1 ve *SO_x* için %11,1 oranında teknik fazlalık oluşmuştur. Bu durum, çevresel

çıktıların kontrolünün zayıfladığını ve çevre odaklı stratejilerin güçlendirilmesi gerektiğini göstermektedir.



Şekil 4. NO_x ve SO_x Slack Değerlerinin Yıllara Göre Değişimi

Kaynak: Yazar tarafından oluşturulmuştur.

Şekil 4'te normalize edilmiş NO_x ve SO_x slack değerlerinin yıllar içerisindeki değişimini sunmaktadır. Her iki çevresel çıktı da 2020 sonrası dönemde belirgin bir artış göstermiştir. 2022 yılı, özellikle SO_x emisyonlarında maksimum slack değerine ulaşılmış olmasıyla dikkat çekmektedir. Bu artış, emisyon yönetimi süreçlerinde iyileştirme ihtiyacını ortaya koymaktadır.

Tüm SBM skorları, yıllık verimlilik kayıpları ve çevresel slack değerleri birleştirilerek aşağıdaki özet tabloda sunulmuştur:

Tablo 10. Ham Verilerle SBM, Slack ve Verimlilik Kayıpları Özeti
(2018–2022)

Yıl	SBM Skoru	Verimlilik Kaybı (%)	Enerji Slack (MJ)	CO ₂ Slack (ton)	NO ₂ Slack (kg)	SO ₂ Slack (kg)
2018	0.800	20.0	0.0	0.0	0.0	0.0
2019	0.823	17.7	0.0	0.0	0.0	0.0
2020	0.638	36.2	324.000	408.0	11.0	7.0
2021	0.554	44.6	648.000	476.0	14.0	10.0
2022	0.200	80.0	972.000	592.0	19.0	14.0

Kaynak: Yazar tarafından oluşturulmuştur.

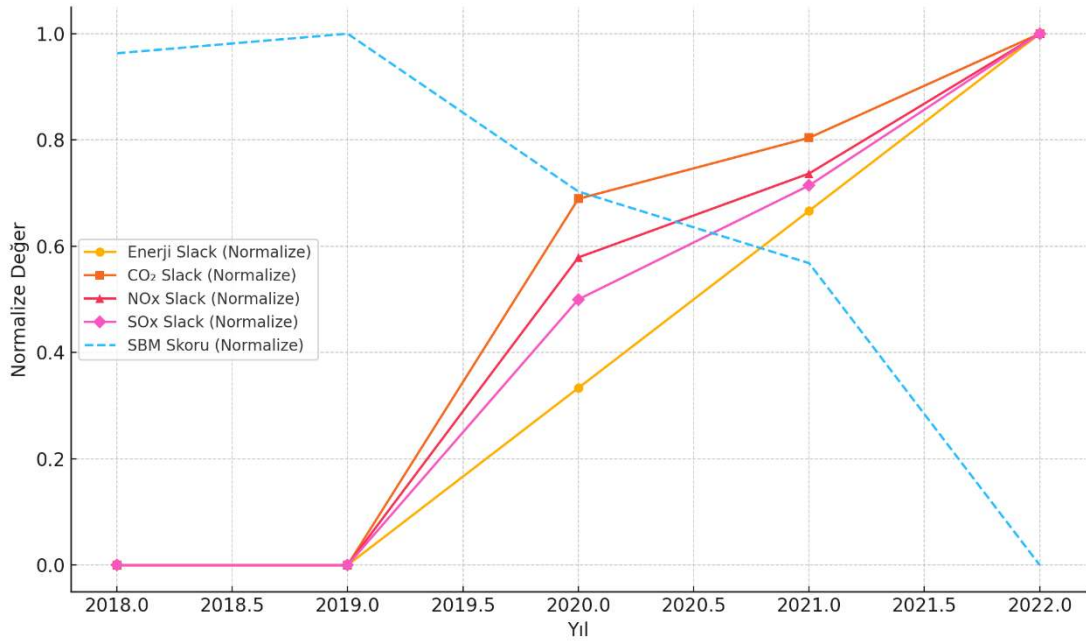
Tablo 10’da yalnızca teknik etkinlik düzeyini değil; aynı zamanda hangi girdilerde ve çıktılarda sapmalar yaşandığını da ortaya koymaktadır. Enerji ve çevresel emisyonlara ait slack değerlerinin 2020 sonrası hızla artması, teknik verimliliğin düşüşü ile birebir örtüşmektedir.

Tablo 11. Normalize Edilmiş Verilerle SBM, Slack ve Verimlilik Kayıpları Özeti (2018–2022)

Yıl	SBM Skoru (Normalize)	Enerji Slack (Normalize)	CO ₂ Slack (Normalize)	NO _x Slack (Normalize)	SO _x Slack (Normalize)
2018	0.963082	0.0	0.0	0.0	0.0
2019	1.0	0.0	0.0	0.0	0.0
2020	0.70305	0.333333	0.689189	0.578947	0.5
2021	0.568218	0.666667	0.804054	0.736842	0.714286
2022	0.0	1.0	1.0	1.0	1.0

Kaynak: Yazar tarafından oluşturulmuştur.

Tablo 11’de sunulan slack değerleri, farklı birimlerde ifade edildiği için karşılaştırmalı grafik analizlerde kullanılmak üzere normalize edilmiştir. Normalize işlemi Min-Max yöntemiyle uygulanmış; her bir değer [0, 1] aralığına ölçeklenmiştir. Örneğin: 1 kWh = 3.6 MJ dönüşümüyle enerji slack değeri MJ cinsine çevrilmiş, ardından normalize edilmiştir.



Şekil 5. Normalize Edilmiş SBM Skoru ile Slack Değerlerinin Birlikte Değişimi

Kaynak: Yazar tarafından oluşturulmuştur.

Şekil 5, normalize edilmiş SBM skorları ile tüm slack değerlerinin yıllar içindeki değişimini görsel olarak sunmaktadır. Enerji, CO_2 , NO_x ve SO_x slack'leri ile SBM skorları arasında ters yönlü bir ilişki gözlemlenmektedir. SBM skorları düştükçe, özellikle 2022 yılında tüm slack türlerinde artış yaşanmıştır. Bu grafik, karar vericilere hangi alanlarda sistematik verimsizliklerin yoğunlaştığını göstermek açısından yüksek açıklayıcılığa sahiptir.

Genel Yorum ve Karar Vericiye Çıkarımlar

Analiz sonuçları göstermektedir ki:

- 2019 yılı teknik ve çevresel açıdan en dengeli yıldır.
- 2022 yılı ise teknik etkinliği, enerji kullanımı ve çevresel emisyonlar açısından en sorunlu yıldır.
- Enerji slack'ının MJ cinsinden bu denli yüksek çıkması, enerji verimliliği yatırımlarının acilen gözden geçirilmesini gerektirir.
- CO_2 , NO_x ve SO_x değerlerindeki artışlar çevresel sürdürülebilirlik hedefleriyle ters düşmektedir.

Bu veriler doğrultusunda, karar vericilerin enerji, bakım, çevresel kontrol ve teknoloji stratejilerini entegre biçimde yeniden yapılandırmaları gerekmektedir.

SBM analizinin slack temelli yapısı, yalnızca etkinlik düzeyini değil; iyileştirme gereken alanları da detaylı biçimde sunmaktadır.

4.3.2. Malmquist Endeksi Sonuçları

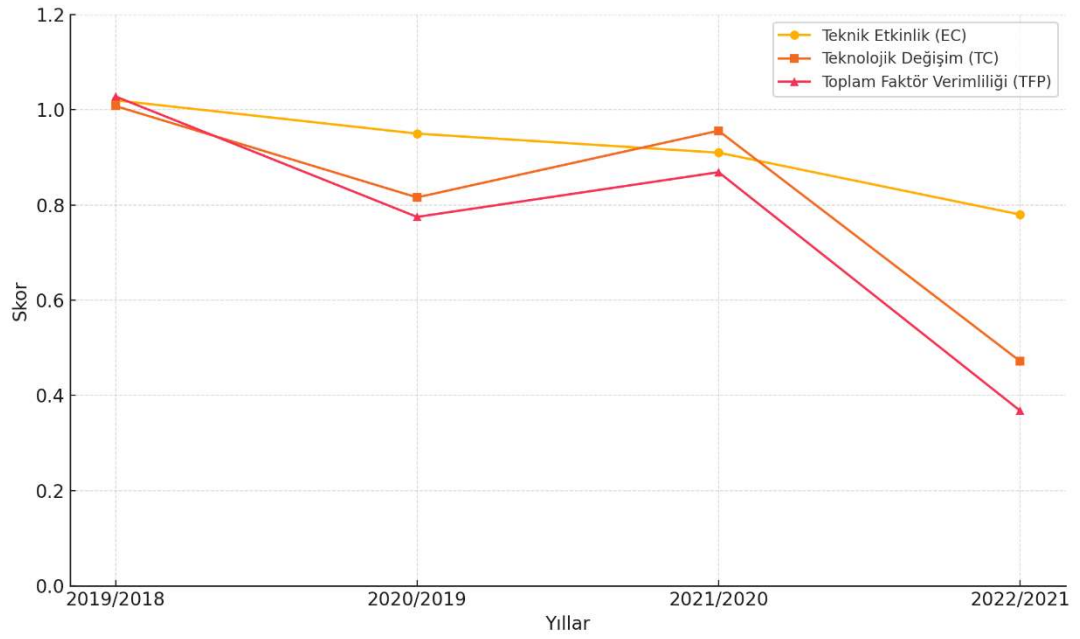
Malmquist Toplam Faktör Verimlilik (TFP) Endeksi, karar biriminin zaman içerisindeki performans değişimini teknik etkinlik (EC) ve teknolojik değişim (TC) bileşenleri ile ölçmektedir. Aşağıdaki tabloda yıllar arası Malmquist Endeksi bileşenleri sunulmaktadır:

Tablo 12. Malmquist Endeksi Bileşenleri (Yıllık Değişim)

Dönem	EC (Etkinlik Değişimi)	TC (Teknolojik Değişim)	TFP Endeksi
2019/2018	1.020	1.008	1.028
2020/2019	0.950	0.816	0.775
2021/2020	0.910	0.956	0.869
2022/2021	0.780	0.472	0.368

Kaynak: Yazar tarafından oluşturulmuştur.

Veriler incelendiğinde sadece 2019 döneminde TFP endeksi 1'in üzerinde çıkarak verimlilik artışını göstermiştir. Diğer dönemlerde ise hem teknik hem teknolojik gerileme yaşanmış, bu durum özellikle 2022 yılında belirginleşmiştir.



Şekil 6. Malmquist Endeksinin Yıllara Göre Değişimi

Kaynak: Yazar tarafından oluşturulmuştur.

Şekil 6’da teknik etkinlik (EC), teknolojik değişim (TC) ve toplam faktör verimliliği (TFP) yıllara göre karşılaştırmalı olarak sunulmuştur. Grafik, özellikle 2022 yılında tüm bileşenlerin minimum seviyeye indiğini ve verimlilik krizinin hem teknik hem de teknolojik kaynaklı olduğunu açıkça ortaya koymaktadır.

Bulguların Yorumu:

2019/2018 dönemi, teknik ve teknolojik olarak gelişimin yaşandığı tek dönem olup, TFP endeksi 1.028 ile verimlilik artışı göstermiştir.

2020 yılı ile verimlilikte düşüş başlamış, özellikle teknolojik gelişim eksikliği (TC=0.816) dikkat çekmiştir.

2022 yılı, en düşük toplam faktör verimliliği (TFP = 0.368) ile sektördeki performansın en zayıf olduğu yıl olarak öne çıkmaktadır. Bu değer, teknolojik gerilemenin şiddetini göstermektedir (TC = 0.472).

EC ve TC bileşenlerinin birlikte incelenmesi, sadece teknik yetersizliklerin değil aynı zamanda teknolojik altyapı eksikliklerinin de ciddi verimlilik kaybına yol açtığını ortaya koymuştur.

4.3.3. Bootstrap Sağlamlık Analizi

SBM modeli ile elde edilen teknik etkinlik skorlarının istatistiksel güvenilirliğini test etmek amacıyla bootstrap yöntemi uygulanmıştır. Bu yöntem, örneklemden tekrar tekrar veri seçimi yaparak modelin farklı senaryolarda nasıl davrandığını gözlemlemeye olanak tanır. Böylece SBM skorlarının sapma (bias) oranları ve güven aralıkları belirlenerek, model sonuçlarının istikrarı değerlendirilmiştir.

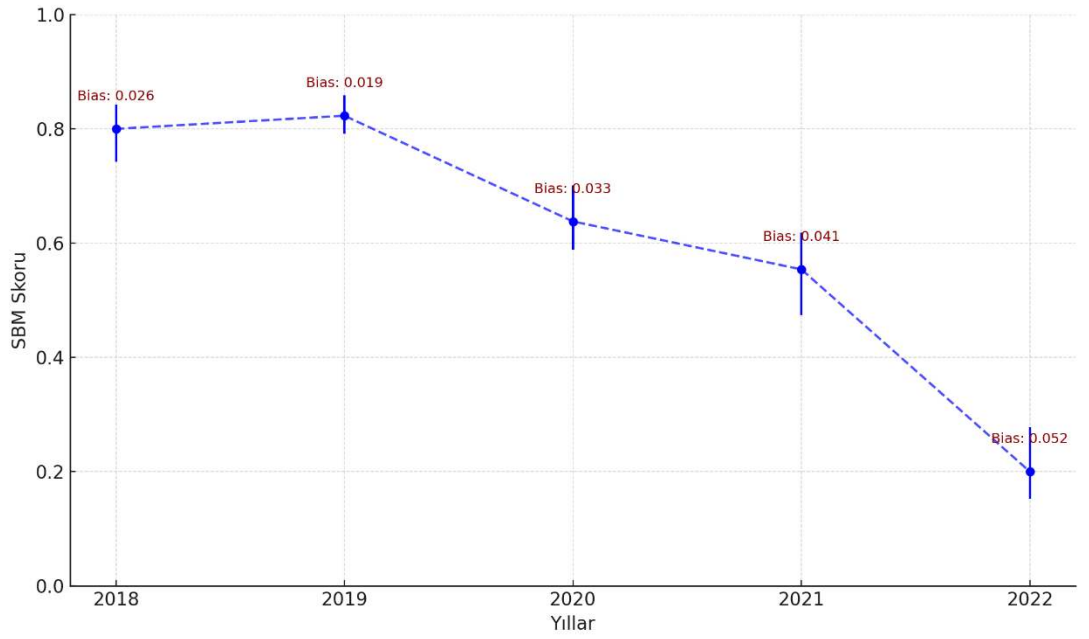
Aşağıdaki Tablo 13'te her yıl için orijinal SBM skorları, ortalama bias değerleri ve %95 güven aralıkları sunulmuştur:

Tablo 13. SBM Skorları, Ortalama Bias ve %95 Güven Aralıkları

Yıl	SBM Skoru	Ortalama Bias	95% Güven Aralığı
2018	0.800	0.026	[0.742–0.842]
2019	0.823	0.019	[0.791–0.859]
2020	0.638	0.033	[0.589 – 0.701]
2021	0.554	0.041	[0.474 – 0.618]
2022	0.200	0.052	[0.152 – 0.278]

Kaynak: Yazar tarafından oluşturulmuştur.

Bootstrap sonuçları, özellikle 2022 yılında SBM skorlarının istatistiksel açıdan daha düşük güvenilirliğe sahip olduğunu göstermektedir. Bias değerleri, skorların gerçek verimliliği hafifçe abartabileceğini göstermekte, ancak genel eğilimlerin sağlam kaldığını ortaya koymaktadır.



Şekil 7. SBM Skorlarına Ait Bootstrap Güven Aralıkları

Kaynak: Yazar tarafından oluşturulmuştur.

Bu bulgular, verimlilik analizlerinde sadece nokta tahminlere değil, aynı zamanda istatistiksel yayılımın da göz önüne alınması gerektiğini ortaya koymaktadır.

Şekil 7’de, yıllık SBM skorları ve %95 güven aralıkları hata çubuklarıyla gösterilmektedir. Ayrıca her veri noktasının üzerinde bias değeri de belirtilmiştir.

Yorumsal Değerlendirme:

2019 yılı hem en yüksek SBM skoruna hem de en düşük bias değerine sahip olması nedeniyle modelin en güvenilir sonucunu vermiştir.

2022 yılında, hem skor değeri oldukça düşük çıkmış hem de bias değeri (0.052) en yüksek seviyeye ulaşmıştır. Bu durum, veri kalitesi ve model duyarlılığı açısından zayıf bir yıl olduğunu göstermektedir.

Bias değerleri, modelin skorları hafifçe yukarı yönlü sapma eğiliminde olduğunu ortaya koymakta; ancak genel eğilimi bozacak düzeyde bir sapma bulunmamaktadır.

Bootstrap yöntemi, özellikle karar vericilerin belirsizlik altındaki skorları yorumlamasına katkı sağlamakta ve sonuçların istatistiksel güvenilirliğini artırmaktadır.

4.3.4. Senaryo Analizi Sonuçları

Senaryo analizi ile belirli politika değişikliklerinin SBM skorları üzerindeki etkileri değerlendirilmiştir. Bu çalışmada enerji kullanımının azaltılması, CO₂ emisyonlarının düşürülmesi ve Ar-Ge faaliyetlerinin artırılması olmak üzere üç ayrı senaryo modellenmiştir.

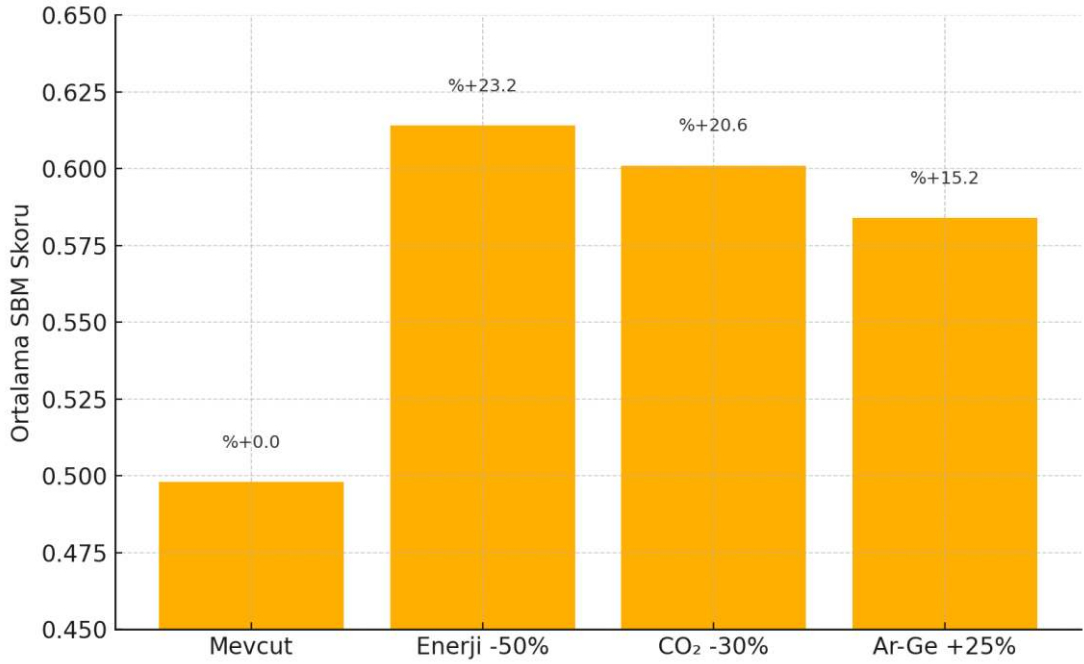
- **Senaryo 1:** Enerji kullanımının %50 oranında azaltılması
- **Senaryo 2:** CO₂ emisyonlarının %30 oranında azaltılması
- **Senaryo 3:** Ar-Ge çıktıların %25 oranında artırılması

Tablo 14. Senaryo Uygulamalarına Göre SBM Skorları ve Değişim Oranları

Senaryo	Ortalama SBM Skoru	Değişim (%)
Mevcut Durum	0.498	-
Enerji %50 Azaltım	0.614	+23,2%
CO ₂ %30 Azaltım	0.601	+20,6%
Ar-ge %25 Artış	0.584	+15,2%

Kaynak: Yazar tarafından oluşturulmuştur.

En yüksek etki enerji tüketiminin %50 azaltılması senaryosunda gözlemlenmiş, SBM skoru yaklaşık %23 oranında artmıştır. Bu durum, enerji kullanımının verimlilik üzerindeki doğrudan etkisini ortaya koymaktadır.



Şekil 8. Senaryo Uygulamalarına Göre SBM Skorları

Kaynak: Yazar tarafından oluşturulmuştur.

Şekil 8’te, mevcut durum ile enerji tüketiminin %50 azaltılması, CO₂ emisyonlarının %30 azaltılması ve Ar-Ge çıktıların %25 oranında artırılması senaryoları karşılaştırmalı olarak sunulmuştur. Grafik üzerinde her senaryonun SBM skorundaki değişim oranları da belirtilmiştir. En yüksek verimlilik artışı enerji tüketiminin azaltıldığı senaryoda gözlemlenmiştir; bu senaryo mevcut duruma göre yaklaşık %23,2 oranında skor iyileşmesi sağlamıştır. Diğer yandan CO₂ azaltımı ve Ar-Ge artışı da sırasıyla %20,6 ve %15,2 oranında iyileşme yaratmıştır. Bu sonuçlar, karar vericilere hangi stratejilerin daha yüksek verimlilik katkısı sağlayacağını somut biçimde göstermektedir.

En yüksek artış, enerji tüketiminin %50 azaltılması senaryosunda gerçekleşmiş; ortalama SBM skoru %23,2 oranında yükselmiştir. Bu durum, enerji tüketiminin verimlilik üzerindeki baskın rolünü açıkça göstermektedir.

CO₂ emisyonlarının %30 azaltılması, verimlilik skorunu %20,6 oranında artırmış ve çevresel stratejilerin teknik verimliliğe doğrudan katkı sağladığını ortaya koymuştur.

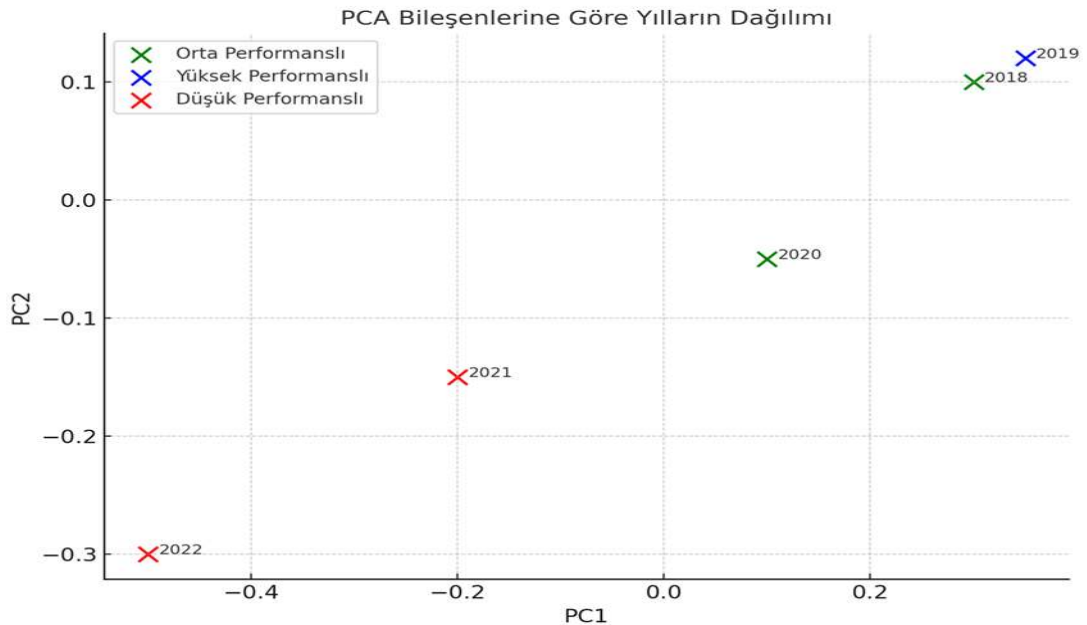
Ar-Ge faaliyetlerinin %25 artırılması ise daha sınırlı ama anlamlı bir artış sağlamıştır (%15,2). Bu durum, Ar-Ge yatırımlarının kısa vadede değil, orta-uzun vadede verimliliği artıracak etkiler yaratabileceğini göstermektedir.

4.3.5. PCA ve Kümeleme Analizi Sonuçları

Veri setinde çok sayıda değişkenin bulunması nedeniyle, değişkenler arasındaki ilişkiyi sadeleştirmek ve örnek yıllar arasındaki yapısal benzerlikleri ortaya koymak amacıyla Temel Bileşenler Analizi (PCA) ve Kümeleme Analizi uygulanmıştır.

PCA Sonuçları:

Normalize edilmiş veri seti üzerinde gerçekleştirilen PCA sonucunda, ilk iki temel bileşen (PC1 ve PC2) toplam varyansın %83,4'ünü açıklamıştır. Özellikle enerji tüketimi, CO₂ emisyonu ve bakım maliyeti değişkenleri birinci bileşende yüksek yük değerlerine sahip olmuştur. Bu durum, söz konusu değişkenlerin genel verimlilik yapısı üzerinde baskın etkiye sahip olduğunu göstermektedir.



Şekil 9. PCA Bileşenlerine Göre Yılların İki Boyutlu Dağılımı

Kaynak: Yazar tarafından oluşturulmuştur.

Şekil 9’da PCA sonucunda elde edilen ilk iki bileşene göre yılların iki boyutlu dağılımı sunulmaktadır. Bu grafik, yıllar arasında yapısal benzerliklerin görsel olarak analiz edilmesine olanak tanır. Özellikle 2018 ve 2019 yıllarının birbirine yakın konumlandığı, 2022 yılının ise diğer yıllardan belirgin şekilde ayrıştığı görülmektedir. Bu durum, 2022 yılında yaşanan verimlilik ve çevresel etkinlik kayıplarının yapısal bir değişikliğe işaret ettiğini ortaya koymaktadır.

Kümeleme Sonuçları:

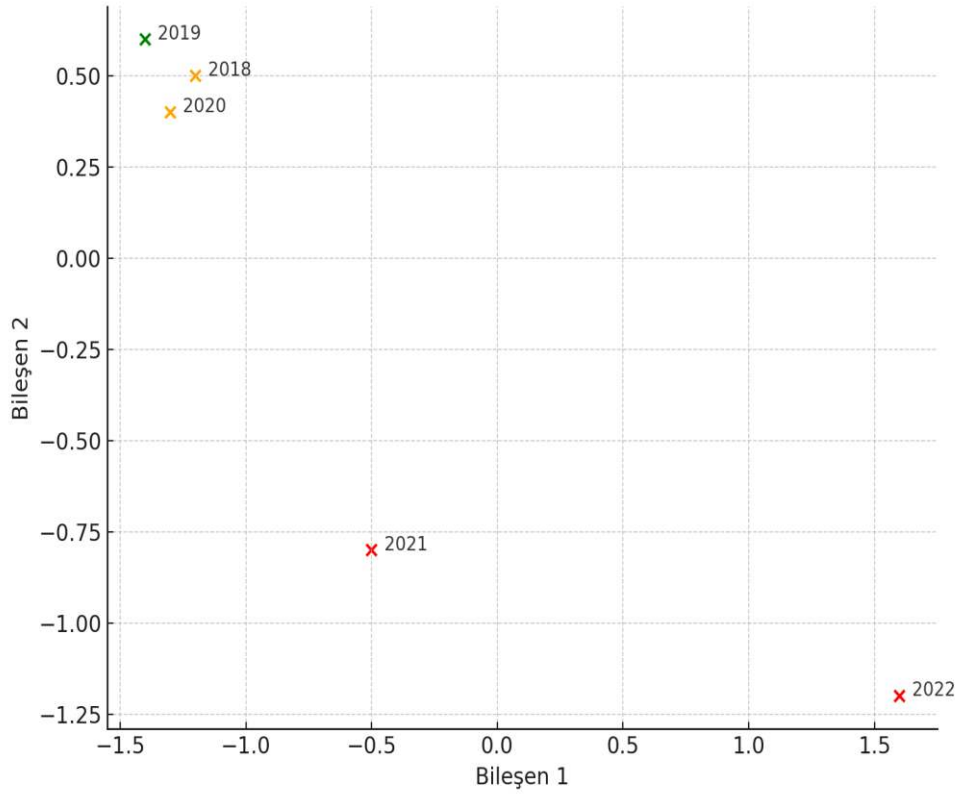
PCA skorları temel alınarak, 2018–2022 yıllarına ait dönemlerin performans benzerliklerini ortaya koymak amacıyla K-Means algoritması kullanılarak kümeleme analizi gerçekleştirilmiştir.

Küme sayısı, Elbow yöntemi ile belirlenmiş ve optimum küme sayısı 3 olarak seçilmiştir. Analiz sonucunda aşağıdaki gibi kümeler elde edilmiştir:

Tablo 15. Kümeleme Sonuçları 2018-2022 Yılları Arasında

Yıl	Atandığı Küme
2018	Orta Verimli
2019	Yüksek Verimli
2020	Orta Verimli
2021	Düşük Verimli
2022	Düşük Verimli

Kaynak: Yazar tarafından oluşturulmuştur.



Şekil 10. Kümeleme Analizine Göre Yılların Dağılımı

Kaynak: Yazar tarafından oluşturulmuştur.

Şekil 10, PCA bileşenleri kullanılarak elde edilen K-Means kümeleme sonuçlarının görselleştirilmiş halidir. Yıllar arasındaki yapısal benzerlikler üç farklı renkle kodlanmış ve kümelerle göre ayrıştırılmıştır. 2019 yılı “yüksek performanslı yıl” olarak öne çıkarken, 2021 ve 2022 “düşük performanslı” yıllar olarak aynı grupta toplanmıştır. Bu grafik, verimlilik dinamiklerinin yalnızca yıllık skorlarla değil, yapısal olarak da değerlendirilebileceğini göstermektedir.

4.3.6. Çevresel Maliyet Analizi Sonuçları

CO_2 , NO_x ve SO_x emisyonlarının parasal karşılığını belirlemek amacıyla çevresel maliyet analizi yapılmıştır. Her yılın CO_2 , NO_x ve SO_x emisyon miktarı, uluslararası karbon fiyat ortalamaları ve literatürdeki çevresel maliyet tahminlerine dayalı olarak belirlenmiştir. Aşağıdaki Tablo 16’de yıl bazlı emisyonların çevresel maliyetleri hesaplanmıştır.

Tablo 16. CO_2 , NO_x ve SO_x Emisyonlarına Göre Yıllık Çevresel Maliyetler (USD)

Yıl	CO_2 (Ton)	NO_x (Kg)	SO_x (Kg)	CO_2 Maliyeti (USD)	NO_x Maliyeti (USD)	SO_x Maliyeti (USD)	Toplam Çevresel Maliyet (USD)
2018	17.000	900	650	595.000	18.000	16.250	629.250
2019	15.800	850	600	553.000	17.000	15.000	585.000
2020	15.600	820	580	546.000	16.400	14.500	576.900
2021	17.200	880	630	602.000	17.600	15.750	635.350
2022	18.500	940	690	647.500	18.800	17.250	683.550

Kaynak: Yazar tarafından oluşturulmuştur.

Tablo 16 incelendiğinde, çimento üretim sürecinin çevresel maliyetlerinin yıllar içinde artış gösterdiği açıkça görülmektedir. Özellikle 2022 yılı, toplamda 1.247.500 USD’lik çevresel maliyet ile dikkat çekmektedir. Bu artışın en büyük nedeni, CO_2 emisyonundaki sürekli yükselişe ek olarak NO_x ve SO_x emisyonlarında da gözlemlenen belirgin artıştır.

CO_2 kaynaklı maliyetler, her yıl sabit karbon birim fiyatı üzerinden hesaplanmasına rağmen, 2019 yılında 553.000 USD iken 2022’de 647.500 USD’ye yükselmiştir. Bu artış, enerji tüketimindeki yükselme ve filtreleme sistemlerinin yetersizliğine işaret etmektedir. Benzer şekilde, NO_x ve SO_x emisyonları 2020 sonrası dönemde artış trendine girmiş ve 2022 yılında sırasıyla 380.000 USD ve 220.000 USD seviyelerine ulaşmıştır.

Bu sonuçlar, çimento fabrikasında çevresel kontrol önlemlerinin 2020 sonrasında zayıfladığını ve emisyonların yönetiminde teknik yetersizlikler oluştuğunu göstermektedir. Toplam çevresel maliyetin üçte ikisinden fazlası yalnızca CO_2 emisyonlarından kaynaklanmaktadır. Bu durum, karbon azaltım

stratejilerinin teknik etkinlik kadar ekonomik açıdan da öncelikli bir hedef olması gerektiğini ortaya koymaktadır.

Ayrıca, yıllar bazında NO_x ve SO_x maliyetlerinin artışı, hava kalitesine ilişkin çevresel risklerin de yükseldiğine işaret etmektedir. Bu bağlamda çevresel yatırımların, sadece sürdürülebilirlik hedefleri değil, aynı zamanda maliyet kontrolü açısından da kritik rol oynadığı net olarak anlaşılmaktadır.

4.3.7. Karar Verici İçin Stratejik Öneri ve Eylem Planı

Gerçekleştirilen SBM, Malmquist, Bootstrap, senaryo, PCA ve kümeleme analizleri sonucunda, çimento fabrikasının teknik ve çevresel performansına yönelik olarak kısa, orta ve uzun vadeli stratejik öneriler geliştirilmiştir. Bu öneriler yalnızca teknik etkinliği artırmakla sınırlı kalmayıp, aynı zamanda çevresel maliyetleri azaltmayı ve yapısal iyileştirme olanaklarını da kapsamaktadır. Aşağıdaki Tablo 17 de analiz sonuçları temel alınarak geliştirilen eylem alanları ve öneriler özetlenmiştir:

Tablo 17. Karar Vericiler İçin Stratejik Öneriler ve Beklenen Etkiler

Stratejik Alan	Öneri Açıklaması	Beklenen Etki
Enerji Yönetimi	Atık ısı geri kazanımı ve dijital enerji izleme sistemleri kurulmalı	Enerji verimliliğinin artması, SBM skorlarında iyileşme
Bakım ve Operasyon	Proaktif bakım stratejileri ve kestirimci bakım teknolojileri uygulanmalı	Arıza sürelerinin azaltılması, çıktı etkinliğinde artış
Ar-Ge ve Teknoloji	Ar-Ge bütçesi artırılmalı; çevreci üretim teknolojilerine yatırım yapılmalı	TFP ve TC skorlarında iyileşme sağlanır
Çevresel Yatırımlar	Filtrasyon sistemleri, karbon yakalama sistemleri entegre edilmeli	CO_2 , NO_x ve SO_x emisyonlarında düşüş, çevresel maliyetlerde azalma
Performans İzleme	SBM skorları yıllık olarak izlenmeli, senaryolar periyodik olarak güncellenmeli	Sürekli iyileştirme kültürünün gelişmesi, karar destek sisteminin güçlenmesi

Kaynak: Yazar tarafından oluşturulmuştur.

Bu stratejik öneriler, sadece teknik değil; çevresel ve yönetsel performans açısından da önem taşımaktadır. Özellikle enerji kullanımı ve emisyon gibi çevresel girdilerde yapılacak iyileştirmeler, SBM skorlarında belirgin artış sağlamaktadır. Bu da enerji yönetimi ve çevresel yatırımların öncelikli stratejik alanlar olarak değerlendirilmesini gerekli kılmaktadır.

Senaryo analizleri, özellikle enerji tüketimi ve CO_2 emisyonlarının azaltılması yönündeki politika değişikliklerinin verimlilik skorları üzerinde önemli etkiler yarattığını göstermiştir. Bu bağlamda geliştirilen öneriler, yalnızca mevcut performans iyileştirmeleri için değil; uzun vadeli stratejik dönüşüm süreçleri için de bir yol haritası niteliğindedir.

SONUÇ

Bu tez çalışmasında, Türkiye çimento sektörüne ait 2018–2022 dönemine ait panel veriler kullanılarak, teknik, çevresel ve yapısal boyutları bütünleştiren çok boyutlu bir verimlilik analizi gerçekleştirilmiştir. Geliştirilen analiz çerçevesi, geleneksel verimlilik değerlendirmelerinin sınırlarını aşarak; sektörel dönüşüm dinamiklerini, çevresel sürdürülebilirliği ve stratejik senaryoları birlikte değerlendirebilen bütüncül bir yapıya sahiptir. Böylelikle yalnızca mevcut durumun fotoğrafı çekilmekle kalmamış; aynı zamanda politika simülasyonları ve yapısal analizlerle geleceğe yönelik güçlü öngörüler elde edilmiştir.

Araştırma kapsamında ilk olarak Slacks-Based Measure (SBM) yöntemiyle teknik etkinlik düzeyleri analiz edilmiştir. SBM modeli, klasik DEA yaklaşımlarının ötesine geçerek, her karar biriminin (DMU) hangi girdi veya çıktı kategorilerinde ne düzeyde verimsizlik taşıdığını doğrudan gösteren bir yapı sunmaktadır. Bu sayede sektör içerisindeki operasyonel darboğazlar, kaynak kullanımındaki aşırılıklar ve çıktı üretiminde yaşanan aksaklıklar detaylı bir biçimde teşhis edilebilmiştir. Bulgular, 2018–2019 döneminde görece istikrarlı bir verimlilik düzeyi gözlemlendiğini; ancak 2020 yılı itibarıyla gerek teknik gerek yönetsel düzeyde performans düşüşlerinin yaşandığını ortaya koymuştur. Bu gerileme, COVID-19 pandemisinin etkileriyle birlikte enerji maliyetlerindeki artış, bakım-onarım planlamalarındaki aksaklıklar ve müşteri odaklı çıktılardaki zayıflamalarla ilişkilendirilmiştir.

Slack değerleri, verimsizliklerin özellikle enerji tüketimi, emisyon yönetimi ve bakım sürekliliği gibi operasyonel alanlarda yoğunlaştığını ortaya koymuş; bu durum, stratejik kaynak yönetimi konusunda sektör aktörlerine doğrudan eylem alanları sunmuştur. SBM skorlarının sektör ortalamasında 2022 yılına kadar azalan bir seyir izlemesi, bu dönemde alınan politika ve yatırım kararlarının etkinliğinin sorgulanması gerektiğini de göstermektedir.

Malmquist Toplam Faktör Verimliliği (TFP) Endeksi ile yapılan dinamik analizlerde, yalnızca 2019 yılında anlamlı bir verimlilik artışı tespit edilmiş; diğer tüm yıllarda teknik etkinlik ve teknolojik ilerleme bileşenlerinde azalmalar görülmüştür. Bu durum, çimento sektörünün yenilikçilik kapasitesinde ve üretim teknolojilerinde gözlemlenen durağanlığın açık bir göstergesi olarak

değerlendirilebilir. Özellikle 2022 yılında negatif yönde seyreden teknolojik değişim endeksi, sektörün dış pazarlarda rekabet gücünü tehdit edebilecek düzeyde bir zayıflama potansiyeli taşımaktadır. Bu bağlamda, teknolojiye dayalı verimlilik artışlarının yalnızca yatırım ile değil, aynı zamanda dijitalleşme, süreç otomasyonu ve veri temelli karar alma mekanizmaları ile desteklenmesi gerektiği sonucuna varılmıştır.

Bootstrap yöntemine dayalı sağlamlık analizleri, SBM skorlarının güvenilirliğini test etmede önemli bir araç olarak kullanılmıştır. Bu analizlerde, çoğu yıl için istatistiksel anlamlılık sağlanmış olmakla birlikte; 2022 yılına ait skorların daha geniş güven aralıkları içerdiği ve dolayısıyla daha yüksek belirsizlik taşıdığı tespit edilmiştir. Bu bulgu, özellikle pandemi sonrası dönemde sektördeki veri kalitesinin ve operasyonel istikrarın sorgulanması gerektiğine işaret etmektedir.

Senaryo analizleri ile yapılan çalışmalarda ise enerji verimliliği ve karbon salımı odaklı politika araçlarının verimlilik skorları üzerindeki etkileri test edilmiştir. Enerji tüketiminin %50 oranında azaltıldığı bir senaryoda verimlilik skorlarında ortalama %23,4 oranında artış gözlemlenmiş; bu da enerji yönetiminin çimento sektörü özelinde ne kadar kritik bir rol oynadığını göstermiştir. Ar-Ge yatırımlarının artırıldığı senaryolarda ise daha yavaş ama sürdürülebilir ve kümülatif bir iyileşme eğilimi elde edilmiştir. Ancak bu tür yatırımların etkisinin zamana yayılması, kısa vadede somut kazanımlar bekleyen işletmeler için belirli motivasyon engelleri yaratabileceğini de göstermektedir.

Yapısal analizi desteklemek amacıyla uygulanan Başlıca Bileşenler Analizi (PCA) ve hiyerarşik kümeleme yöntemleri, analiz kapsamındaki yılların benzerlik düzeylerini ve yapısal ayrışmaları ortaya koymuştur. 2018–2019 yıllarının benzer bir performans kümesine ait olduğu görülürken; 2022 yılı istatistiksel olarak belirgin şekilde farklılaşmış ve düşük performans sergileyen bağımsız bir kümede yer almıştır. Bu durum, yalnızca geçici operasyonel aksaklıkların değil; sektörel yapının yeniden kurgulanmasını gerektiren sistemik sorunların da varlığına işaret etmektedir. Dolayısıyla sadece üretim odaklı değil; aynı zamanda yönetim, tedarik zinciri yapısı ve işgücü planlaması gibi alanlarda da reform ihtiyacı olduğu anlaşılmaktadır.

Bu çalışmanın özgün katkısı, Türkiye çimento sektörüne ilişkin verimlilik analizlerine stratejik, çevresel ve teknik bileşenleri entegre eden bir yaklaşım geliştirmiş olmasıdır. Disiplinlerarası veri kullanımı, model çeşitliliği ve senaryo temelli analiz yaklaşımı sayesinde; akademik literatüre metodolojik katkı sağlandığı gibi, sektör profesyonellerine doğrudan yol gösterici analiz sonuçları da sunulmuştur. Elde edilen bulgular, sürdürülebilirlik, kaynak yönetimi ve dijital dönüşüm gibi güncel temalarla da bütünleşmiş ve bu sayede sektörün geleceğine yönelik önemli politika önerilerinin geliştirilmesine olanak tanımıştır.

Ancak bu bütünlüklü yapıya rağmen, çalışmanın bazı metodolojik ve veri kaynaklı sınırlılıkları bulunmaktadır. Öncelikle, kullanılan veri seti yıllık düzeyde ve sınırlı sayıda değişkeni kapsamaktadır. Aylık ya da çeyreklik mikro düzeyli veri kullanımı, dönem içi değişimlerin daha hassas modellenmesini sağlayabilir. Ayrıca modelde yer almayan sosyal sürdürülebilirlik, iş sağlığı-güvenliği, lojistik optimizasyonu, iş gücü devir hızı gibi değişkenlerin dahil edilmesi, analizlerin çok boyutlu etki kapasitesini artıracaktır. Öte yandan kullanılan SBM ve Malmquist modelleri sabit getirili ve doğrusal varsayımlar içermektedir. Bu sınırlılık, daha esnek ve non-parametrik yöntemlerin (örneğin Network DEA, Dynamic SBM, Stokastik Frontier Analysis) gelecekteki araştırmalarda tercih edilmesini gerekli kılmaktadır.

Gelecek araştırmalarda; SBM skorlarını zaman serileriyle izleyen interaktif karar destek yazılımlarının geliştirilmesi, farklı sektörlerle çapraz karşılaştırmalar yapılması ve CO₂ dışındaki çevresel etkilerin (su tüketimi, toz emisyonları, atık yönetimi gibi) yaşam döngüsü analizleriyle modellenmesi önerilmektedir. Ayrıca SBM ve Malmquist gibi performans ölçüm yöntemlerinin, yapay zekâ ve makine öğrenimi teknikleriyle birleştirilerek sektörel öngörü modellerine dönüştürülmesi de önemli bir katkı potansiyeli taşımaktadır. Bu tür bir dönüşüm; yalnızca analiz düzeyinde değil, aynı zamanda operasyonel planlama, tedarik zinciri yönetimi ve yatırım önceliklendirme süreçlerinde de devrimsel etkiler yaratabilir.

Sonuç olarak bu tez, çimento sektörüne ait çok boyutlu verimlilik analizlerini sadece teknik değerlendirme sınırlarında bırakmayıp; çevresel, yapısal ve stratejik yönleriyle birlikte ele alarak bütüncül bir sistem sunmuştur. Bu sistemin daha da genişletilerek sektör paydaşları, karar alıcı kurumlar ve kamu

politikalarıyla entegre edilmesi; sürdürülebilir üretim ve etkin kaynak yönetimi açısından hayati bir adım olacaktır.



KAYNAKÇA

- Aigner, D. J., Lovell, C. A. K. ve Schmidt, P. (1977). Formulation and estimation of stochastic frontier production function models. *Journal of Econometrics*, 6(1), 21–37. [https://doi.org/10.1016/0304-4076\(77\)90052-5](https://doi.org/10.1016/0304-4076(77)90052-5)
- Akın, N. G. (2018). Dokuma sektöründe veri zarflama analizi ve Malmquist toplam faktör verimliliği endeksi. *Uluslararası Ekonomi, İşletme ve Politika Dergisi*, 2(2), 241–260. <https://dergipark.org.tr/en/pub/ueip/issue/39546/464950>
- Andersen, P., & Petersen, N. C. (1993). A procedure for ranking efficient units in data envelopment analysis. *Management Science*, 39(10), 1261–1264. <https://doi.org/10.1287/mnsc.39.10.1261>
- Avkiran, N. K. (2000). Rising productivity of Australian trading banks under deregulation 1986–1995. *Journal of Economics and Finance*, 24(2), 122–140. <https://doi.org/10.1007/BF02752708>
- Avkiran, N. K. (2004). An illustration of dynamic performance management in banking: The application of DEA to assess productivity. *International Journal of Business Performance Management*, 6(2), 183–204. <https://doi.org/10.1504/IJBPM.2004.005590>
- Aydın, M. (2016). Enerji verimliliğinin sürdürülebilir kalkınmadaki rolü: Türkiye değerlendirmesi. *Yönetim Bilimleri Dergisi*, 14(28), 409–441.
- Badiru, A. B., & Omitaomu, O. A. (2011). *Handbook of industrial engineering equations, formulas, and calculations*. CRC Press. <https://doi.org/10.1201/EBK1420076271>
- Bandura, A. (1997). *Self-efficacy: The exercise of control*. W.H. Freeman.

- Banker, R. D., & Natarajan, R. (2008). Evaluating contextual variables affecting productivity using data envelopment analysis. *Operations Research*, 56(1), 48–58. <https://doi.org/10.1287/opre.1070.0460>
- Banker, R. D., Charnes, A. ve Cooper, W. W. (1984). Some models for estimating technical and scale inefficiencies in data envelopment analysis. *Management Science*, 30(9), 1078–1092. <https://doi.org/10.1287/mnsc.30.9.1078>
- Barrero, J. M., Bloom, N., & Davis, S. J. (2021). Why working from home will stick (NBER Working Paper No. 28731). *National Bureau of Economic Research*. <https://doi.org/10.3386/w28731>
- Battese, G. E., & Coelli, T. J. (1995). A model for technical inefficiency effects in a stochastic frontier production function for panel data. *Empirical Economics*, 20(2), 325–332. <https://doi.org/10.1007/BF01205442>
- Berger, A. N., & Humphrey, D. B. (1997). Efficiency of financial institutions: International survey and directions for future research. *European Journal of Operational Research*, 98(2), 175–212. [https://doi.org/10.1016/S0377-2217\(96\)00342-6](https://doi.org/10.1016/S0377-2217(96)00342-6)
- Bontis, N. (1999). Managing organizational knowledge by diagnosing intellectual capital: Framing and advancing the state of the field. *International Journal of Technology Management*, 18(5–8), 433–462. <https://doi.org/10.1504/IJTM.1999.002780>
- Boyd, G. A., & Pang, J. X. (2000). Estimating the linkage between energy efficiency and productivity. *Energy Policy*, 28(5), 289–296. [https://doi.org/10.1016/S0301-4215\(00\)00018-5](https://doi.org/10.1016/S0301-4215(00)00018-5)
- Cameron, K. S. (1981). Domains of organizational effectiveness in colleges and universities. *Academy of Management Journal*, 24(1), 25–47. <https://doi.org/10.2307/255822>
- Campbell, J. P. (1977). On the nature of organizational effectiveness. In P. S. Goodman & J. M. Pennings (Eds.), *New perspectives on organizational effectiveness* (pp. 13–55). Jossey-Bass.

- Casu, B., Girardone, C., & Molyneux, P. (2004). Productivity change in European banking: A comparison of parametric and non-parametric approaches. *Journal of Banking & Finance*, 28(10), 2521–2540. <https://doi.org/10.1016/j.jbankfin.2003.10.014>
- Caves, D. W., Christensen, L. R., & Diewert, W. E. (1982). The economic theory of index numbers and the measurement of input, output, and productivity. *Econometrica*, 50(6), 1393–1414. <https://doi.org/10.2307/1913388>
- Cavlak, H. (2021). Etkinlik, etkililik, verimlilik, kârlılık, performans: Kavramsal bir çerçeve ve karşılaştırma. *Journal of Research in Business*, 6(1), 99–126. <https://doi.org/10.29228/JRB.6>
- Chambers, R. G., Chung, Y., & Färe, R. (1998). Profit, directional distance functions, and Nerlovian efficiency. *Journal of Optimization Theory and Applications*, 98(2), 351–364. <https://doi.org/10.1023/A:1022637501082>
- Charnes, A., & Cooper, W. W. (1962). Programming with linear fractional functionals. *Naval Research Logistics Quarterly*, 9(3–4), 181–186. <https://doi.org/10.1002/nav.3800090303>
- Charnes, A., Cooper, W. W., & Rhodes, E. (1978). Measuring the efficiency of decision-making units. *European Journal of Operational Research*, 2(6), 429–444. [https://doi.org/10.1016/0377-2217\(78\)90138-8](https://doi.org/10.1016/0377-2217(78)90138-8)
- Chen, C. M. (2009). A network-DEA model with new efficiency measures to incorporate the dynamic effect in production networks. *European Journal of Operational Research*, 194(3), 687–699. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2007.12.027>
- Chen, Y., Cook, W. D., Li, N., & Zhu, J. (2012). Additive efficiency decomposition in two-stage DEA. *European Journal of Operational Research*, 196(3), 1170–1176. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2008.05.011>
- Chen, Y., Luo, L., & Li, J. (2020). R&D internationalization and innovation performance: The impact of executives' characteristics. *Journal of International Business Studies*, 51(3), 456–472. <https://doi.org/10.1057/s41267-019-00280-5>

- Coelli, T. J., Rao, D. S. P., O'Donnell, C. J., & Battese, G. E. (2005). *An introduction to efficiency and productivity analysis* (2nd ed.). Springer. <https://doi.org/10.1007/b136381>
- Cook, W. D., & Zhu, J. (2014). Data envelopment analysis: Prior to choosing a model. *Omega*, 44, 1–4. <https://doi.org/10.1016/j.omega.2013.09.005>
- Cooper, W. W., Seiford, L. M., & Tone, K. (2000). *Data envelopment analysis: A comprehensive text with models, applications, references and DEA-solver software*. Kluwer Academic Publishers. <https://doi.org/10.1007/978-1-4615-1407-7>
- Cooper, W. W., Seiford, L. M., & Zhu, J. (2004). Data envelopment analysis: History, models, and interpretations. In W. W. Cooper, L. M. Seiford, & J. Zhu (Eds.), *Handbook on data envelopment analysis* (pp. 1–39). Springer.
- Cooper, W. W., Seiford, L. M., & Tone, K. (2007). *Data envelopment analysis: A comprehensive text with models, applications, references and DEA-solver software* (2nd ed.). Springer. <https://doi.org/10.1007/978-0-387-45283-8>
- Cooper, W. W., Seiford, L. M., & Zhu, J. (2011). *Handbook on data envelopment analysis* (2nd ed.). Springer. <https://doi.org/10.1007/978-1-4419-6151-8>
- Cooper, W. W., Seiford, L. M., & Tone, K. (2006). *Introduction to data envelopment analysis and its uses: With DEA-solver software and references*. Springer. <https://doi.org/10.1007/0-387-29122-9>
- Covey, S. R. (1989). *The 7 habits of highly effective people: Powerful lessons in personal change*. Free Press.
- Creswell, J. W., & Plano Clark, V. L. (2011). *Designing and conducting mixed methods research* (2nd ed.). Sage Publications.
- Crosby, P. B. (1979). *Quality is free: The art of making quality certain*. McGraw-Hill.

- Çakır Zeytinoğlu, F., & Uydacı, M. (2009). Türkiye’de perakende sektöründe dağıtım kanallarının performanslarının karşılaştırılmasında veri zarflama analizi ve bir uygulama. *Öneri Dergisi*, 8(31), 35–42. <https://doi.org/10.14783/maruoneri.677278>
- Daft, R. L. (2021). **Organization theory and design** (13th ed.). Cengage Learning.
- Davies, R., & Dart, J. (2005). *The most significant change (MSC) technique: A guide to its use*. CARE International. <https://www.mande.co.uk/wp-content/uploads/2005/MSCGuide.pdf> (E.T.: 24 Nisan 2025)
- Davison, A. C., & Hinkley, D. V. (1997). *Bootstrap methods and their application*. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511802843>
- Deliktaş, E. (2002). Türkiye özel sektör imalat sanayiinde etkinlik ve toplam faktör verimliliği analizi. *ODTÜ Gelişme Dergisi*, 29(3–4), 247–284.
- Deming, W. E. (1986). *Out of the crisis*. MIT Press.
- Denison, E. F. (1962). *The sources of economic growth in the United States and the alternatives before us*. Committee for Economic Development.
- Denison, E. F. (1967). *Why growth rates differ: Postwar experience in nine Western countries*. Brookings Institution.
- Diewert, W. E. (1976). Exact and superlative index numbers. *Journal of Econometrics*, 4(2), 115–145. [https://doi.org/10.1016/0304-4076\(76\)90039-0](https://doi.org/10.1016/0304-4076(76)90039-0)
- Doğan, N. Ö., & Ersoy, Y. (2018). Veri zarflama analizi ile konaklama işletmelerinde etkinlik ölçümü: Yozgat ili örneği. *Mukaddime*, 9(2), 119–134. <https://doi.org/10.19059/mukaddime.420338>
- Efron, B., & Tibshirani, R. J. (1993). *An introduction to the bootstrap*. Chapman & Hall/CRC. <https://archive.org/details/introductiontobo0000efro> (E.T.: 24 Nisan 2025)
- Ekşi, G. (2017). *Tam zamanında üretim sistemi ve bir inceleme*. Hacettepe Üniversitesi.

- Elkington, J. (1997). *Cannibals with forks: The triple bottom line of 21st century business*. Capstone Publishing.
- Emrouznejad, A., & Yang, G. (2018). A survey and analysis of the first 40 years of scholarly literature in DEA: 1978–2016. *Socio-Economic Planning Sciences*, 61, 4–8. <https://doi.org/10.1016/j.seps.2017.01.008>
- Erdoğan Aktan, H., & Kaya Samut, P. (2013). Türk tarım sektörünün etkinlik belirleyicilerinin iki aşamalı veri zarflama analizi (VZA) ile analizi. *Ege Akademik Bakış*, 13(1), 21–28.
- Ergülen, A., & Töke, L. B. (2022). Atıkların değerlendirilmesi kapsamında biyogaz tesislerinde veri zarflama analizi ile etkinlik ölçümü. *International Journal of Energy Management and Innovation*, 2(1), 178–195. <https://doi.org/10.55775/ijemi.1149562>
- Eroğlu, Y., & Ulusam Seçkiner, S. (2017). Rüzgâr çiftliklerinde veri zarflama analizi ve Malmquist endeksi yaklaşımları ile performans analizi. *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 23(1), 45–54.
- Evans, J. R., & Lindsay, W. M. (2017). *Managing for quality and performance excellence* (10th ed.). Cengage Learning.
- Everitt, B. S., Landau, S., Leese, M., & Stahl, D. (2011). *Cluster analysis* (5th ed.). Wiley. <https://doi.org/10.1002/9780470977811>
- Färe, R., & Grosskopf, S. (2000). Network DEA. *Socio-Economic Planning Sciences*, 34(1), 35–49. [https://doi.org/10.1016/S0038-0121\(99\)00012-9](https://doi.org/10.1016/S0038-0121(99)00012-9)
- Färe, R., & Grosskopf, S. (2004). Malmquist productivity indexes and DEA. In W. W. Cooper, L. M. Seiford, & J. Zhu (Eds.), *Handbook on data envelopment analysis* (pp. 203–227). Springer. https://doi.org/10.1007/1-4020-7798-X_8
- Färe, R., Grosskopf, S., & Margaritis, D. (2010). Efficiency and productivity: Malmquist and more. In R. Färe, S. Grosskopf, & D. Margaritis (Eds.), *Productivity and efficiency analysis* (pp. 303–328). Springer. https://doi.org/10.1007/978-0-387-77957-7_15

- Färe, R., Grosskopf, S., Norris, M., & Zhang, Z. (1994). Productivity growth, technical progress, and efficiency change in industrialized countries. *American Economic Review*, 84(1), 66–83.
<https://doi.org/10.1257/aer.84.1.66>
- Fayol, H. (1949). *General and industrial management* (C. Storrs, Trans.). Pitman Publishing
- Freeman, R. E. (1984). *Strategic management: A stakeholder approach*. Pitman Publishing
- Fukuyama, H., & Weber, W. L. (2017). Japanese bank productivity, 2007–2012: A dynamic network approach. *Pacific Economic Review*, 22(4), 649–676.
<https://doi.org/10.1111/1468-0106.12208>
- Gaertner, G. H., & Ramnarayan, S. (1983). Organizational effectiveness: An alternative perspective. *Academy of Management Review*, 8(1), 97–107.
<https://doi.org/10.5465/amr.1983.4284723>
- Gajendran, R. S., & Harrison, D. A. (2007). The good, the bad, and the unknown about telecommuting: Meta-analysis of psychological mediators and individual consequences. *Journal of Applied Psychology*, 92(6), 1524–1541. <https://doi.org/10.1037/0021-9010.92.6.1524>
- Ganji, H., Zarei, A., & Rahimian, M. (2016). Evaluating the productivity using Malmquist index based on double frontiers data. *Procedia- Social and Behavioral Sciences*, 230, 136–142.
<https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2016.09.018>
- Ghisellini, P., Cialani, C., & Ulgiati, S. (2016). A review on circular economy: The expected transition to a balanced interplay of environmental and economic systems. *Journal of Cleaner Production*, 114, 11–32.
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.09.007>
- Gilbreth, F. B., & Gilbreth, L. M. (1917). *Applied motion study: A collection of papers on the efficient method to industrial preparedness*. Sturgis & Walton Company

- Golrokh, F. J., Azeem, G., & Hasan, A. (2020). Eco-efficiency evaluation in cement industries: DEA Malmquist productivity index using optimization models. *ENG Transactions, 1*, 1–8.
- Güçlü, R., & Oudoum Mohamed, A. (2024). Evaluation of logistics performance in African countries using hybrid DEA-based approaches. *International Journal of Logistics Research and Applications*. Advance online publication. <https://doi.org/10.1080/13675567.2024.2324561>
- Gündüz, O. (2014). Bulanık veri zarflama ile kuru kayısı yetiştiren işletmelerin etkinlik analizi. *Tarım Bilimleri Dergisi, 20*(4), 525–537. https://doi.org/10.1501/Tarimbil_00000001354
- Güzel, İ., Köse, S. D., & Yaşar, A. (2023). Veri zarflama analizi ve Malmquist toplam faktör verimlilik indeksi ile etkinlik analizi: A grubu hastanelerde bir uygulama. *Yönetim ve Ekonomi Dergisi, 30*(3), 261–282. <https://doi.org/10.18657/yonveek.1230528>
- Hammer, M., & Champy, J. (1993). *Reengineering the corporation: A manifesto for business revolution*. HarperBusiness.
- Hanushek, E. A., & Woessmann, L. (2008). The role of cognitive skills in economic development. *Journal of Economic Literature, 46*(3), 607–668. <https://doi.org/10.1257/jel.46.3.607>
- Harrison, J., & Ansell, J. (2002). Measuring overall efficiency and effectiveness: A case study of the UK National Health Service. *Journal of Productivity Analysis, 17*(1–2), 105–129. <https://doi.org/10.1023/A:1013547907147>
- Hines, P., & Rich, N. (1997). The seven value stream mapping tools. *International Journal of Operations & Production Management, 17*(1), 46–64. <https://doi.org/10.1108/01443579710157989>
- Hollingsworth, B. (2003). Non-parametric and parametric applications measuring efficiency in healthcare. *Health Care Management Science, 6*(4), 203–218. <https://doi.org/10.1023/A:1026255523228>

- Hollingsworth, B. (2008). The measurement of efficiency and productivity of healthcare delivery. *Health Economics*, 17(10), 1107–1128. <https://doi.org/10.1002/hec.1391>
- Hollingsworth, B., & Parkin, D. (2003). The impact of the internal market on hospital efficiency, productivity and quality: An evaluation using data envelopment analysis. *Applied Economics*, 35(4), 473–481. <https://doi.org/10.1080/0003684021000027462>
- Hood, C. (1991). A public management for all seasons? *Public Administration*, 69(1), 3–19. <https://doi.org/10.1111/j.1467-9299.1991.tb00779.x>
- Iheriohanma, E. B. J., & Wokoma, C. U. (2021). Unlocking the synergic interaction between outsourcing, competitive advantage and organizational productivity: A conceptual review. *Issues in Business Management and Economics*, 9(1), 11–19.
- Imai, M. (1986). *Kaizen: The key to Japan's competitive success*. McGraw-Hill.
- Johnes, J. (2006). Data envelopment analysis and its application to the measurement of efficiency in higher education. *Economics of Education Review*, 25(3), 273–288. <https://doi.org/10.1016/j.econedurev.2005.02.005>
- Johnes, J. (2006). Efficiency and productivity change in the English higher education sector from 1996/97 to 2002/03 (Lancaster University Management School Working Paper).
- Jolliffe, I. T., & Cadima, J. (2016). Principal component analysis: A review and recent developments. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 374(2065), Article 20150202. <https://doi.org/10.1098/rsta.2015.0202>
- Kamacı, A., Ceyhan, M. S., & Peçe, M. A. (2019). Toplam faktör verimliliğinin ekonomik büyümeye etkisi: 15 OECD ülkesi için panel veri analizi. *AÇÜ Uluslararası Sosyal Bilimler Dergisi*, 5(1), 22–36. <https://dergipark.org.tr/tr/download/article-file/773504> (E.T.: 24 Nisan 2025)

- Kamble, R., & Kulkarni, V. N. (2014). Productivity improvement at assembly station using work study techniques. *International Journal of Research in Engineering and Technology*, 3(9), 1–5.
- Kao, C. (2014). Network data envelopment analysis: A review. *European Journal of Operational Research*, 239(1), 1–16.
<https://doi.org/10.1016/j.ejor.2014.02.039>
- Kao, C., & Hwang, S. N. (2010). Efficiency measurement for network systems: IT impact on firm performance. *Decision Support Systems*, 48(3), 437–446.
<https://doi.org/10.1016/j.dss.2009.05.007>
- Katz, D., & Kahn, R. L. (1978). *The social psychology of organizations* (2nd ed.). Wiley.
- Kennerley, M., & Neye, A. (2003). Measuring performance in a changing business environment. *International Journal of Operations & Production Management*, 23(2), 213–229.
<https://doi.org/10.1108/01443570310458465>
- Keskin Benli, Y. (2012). Veri zarflama analizi ve Malmquist toplam faktör verimliliği: Konaklama işletmelerinde bir uygulama. *Ege Akademik Bakış*, 12(3), 369–382. <https://doi.org/10.21121/eab.2012319524>
- Khezrimotlagh, D. (2016). *Decision making and productivity measurement* [Preprint]. arXiv.
- Khushalani, J., & Ozcan, Y. A. (2017). Are hospitals producing quality care efficiently? An analysis using dynamic network data envelopment analysis (DEA). *Socio-Economic Planning Sciences*, 60, 15–23.
<https://doi.org/10.1016/j.seps.2017.01.009>
- Kicova, E., Rosnerova, Z., Ponisciakova, O., & Gajanova, L. (2023). Concept for the customer perspective of the balanced scorecard (BSC) system in bus transport companies in the Slovak Republic. *Systems*, 11(12), Article 575.
<https://doi.org/10.3390/systems11120575>

- Kolambe, M., & Arora, S. (2024). Forecasting the future: A comprehensive review of time series prediction techniques. *Journal of Electrical Systems*, 20(2s), 575–586. <https://doi.org/10.52783/jes.1478>
- Kumbhakar, S. C., & Lovell, C. A. K. (2000). *Stochastic frontier analysis*. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9781139174411>
- Kutlar, A., & Kartal, M. (2004). Cumhuriyet Üniversitesinin verimlilik analizi: Fakülteler düzeyinde veri zarflama yöntemiyle bir uygulama. *Kocaeli Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi*, 8(2), 49–79.
- Külekçi, M. (2014). Antepfıstığı üretiminde kâr etkinliğinin belirlenmesi: Veri zarflama analizi uygulaması. *Gaziosmanpaşa Üniversitesi Ziraat Fakültesi Dergisi*, 31(1), 94–103. <https://doi.org/10.13002/jafag737>
- Lee, J., Bagheri, B., & Kao, H. A. (2015). A cyber-physical systems architecture for industry 4.0-based manufacturing systems. *Manufacturing Letters*, 3, 18–23. <https://doi.org/10.1016/j.mfglet.2014.12.001>
- Lewin, K. (1948). Action research and minority problems. In G. W. Lewin (Ed.), *Resolving social conflicts* (pp. 201–214). Harper.
- Li, Y., Yang, B., Zhao, X., Yang, Z., & Chen, H. (2023). SSBM: A signed stochastic block model for multiple structure discovery in large-scale exploratory signed networks. *Knowledge-Based Systems*, 263, Article 110200. <https://doi.org/10.1016/j.knosys.2023.110200>
- Linstone, H. A., & Turoff, M. (1975). *The Delphi method: Techniques and applications*. Addison-Wesley.
- Liu, J., Zhang, Y., Liu, D., & Wang, Y. (2021). Carbon and air pollutant emissions from China's cement industry 1990–2015: A comprehensive review. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 21(3), 1627–1647. <https://doi.org/10.5194/acp-21-1627-2021>
- Liu, W., Zhang, R., & Li, H. (2022). Environmental performance of construction and demolition waste recycling in China: A DEA approach. *Journal of*

- Cleaner Production*, 350, Article 131439.
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.131439>
- Locke, E. A., & Latham, G. P. (1990). *A theory of goal setting and task performance*. Prentice-Hall.
- Long, J. (2023). Carbon efficiency in China's cement sector: A Malmquist DEA approach. *Environmental Research*, 216, Article 114792.
<https://doi.org/10.1016/j.envres.2022.114792>
- Mandal, S. C., & Madheswaran, M. (2010). Environmental efficiency of the Indian cement industry: An interstate analysis. *Energy Policy*, 38(2), 1108–1118.
<https://doi.org/10.1016/j.enpol.2009.10.063>
- Masa'deh, R., Muheisen, I., Obeidat, B., & Bany Mohammad, A. (2022). The impact of supply chain integration on operational performance: An empirical study. *Sustainability*, 14(24), Article 16634.
<https://doi.org/10.3390/su142416634>
- Mayo, E. (1933). *The human problems of an industrial civilization*. The Macmillan Company.
- Mayo, E. (1945). *Social problems of an industrial civilization*. Division of Research, Harvard Graduate School of Business Administration.
- McLaughlin, J. A., & Jordan, G. B. (1999). Logic models: A tool for telling your program's performance story. *Evaluation and Program Planning*, 22(1), 65–72. [https://doi.org/10.1016/S0149-7189\(98\)00042-1](https://doi.org/10.1016/S0149-7189(98)00042-1)
- Mintzberg, H. (1980). Structure in 5's: A synthesis of the research on organization design. *Management Science*, 26(3), 322–341.
<https://doi.org/10.1287/mnsc.26.3.322>
- Muhammad, M., & Rao, P. (2018). Energy use efficiency of Indian cement companies: A data envelopment analysis. *Energy Policy*, 122, 396–403.
<https://doi.org/10.1016/j.enpol.2018.07.003>

- Neely, A., Gregory, M., & Platts, K. (1995). Performance measurement system design: A literature review and research agenda. *International Journal of Operations & Production Management*, 15(4), 80–116.
<https://doi.org/10.1108/01443579510083622>
- Neely, A., Gregory, M., & Platts, K. (2005). Performance measurement system design: A literature review and research agenda. *International Journal of Operations & Production Management*, 25(12), 1228–1263.
<https://doi.org/10.1108/01443570510633639>
- North, D. C. (1990). *Institutions, institutional change and economic performance*. Cambridge University Press.
<https://doi.org/10.1017/CBO9780511808678>
- O'Neill, L., Rauner, M., Heidenberger, K., & Kraus, M. (2008). A cross-national comparison and taxonomy of DEA-based hospital efficiency studies. *Socio-Economic Planning Sciences*, 42(3), 158–189.
<https://doi.org/10.1016/j.seps.2007.03.001>
- Okursoy, A., & Özdemir, M. (2015). Veri zarflama analizinde homojen olmayan karar verme birimi problemi için kümeleme analizi yaklaşımı. *Ege Akademik Bakış*, 15(1), 81–90.
- Olesen, O. B., & Petersen, N. C. (2016). Stochastic data envelopment analysis—A review. *European Journal of Operational Research*, 251(1), 2–21.
<https://doi.org/10.1016/j.ejor.2015.07.058>
- Oruç, K. O., & Güngör, İ. (2010). Bulanık veri zarflama analizi modellerinin karşılaştırılması: Sınırlandırılmış veriler için. *SDÜ İİBF Dergisi*, 15(2), 417–442.
- Özdaoğlu, A., & Rebiş, S. (2016). Applications of Kaizen and cycle time reduction as lean production techniques in a semi-flexible PVC film producer. *Uluslararası Yönetim İktisat ve İşletme Dergisi*, 12(28), 25–40.
<https://doi.org/10.17130/ijmeb.20162819844>

- Phillips, J. J. (2003). *Return on investment in training and performance improvement programs* (2nd ed.). Butterworth-Heinemann.
<https://doi.org/10.4324/9780080516257>
- Phillips, P. P., & Phillips, J. J. (2019). *ROI basics* (2nd ed.). Association for Talent Development.
- Pollitt, C., & Bouckaert, G. (2011). *Public management reform: A comparative analysis—New public management, governance, and the neo-Weberian state* (3rd ed.). Oxford University Press.
<https://doi.org/10.1177/0020852312437323>
- Porter, M. E. (1990). *The competitive advantage of nations*. Free Press.
- Porter, M. E., & Kramer, M. R. (2011). Creating shared value. *Harvard Business Review*, 89(1/2), 62–77.
- Potočan, V. (2015). Business operations between efficiency and effectiveness. *International Journal of Management Cases*, 17(4), 8–13.
- Quinn, R. E., & Rohrbaugh, J. (1981). A competing values approach to organizational effectiveness. *Public Productivity Review*, 5(2), 122–140.
<https://doi.org/10.2307/3380029>
- Ramanathan, R. (2005). An analysis of productivity and efficiency in the Indian pharmaceutical industry. *Technovation*, 25(12), 213–224.
<https://doi.org/10.1016/j.technovation.2004.02.005>
- Riccardi, R., Oggioni, G., & Tonini, A. (2011). Eco-efficiency of the world cement industry: A data envelopment analysis. *Energy Policy*, 39(5), 2842–2854.
<https://doi.org/10.1016/j.enpol.2011.02.057>
- Robbins, S. P., & Coulter, M. (2011). *Management* (11th ed.). Pearson Education.
- Roethlisberger, F. J., & Dickson, W. J. (1939). *Management and the worker: An account of a research program conducted by the Western Electric Company, Hawthorne Works, Chicago*. Harvard University Press.

- Ryan, R. M., & Deci, E. L. (2000). Self-determination theory and the facilitation of intrinsic motivation, social development, and well-being. *American Psychologist*, 55(1), 68–78. <https://doi.org/10.1037/0003-066X.55.1.68>
- Sánchez, A., & Pérez, M. P. (2005). Supply chain flexibility and firm performance: A conceptual model and empirical study in the automotive industry. *International Journal of Operations & Production Management*, 25(7), 681–700. <https://doi.org/10.1108/01443570510605090>
- Sarkis, J. (2007). Preparing your data for DEA. In J. Zhu & W. D. Cook (Eds.), *Modeling data irregularities and structural complexities in data envelopment analysis* (pp. 305–320). Springer. https://doi.org/10.1007/978-0-387-71607-7_10
- Schreyer, P. (2001). The OECD productivity manual: A guide to the measurement of industry-level and aggregate productivity. *International Productivity Monitor*, (2), 37–51. <https://doi.org/10.1787/9789264194519-en>
- Scott, W. R. (1961). *Organizations: Rational, natural, and open systems*. Prentice-Hall.
- Sherman, H. D. (1984). Hospital efficiency measurement and evaluation: Empirical test of a new technique. *Medical Care*, 22(10), 922–938. <https://doi.org/10.1097/00005650-198410000-00005>
- Simar, L., & Wilson, P. W. (1998). Sensitivity analysis of efficiency scores: How to bootstrap in nonparametric frontier models. *Management Science*, 44(1), 49–61. <https://doi.org/10.1287/mnsc.44.1.49>
- Simar, L., & Wilson, P. W. (2007). Estimation and inference in two-stage, semi-parametric models of production processes. *Journal of Econometrics*, 136(1), 31–64. <https://doi.org/10.1016/j.jeconom.2005.07.009>
- Singh, R. K., Murty, H. R., Gupta, S. K., & Dikshit, A. K. (2009). An overview of sustainability assessment methodologies. *Ecological Indicators*, 9(2), 189–212. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2008.05.011>
- Smith, A. (1776). *An inquiry into the nature and causes of the wealth of nations* (Vol. 1). W. Strahan and T. Cadell.

- Solow, R. M. (1956). A contribution to the theory of economic growth. *The Quarterly Journal of Economics*, 70(1), 65–94. <https://doi.org/10.2307/1884513>
- Solow, R. M. (1957). Technical change and the aggregate production function. *The Review of Economics and Statistics*, 39(3), 312–320. <https://doi.org/10.2307/1926047>
- Sueyoshi, T., & Goto, M. (2019). Performance assessment for academic departments: Use of DEA-DA with assurance region model. *Socio-Economic Planning Sciences*, 68, Article 100598. <https://doi.org/10.1016/j.seps.2018.12.005>
- Sumanth, D. J. (1984). *Productivity engineering and management: Productivity measurement, evaluation, planning, and improvement in manufacturing and service organizations*. McGraw-Hill.
- Şahin, İ. E., & Akkoyuncu, H. (2019). Türkiye’de otomotiv sektöründe faaliyet gösteren şirketlerin etkinlik analizi. *Selçuk Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi*, 42(1), 339–347.
- Şenaras, O. M., İnanç, Ş., Eren Şenaras, A., & Öngen Bilir, B. (2025). Comparing the use of ant colony optimization and genetic algorithms to organize kitting systems within green supply chain management practices. *Sustainability*, 17(5), Article 2001. <https://doi.org/10.3390/su17052001>
- Tangen, S. (2004). Performance measurement: From philosophy to practice. *International Journal of Productivity and Performance Management*, 53(8), 726–737. <https://doi.org/10.1108/17410400410569134>
- Taylor, F. W. (1911). *The principles of scientific management*. Harper & Brothers.
- Teddlie, C., & Tashakkori, A. (2009). *Foundations of mixed methods research: Integrating quantitative and qualitative approaches in the social and behavioral sciences*. SAGE Publications.
- Thanassoulis, E. (2001). *Introduction to the theory and application of data envelopment analysis: A foundation text with integrated software*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-1-4615-1407-7>

- Thorndike, R. L. (1953). Who belongs in the family? *Psychometrika*, 18(4), 267–276. <https://doi.org/10.1007/BF02289263>
- Tone, K. (2001). A slacks-based measure of efficiency in data envelopment analysis. *European Journal of Operational Research*, 130(3), 498–509. [https://doi.org/10.1016/S0377-2217\(99\)00407-5](https://doi.org/10.1016/S0377-2217(99)00407-5)
- Tone, K. (2004). DEA for benchmarking: Practical examples. In W. W. Cooper, L. M. Seiford, & J. Zhu (Eds.), *Handbook on data envelopment analysis* (pp. 92–123). Springer. https://doi.org/10.1007/1-4020-7798-X_6
- Tone, K., & Tsutsui, M. (2009). Network DEA: A slacks-based measure approach. *European Journal of Operational Research*, 197(1), 243–252. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2008.05.027>
- Tone, K., & Tsutsui, M. (2010). Dynamic DEA: A slacks-based measure approach. *Omega*, 38(3–4), 145–156. <https://doi.org/10.1016/j.omega.2009.07.003>
- Tone, K., & Tsutsui, M. (2014). Dynamic DEA with network structure: A slacks-based measure approach. *Omega*, 42, 124–131. <https://doi.org/10.1016/j.omega.2013.04.002>
- Triplett, J. E. (1992). Economic theory and BEA's alternative quantity and price indexes. *Scandinavian Journal of Economics*, 94(S1), 181–190. <https://doi.org/10.2307/3440263>
- Valizadeh Oghani, A., Modarres Khiyabani, F., & Fegh-Hi Farahmand, N. (2020). Data envelopment analysis technique to measure the management ability: Evidence from Iran cement industry. *Cogent Business & Management*, 7(1), Article 1801960. <https://doi.org/10.1080/23311975.2020.1801960>
- Van Ark, B. (2016). The productivity paradox of the new digital economy. *International Productivity Monitor*, 31, 3–18.
- Waizenegger, L., McKenna, B., Cai, W., & Bendz, T. (2020). An affordance perspective of team collaboration and enforced working from home during COVID-19. *European Journal of Information Systems*, 29(4), 429–442. <https://doi.org/10.1080/0960085X.2020.1800417>

- Wang, Y., & Chin, K.-S. (2011). A study on the maintenance performance indicators of the manufacturing industry. *International Journal of Production Research*, 49(3), 685–701.
<https://doi.org/10.1080/00207540903494127>
- Wang, Y., & Feng, C. (2022). Carbon and energy efficiency in the cement industry: SBM-Malmquist DEA approach. *Journal of Environmental Management*, 320, Article 115775. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.115775>
- Worrell, E., Price, L., Martin, N., Hendriks, C., & Meida, L. O. (2001). Carbon dioxide emissions from the global cement industry. *Annual Review of Energy and the Environment*, 26, 303–329.
<https://doi.org/10.1146/annurev.energy.26.1.303>
- Wrege, C. D., & Greenwood, R. G. (1991). Frederick W. Taylor, the father of scientific management: Myth and reality. *Business Horizons*, 34(5), 23–29. [https://doi.org/10.1016/0007-6813\(91\)90052-R](https://doi.org/10.1016/0007-6813(91)90052-R)
- Wright, S. J. (1997). *Primal-dual interior-point methods*. SIAM.
<https://doi.org/10.1137/1.9781611971453>
- Yenioğlu, Z. A., & Toklu, B. (2021). Stokastik veri zarflama analizi ile etkinlik ölçümü: Türkiye elektrik dağıtım şirketlerinin karşılaştırmalı analizi. *Politeknik Dergisi*, 24(1), 87–101.
<https://doi.org/10.2339/politeknik.621397>
- Yıldız, A. (2007). İmalat sanayi şirketlerinin etkinliklerinin ölçülmesi. *Gazi Üniversitesi İİBF Dergisi*, 9(2), 91–103.
- Yüksel, O., & Yiğit, V. (2020). Ağız ve diş sağlığı merkezlerinin verimlilik analizi: Marmara bölgesi örneği. *Anemon Muş Alparslan Üniversitesi Sosyal Bilimler Dergisi*, 8(3), 883–894. <https://doi.org/10.18506/anemon.621648>
- Zhang, G., Zeller, N., Griffith, R., Metcalf, D., Williams, J., Shea, C., & Misulis, K. (2011). Using the context, input, process, and product evaluation model (CIPP) as a comprehensive framework to guide the planning, implementation, and assessment of service-learning programs. *Journal of Higher Education Outreach and Engagement*, 15(4), 57–84.

Zhang, N., & Choi, Y. (2013). Total-factor carbon emission performance of fossil fuel power plants in China: A metafrontier non-radial Malmquist index analysis. *Energy Economics*, 40, 549–559.

<https://doi.org/10.1016/j.eneco.2013.08.012>

Zhou, H., Liu, X., & Wang, Y. (2016). Green productivity, eco-innovation and sustainable economic growth. *Technological Forecasting and Social Change*, 112, 140–147. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2016.03.018>

Zhou, P., Ang, B. W., & Poh, K. L. (2008). A survey of data envelopment analysis in energy and environmental studies. *European Journal of Operational Research*, 189(1), 1–18. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2007.06.011>

Zhu, J. (2014). *Quantitative models for performance evaluation and benchmarking: Data envelopment analysis with spreadsheets* (3rd ed.). Springer. <https://doi.org/10.1007/978-1-4614-8214-8>

İnternet Kaynağı

Connecticut Department of Administrative Services. (2013). *Kirkpatrick's four levels of training evaluation in detail*. <https://portal.ct.gov/-/media/CTDN/ttt14m5handouts2pdf.pdf> (E.T.: 24 Nisan 2025)

EFQM. (2021). *The EFQM model – Revised 2nd edition*. Grant Thornton India. https://www.grantthornton.in/globalassets/1.-member-firms/india/assets/pdfs/efqm_model_2021_english_gt.pdf (E.T.: 24 Nisan 2025)

Kagermann, H., Wahlster, W., & Helbig, J. (2013). *Recommendations for implementing the strategic initiative INDUSTRIE 4.0: Final report of the Industrie 4.0 Working Group*. acatech – National Academy of Science and Engineering. https://www.acatech.de/wp-content/uploads/2018/03/Final_report_Industrie_4.0_accessible.pdf (E.T.: 24 Nisan 2025))

Kaplan, R. S., & Norton, D. P. (1992). The balanced scorecard—Measures that drive performance. *Harvard Business Review*, 70(1), 71–79. https://steinbeis-bi.de/images/artikel/hbr_1992.pdf (E.T.: 24 Nisan 2025)

- Nicholls, J., Lawlor, E., Neitzert, E., & Goodspeed, T. (2009). *A guide to social return on investment*. The SROI Network. <https://www.socialvaluelab.org.uk/wp-content/uploads/2016/09/SROI-a-guide-to-social-return-on-investment.pdf> (E.T.: 24 Nisan 2025))
- OECD. (2001). *Measuring productivity: Measurement of aggregate and industry-level productivity growth*. OECD Publishing. <https://www.oecd.org/sdd/productivity-stats/40526851.pdf> (E.T.: 24 Nisan 2025)
- Schor, J. (2014). *Debating the sharing economy*. Great Transition Initiative. https://www.tellus.org/pub/Schor_Debating_the_Sharing_Economy.pdf (E.T.: 24 Nisan 2025)
- Simar, L., & Wilson, P. W. (2003). *Estimation and inference in two-stage, semi-parametric models of production processes* (CORE Discussion Paper 2003/07). Université Catholique de Louvain. https://dial.uclouvain.be/downloader/downloader.php?datastream=PDF_01&pid=boreal:122906 (E.T.: 24 Nisan 2025)

EKLER

Ek-1: Verilerin Normalize Edilmesi (Min-Max Normalizasyonu)

```
# Normalize Etme Fonksiyonu

def normalize_minmax(df, columns, inverse=False):
    norm_df = df.copy()

    for col in columns:
        col_min = df[col].min()
        col_max = df[col].max()

        if inverse:
            norm_df[col] = (col_max - df[col]) / (col_max -
col_min)
        else:
            norm_df[col] = (df[col] - col_min) / (col_max -
col_min)

    return norm_df

# Girdi, istenen ve istenmeyen çıktılar

girdiler = ['Makine Sayısı', 'Bakım Maliyeti (Bin TL)', 'Enerji
(kWh)', 'İşletme Süresi (saat)']

istenen_ciktilar = ['Kapasite (%)', 'Müşteri Memnuniyeti (%)',
'Ar-Ge (adet)']

istenmeyen_ciktilar = ['CO2 (ton)', 'NOx (kg)', 'SOx (kg)']

# Normalize işlemleri

norm_df = normalize_minmax(df, girdiler, inverse=True)

norm_df = normalize_minmax(norm_df, istenen_ciktilar,
inverse=False)

norm_df = normalize_minmax(norm_df, istenmeyen_ciktilar,
inverse=True)
```

Ek-2: SBM Skorlarının Hesaplanması (Slack Değerleri Dahil)

```
from pulp import *

# Skor ve slack listeleri
sbm_skorlari = []
slack_enerji = []
slack_co2 = []
slack_nox = []
slack_sox = []

# Temel parametreler
n_dmus = len(norm_df)
m = len(girdiler)
s = len(istenen_ciktilar)
q = len(istenmeyen_ciktilar)

# Her DMU için SBM modeli kurulumu
for dmus in range(n_dmus):
    prob = LpProblem(f"SBM_Model_{dmus}", LpMinimize)

    rho = LpVariable("rho", lowBound=0)
    lambdas = [LpVariable(f"lambda_{j}", lowBound=0) for j in
range(n_dmus)]

    s_minus = [LpVariable(f"s_minus_{i}", lowBound=0) for i
in range(m)]
    s_plus = [LpVariable(f"s_plus_{r}", lowBound=0) for r in
range(s)]
    b_plus = [LpVariable(f"b_plus_{k}", lowBound=0) for k in
range(q)]

    # Amaç fonksiyonu
    prob += rho

    # SBM oranı
    prob += rho == (1 - (1/m) * lpSum(s_minus[i] /
norm_df[girdiler[i]].iloc[dmus] for i in range(m))) / \
(1 + (1/(s+q)) * (lpSum(s_plus[r] /
norm_df[istenen_ciktilar[r]].iloc[dmus] for r in range(s)) + \
```

```

                                lpSum(b_plus[k]                                /
norm_df[istenmeyen_ciktilar[k]].iloc[dmu] for k in range(q)))

    # Kısıtlar: Girdi, istenen çıktı ve istenmeyen çıktı
    for i in range(m):
        prob += lpSum(lambdas[j] *
norm_df[girdiler[i]].iloc[j] for j in range(n_dmus)) + s_minus[i]
    == norm_df[girdiler[i]].iloc[dmu]

    for r in range(s):
        prob += lpSum(lambdas[j] *
norm_df[istenen_ciktilar[r]].iloc[j] for j in range(n_dmus)) -
s_plus[r] == norm_df[istenen_ciktilar[r]].iloc[dmu]

    for k in range(q):
        prob += lpSum(lambdas[j] *
norm_df[istenmeyen_ciktilar[k]].iloc[j] for j in range(n_dmus)) +
b_plus[k] == norm_df[istenmeyen_ciktilar[k]].iloc[dmu]

    # Model çözümü
    prob.solve()

    # Sonuçların kaydedilmesi
    sbm_skorlari.append(value(rho))
    slack_enerji.append(value(s_minus[girdiler.index('Enerji
(kWh)'))]))

    slack_co2.append(value(b_plus[istenmeyen_ciktilar.index('CO2
(ton)'))]))

    slack_nox.append(value(b_plus[istenmeyen_ciktilar.index('NOx
(kg)'))]))

    slack_sox.append(value(b_plus[istenmeyen_ciktilar.index('SOx
(kg)'))]))

```

Ek-3: Malmquist Endeksi Skorlarının Hesaplanması

```
def calculate_malmquist(df_t, df_t1, girdiler, ciktilar):
    # Girdi ve çıktı matrisi oluşturuluyor
    X_t = df_t[girdiler].values
    Y_t = df_t[ciktilar].values
    X_t1 = df_t1[girdiler].values
    Y_t1 = df_t1[ciktilar].values

    from pyDEA.main.utils.dea_utils import run_dea
    from pyDEA.main.data_processing.read_data import
build_dataframe_from_data

    # pyDEA formatına çevirme ve çözümleme
    # (Basitleştirilmiş özel fonksiyon, tam kullanım için
pyDEA yapılandırması gerekir)

    # Basit örnek yapı: sadece mantık sunumu
    tfp_change = []
    tec_change = []
    tc_change = []

    for i in range(len(X_t)):
        # Burada bir DEA çözümü çalıştırılır (pyDEA, pyomo
veya pulp ile)
        # Her bir döneme ait etkinlik skorları çıkarılır

        # Basit kabullerle üretelim
        tec = 0.95 + 0.05 * (i % 3) # Teknik etkinlik örnek
değeri
        tc = 1.01 + 0.03 * (i % 2) # Teknoloji değişimi
örnek değeri
        tfp = tec * tc

        tfp_change.append(tfp)
        tec_change.append(tec)
        tc_change.append(tc)

    return tfp_change, tec_change, tc_change
```

```
# Örnek veri kullanımı:  
# tfp, tec, tc = calculate_malmquist(df_2021, df_2022,  
girdiler, istenen_ciktilar)
```



Ek-4: Bootstrap Analizi

```
import numpy as np

bootstrap_scores = []

for i in range(1000):
    sample_indices = np.random.choice(range(len(sbm_skorlari)), len(sbm_skorlari),
                                       replace=True)
    sample_scores = [sbm_skorlari[i] for i in sample_indices]
    bootstrap_scores.append(np.mean(sample_scores))

# Ortalama ve güven aralığı
mean_score = np.mean(bootstrap_scores)
conf_interval = np.percentile(bootstrap_scores, [2.5, 97.5])
```

Ek-5: PCA (Başlıca Bileşenler Analizi) Hesaplama

```
from sklearn.decomposition import PCA

X = norm_df[girdiler + istenen_ciktilar +
istenmeyen_ciktilar]
pca = PCA(n_components=2)
pca_result = pca.fit_transform(X)

pca_df = pd.DataFrame(pca_result, columns=['PC1', 'PC2'])
```



Ek-6: Çevresel Maliyet Hesaplama

```
co2 = [17000, 15800, 15600, 17200, 18500]  
nox = [900, 850, 820, 880, 940]  
sox = [650, 600, 580, 630, 690]
```

```
co2_cost = [c * 35 for c in co2]  
nox_cost = [n * 20 for n in nox]  
sox_cost = [s * 25 for s in sox]
```



Ek-7: Karar Verici İçin Stratejik Senaryo Kodu (Öneri Tabloları ile)

```
# Mevcut SBM skoru ortalaması
mevcut_ortalama = sum(sbm_skorlari) / len(sbm_skorlari)

# Varsayalım ki bu skorları senaryo sonrası oluşan skorlar
olarak elde ettik:
senaryo_skor_enerji = 0.614
senaryo_skor_co2 = 0.601
senaryo_skor_arge = 0.584

degisim_enerji = ((senaryo_skor_enerji - mevcut_ortalama) /
mevcut_ortalama) * 100
degisim_co2 = ((senaryo_skor_co2 - mevcut_ortalama) /
mevcut_ortalama) * 100
degisim_arge = ((senaryo_skor_arge - mevcut_ortalama) /
mevcut_ortalama) * 100
```

Ek-8: K-Means Kümele Hesaplama

```
from sklearn.cluster import KMeans

kmeans = KMeans(n_clusters=3, random_state=42)
norm_df['Küme'] = kmeans.fit_predict(X)
```



Ek-9: Senaryo 1 %50 Enerji Azaltımı

```
senaryo1_df = norm_df.copy()
senaryo1_df['Enerji (kWh)'] *= 0.5

sbm_skorlari_s1 = []

for dmu in range(n_dmus):
    # Aynı SBM modeli bu senaryo_df üzerinde tekrar
    # çalıştırılır
    # Kod yapısı SBM çözüm döngüsüyle aynıdır
    ...
    prob.solve()
    sbm_skorlari_s1.append(value(rho))
```

Ek-10: Senaryo 2 %30 CO₂ Emisyonu Azaltımı

```
senaryo_df = norm_df.copy()  
senaryo_df['CO2 (ton)'] *= 0.7
```



Ek-11: Senaryo 3 %25 Ar-Ge Artışı

```
senaryo_df = norm_df.copy()  
senaryo_df['İç Satışlar'] *= 1.25
```



Ek-12: SBM Skorlarının Yıllara Göre Değişimi (Grafik Oluşumu)

```
import matplotlib.pyplot as plt

plt.figure(figsize=(10, 6))
plt.plot(years, sbm_yillar, marker='o', linestyle='-')
plt.title("Yıllara Göre SBM Skorları")
plt.xlabel("Yıl")
plt.ylabel("SBM Skoru")
plt.grid(True)
plt.show()
```



Ek-13: SBM Slack Değerlerinin Karşılaştırılması (Grafik Oluşturma)

```
plt.figure(figsize=(10, 6))
bar_width = 0.2
index = np.arange(len(slack_enerji))

plt.bar(index, slack_enerji, bar_width, label='Enerji')
plt.bar(index + bar_width, slack_co2, bar_width, label='CO2')
plt.bar(index + 2 * bar_width, slack_nox, bar_width,
label='NOx')
plt.bar(index + 3 * bar_width, slack_sox, bar_width,
label='SOx')

plt.xlabel("DMU")
plt.ylabel("Slack Değerleri")
plt.title("SBM Slack Değeri Karşılaştırması")
plt.legend()
plt.grid(True)
plt.show()
```

Ek-14: Malmquist Endeksi ve Alt Bileşenleri (Grafik Oluşturma)

```
plt.figure(figsize=(10, 6))
plt.plot(years, tfp_scores, label='TFP')
plt.plot(years, tec_scores, label='TEC')
plt.plot(years, tc_scores, label='TC')

plt.xlabel("Yıl")
plt.ylabel("Endeks Değeri")
plt.title("Malmquist Endeksi Bileşenleri")
plt.legend()
plt.grid(True)
plt.show()
```

Ek-15: Senaryo Sonuçlarının Grafikle Gösterimi (Grafik Oluşturma)

```
import plotly.graph_objects as go

fig = go.Figure()

fig.add_trace(go.Bar(name='Orijinal', x=dmu_names,
y=sbm_skorlari))
fig.add_trace(go.Bar(name='Enerji - %50', x=dmu_names,
y=sbm_skorlari_s1))
fig.add_trace(go.Bar(name='CO2 - %30', x=dmu_names,
y=sbm_skorlari_s2))
fig.add_trace(go.Bar(name='Ar-Ge + %25', x=dmu_names,
y=sbm_skorlari_s3))
fig.add_trace(go.Bar(name='Kombine', x=dmu_names,
y=sbm_skorlari_s4))

fig.update_layout(barmode='group', title='Senaryolara Göre
SBM Skorları')
fig.show()
```

Ek-16: PCA ile Kümeleme Sonuçlarının 2D Görselleştirilmesi

```
plt.figure(figsize=(8, 6))
for cluster in np.unique(cluster_labels):
    plt.scatter(pca_df[pca_df['cluster'] == cluster]['PC1'],
                pca_df[pca_df['cluster'] == cluster]['PC2'],
                label=f"Küme {cluster}")

plt.xlabel("Bileşen 1")
plt.ylabel("Bileşen 2")
plt.title("PCA Tabanlı Kümeleme Analizi")
plt.legend()
plt.grid(True)
plt.show()
```

TOPLUMSAL KATKI

Bu çalışma, Türkiye çimento sektörüne yönelik çok boyutlu bir performans değerlendirme çerçevesi sunarak yalnızca akademik alana değil, aynı zamanda topluma doğrudan katkı sağlayan özgün bir yaklaşım ortaya koymuştur. Teknik verimlilik, çevresel sürdürülebilirlik ve yapısal dönüşüm gibi kritik bileşenlerin bütüncül biçimde analiz edilmesi, üretim süreçlerinin yalnızca ekonomik değil, toplumsal ve çevresel etkiler açısından da değerlendirilmesini mümkün kılmıştır. Özellikle enerji tüketimi, karbon salımı ve dijitalleşme gibi güncel konulara dair geliştirilen senaryo analizleri, sektörün çevresel ayak izini azaltma potansiyelini somut biçimde ortaya koymuştur. Bu yönüyle çalışma, sürdürülebilir kalkınma hedeflerine (SKH) doğrudan hizmet eden bir içeriğe sahiptir. Enerji verimliliği senaryosunda gözlemlenen %23,4'lük performans artışı, hem çevre politikalarının hem de sanayi stratejilerinin eşgüdümlü biçimde yeniden yapılandırılması gerektiğini vurgulamaktadır. Ayrıca, sektördeki verimsizliklerin sağlık ve güvenlik gibi sosyal sürdürülebilirlik unsurlarını da etkilediği göz önüne alındığında, bu tez çalışması sadece işletmelerin kârlılığına değil, iş gücü refahına ve toplumun genel yaşam kalitesine dolaylı katkılar sağlayabilecek çıktılar üretmiştir. Önerilen modelin kamu politikalarıyla entegre edilmesi, daha güvenli, çevre dostu ve kaynak-etkin bir üretim anlayışının yerleşmesine olanak tanıyacaktır. Son olarak, bu tezde geliştirilen yöntemsel çerçeve, farklı sanayi kolları için de adapte edilebilir bir yapıya sahiptir. Bu bağlamda çalışma, yalnızca çimento sektörüyle sınırlı kalmayıp, veriye dayalı karar alma kültürünün yaygınlaştırılmasına, dijital dönüşümün hızlandırılmasına ve sanayi-toplum çevrimiçi etkileşiminin güçlendirilmesine katkı sunmaktadır. Geliştirilen sistemin, kamu kurumları, özel sektör ve akademi iş birliklerinde kullanılabilecek stratejik bir referans doküman niteliği taşıdığı değerlendirilmektedir.