KSÜ Tarım ve Doğa Derg 29 (Ek Sayı 1), 194-210, 2026
KSU J. Agric Nat 29 (Suppl 1), 194-210, 2026
https://doi.org/10.18016/ksutarimdoga.vi.1639198

OECD Ülkelerinin Sürdürülebilir Tarımsal Etkinliğinin SBM ve S-SBM Modelleri ile Değerlendirilmesi

Melike Kübra EKİZ BOZDEMİR[1✉], Selen AVCI AZKESKİN[2]
[1]Kocaeli Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü [2]Kocaeli Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, Kocaeli
[1]https://orcid.org/0000-0003-3340-0484, [2]https://orcid.org/0000-0001-7433-5696
✉: melike.ekiz@kocaeli.edu.tr

ÖZET

Küresel düzeyde artan nüfus, tarımsal üretimde kapasite artışını zorunlu kılarak yoğun tarım uygulamalarını ön plana çıkarmıştır. Ancak, yoğun üretimde kullanılan kimyasal girdiler ve buna bağlı yüksek sera gazı emisyonları, çevresel sürdürülebilirliği tehdit eden önemli sorunlara yol açmaktadır. Bu durum, üretim miktarının yanı sıra doğal kaynakların korunmasını ve insan sağlığını gözeten sürdürülebilir tarım yaklaşımlarının önemini artırmıştır. Çalışmanın amacı, 32 OECD (Organisation for Economic Co-operation and Development) ülkesinin 2018–2021 dönemindeki sürdürülebilir tarımsal etkinliklerini değerlendirmektir. Analizde girdi olarak enerji, gübre, pestisit ve tarım alanı; çıktı olarak tarımsal üretim değeri; istenmeyen çıktı olarak ise sera gazı emisyonu dikkate alınmıştır. Sürdürülebilir tarım etkinliği, Veri Zarflama Analizi (VZA) çerçevesinde istenmeyen çıktıları modele doğrudan entegre edebilen Gevşeklik Tabanlı Ölçü (Slack-Based Measure – SBM) ve Süper Gevşeklik Tabanlı Ölçü (Super-SBM) modelleri kullanılarak ölçülmüştür. Bu modeller, gevşek değişkenleri amaç fonksiyonuna dahil ederek radyal modellerin dezavantajlarını ortadan kaldırmakta ve etkinlik ölçümünü daha hassas hale getirmektedir. 2018–2021 yıllarını kapsayan panel veri analizi sonuçları, Letonya (4.47), İsrail (4.44), Kosta Rika (2.65) ve Avustralya (1.92) gibi ülkelerin yüksek sürdürülebilir tarımsal etkinliğe sahip olduğunu göstermektedir. Buna karşılık; Polonya (0.25), Şili (0.30), Birleşik Krallık (0.32), Almanya (0.32), İrlanda (0.33) ve Portekiz (0.38) düşük etkinlik skorlar ile dikkat çekmekte, bu durum üretim süreçlerinde kaynak kullanımı ve istenmeyen çıktılara bağlı etkinlik kayıplarına işaret etmektedir.

Tarım Ekonomisi

Araştırma Makalesi

Makale Tarihçesi
Geliş Tarihi : 13.02.2025
Kabul Tarihi : 12.03.2026

Anahtar Kelimeler
Çevresel etkinlik
Sürdürülebilir tarım
Veri Zarflama Analizi (VZA)
SBM Model
Süper SBM Model

Evaluation of Sustainable Agricultural Efficiency in OECD Countries with SBM and S-SBM Models

ABSTRACT

The rapid increase in the global population has necessitated a rise in agricultural production capacity, bringing intensive farming practices to the forefront. However, the extensive use of chemical inputs and the resulting high levels of greenhouse gas emissions in intensive production have created significant challenges that threaten environmental sustainability. Consequently, sustainable agricultural approaches that aim not only to increase production but also to protect natural resources and human health have become increasingly important. The aim of this study is to evaluate the sustainable agricultural efficiency of 32 OECD (Organisation for Economic Co-operation and Development) countries for the period 2018–2021. In the analysis, energy, fertilizers, pesticides, and agricultural land were considered as inputs; agricultural production value as the desirable output; and greenhouse gas emissions as the undesirable output. Sustainable agricultural efficiency was measured within the framework of Data Envelopment Analysis (DEA) using the Slack-

Agricultural Economy

Research Article

Article History
Received : 13.02.2025
Accepted : 12.03.2026

Keywords
Environmental efficiency
Sustainable agriculture
Data Envelopment Analysis (DEA)
SBM Model
Super SBM Model

Based Measure (SBM) and Super-Slack-Based Measure (Super-SBM) models, which are capable of directly integrating undesirable outputs into the model. These models overcome the disadvantages of radial models by incorporating slack variables into the objective function, thereby providing a more precise assessment of efficiency. The panel data analysis covering the years 2018–2021 reveals that countries such as Latvia (4.47), Israel (4.44), Costa Rica (2.65) and Australia (1.92) exhibit high levels of sustainable agricultural efficiency. In contrast, Poland (0.25), Chile (0.30), the United Kingdom (0.32), Germany (0.32) and Ireland (0.33) show relatively low efficiency scores, indicating productivity losses arising from imbalanced resource utilization and undesirable outputs in agricultural production processes.

Atıf İçin : Ekiz Bozdemir, M. K., & Avcı Azkeskin, S. (2026). OECD Ülkelerinin Sürdürülebilir Tarımsal Etkinliğinin SBM ve S-SBM Modelleri ile Değerlendirilmesi. *KSÜ Tarım ve Doğa Derg 29* (Ek Sayı 1), 194-210. https://doi.org/10.18016/ksutarimdoga.vi.1639198.

To Cite: Ekiz Bozdemir, M. K., & Avcı Azkeskin, S. (2026). Evaluation of Sustainable Agricultural Efficiency in OECD Countries with SBM And S-SBM Models. *KSU J. Agric Nat 29* (Suppl 1), 194-210. https://doi.org/10.18016/ksutarimdoga.vi.1639198

GİRİŞ

Sürdürülebilir kalkınma ve sürdürülebilirlik kavramları, 1987 yılında Dünya Çevre ve Kalkınma Komisyonu (WCED) tarafından yayımlanan raporla küresel gündeme taşınmıştır. Bu raporda çevresel sürdürülebilirlik, "insan toplumunun ihtiyaçlarını, ekosistemlerin bu ihtiyaçları karşılamak için kendilerini yenileme kapasitesini aşmadan karşılamasına izin veren bir denge, dayanıklılık ve birbirine bağlılık durumu" olarak tanımlanmıştır. Literatürde sürdürülebilir kalkınma yaklaşımı genel olarak ekonomik, çevresel ve sosyal olmak üzere üç temel boyutun dengeli biçimde ele alınmasını gerektiren bütüncül bir çerçeve olarak değerlendirilmektedir. Bununla birlikte, bu üç boyutlu uygulamada her zaman tam uyum içinde gerçekleşmeyebilmekte ve özellikle ekonomik üretkenliği artırmaya yönelik politikalar ile çevresel koruma hedefleri arasında çeşitli ödünleşimler ortaya çıkabilmektedir. Örneğin, üretim verimliliğini artırmak amacıyla kimyasal girdilerin ve enerji kullanımının yoğunlaştırılması kısa vadede ekonomik performansı desteklerken, uzun vadede çevresel baskıları artırabilmektedir. Bu nedenle sürdürülebilirlik yaklaşımı, ekonomik üretim hedefleri ile çevresel sınırlar arasındaki dengeyi gözeten bütüncül politika ve analiz araçlarının geliştirilmesini gerekli kılmaktadır. Nitekim Avrupa Birliği Ortak Tarım Politikası (CAP) 2013 reformu sonrasında sürdürülebilir gıda üretimi, doğal kaynakların verimli yönetimi, kırsal alanların dengeli gelişimi ve tarımsal biyolojik çeşitliliğin korunması gibi hedefleri öncelikli hale getirmiştir (Toma ve ark., 2017). Bu gelişmeler, sürdürülebilirlik kavramının çevresel koruma ile birlikte ekonomik ve toplumsal denge unsurlarını da kapsayan bütüncül bir yaklaşıma dönüştüğünü göstermektedir.

Sürdürülebilirlik kavramı, doğal kaynak kullanımıyla doğrudan ilişkili olan tarım sektörü açısından stratejik bir önem taşımaktadır. Bilindiği üzere, küresel ölçekte hızla artan nüfus, gıda talebinde de önemli bir artışa yol açmaktadır. Bu durum, tarımsal üretimde kapasite artışını zorunlu kılmakta ve yoğun tarım uygulamalarını kaçınılmaz hale getirmektedir (Aydın Eryılmaz & Kılıç, 2018). Yoğun tarım uygulamaları, birim alan başına üretkenliği artırma konusunda başarılı sonuçlar verse de yüksek enerji gereksinimi ve azot, fosfor ile pestisit gibi girdilerin aşırı kullanımı nedeniyle yüksek sera gazı emisyonu başta olmak üzere çeşitli çevresel sorunlara yol açmaktadır. Bu durum; biyolojik çeşitlilik kaybı, toprak bozulması ve ekosistem kirliliği gibi sürdürülebilirliği tehdit eden olumsuz sonuçlar doğurmaktadır (Toma ve ark., 2017; Ekiz ve Şakar, 2020).

Tarımda yoğun sera gazı emisyonu, çevre kirliliğine yol açmasının yanı sıra tarımsal üretkenliği ve sürdürülebilir gelişimi engellemesi bakımından da kritik bir sorundur. Başlıca tarımsal emisyon kaynakları arasında kimyasal gübre kullanımı, ilave sulama uygulamaları, tohum yatağı hazırlığı, toprak verimliliği yönetimi ve zararlılarla mücadele yer almaktadır (Sharma & Majumdar, 2021; Streimikis & Saraji, 2022). Bu tür uygulamalara olan bağımlılığın mevcut düzeyde sürmesi halinde, tatlı su kullanımı, arazi kullanım değişiklikleri, okyanus asitlenmesi ve fosfor döngüsüne müdahale gibi süreçlerde gezegen sınırlarına yaklaşılacağı öngörülmektedir. Hatta, iklim değişikliği, biyolojik çeşitlilik kaybı ve azot döngüsü açısından bu sınırların halihazırda aşıldığı belirtilmektedir (Repar ve ark., 2017). Söz konusu endişeler, enerji kaynaklarının sınırlılığı ve çevresel taşıma kapasitesinin aşılması gibi faktörlerle birlikte değerlendirildiğinde, uluslararası toplumun iklim değişikliğiyle mücadeleye yönelik çabalarını hızlandırmış ve sürdürülebilir tarımı her zamankinden daha önemli bir hale getirmiştir (Xu & Lin, 2017). Sürdürülebilir tarım; doğal ekosistemlerin dengesinin korunması, biyolojik

çeşitliliğin sürdürülmesi ve çevresel zararların en aza indirilmesi ilkeleri üzerine temellenmiş bir üretim modelidir (Gerdessen & Pascucci, 2013).

OECD (Organisation for Economic Co-operation and Development) ülkeleri, küresel ölçekte tarımsal üretim ve ticarette önemli bir paya sahip olup aynı zamanda sürdürülebilir kalkınma ve çevresel yönetim politikalarının uygulayıcı öncülerindendir. Bu ülkelerde tarım sektörü, hem yüksek mekanizasyon ve teknoloji kullanımı hem de kaynak verimliliğine yönelik çevresel düzenlemeler sayesinde üretkenlik ile sürdürülebilirlik dengesini sağlamaya çalışmaktadır. Son yıllarda, özellikle iklim değişikliğiyle mücadele, karbon azaltım hedefleri ve yeşil dönüşüm politikaları çerçevesinde, OECD ülkelerinde sürdürülebilir tarım uygulamaları stratejik bir öncelik haline gelmiştir (OECD, 2021). Bu durum, ülkeler arasındaki tarımsal etkinlik farklılıklarının hem ekonomik hem de çevresel boyutlarıyla birlikte değerlendirilmesini gerekli kılmaktadır.

Sürdürülebilir tarımın çok boyutlu yapısı, birden fazla girdi ve çıktının eşzamanlı olarak değerlendirilebildiği bütünleşik analiz araçlarını gerekli kılmaktadır. Veri Zarflama Analizi (VZA), bu özelliği sayesinde hem ekonomik hem de çevresel etkinliğin karşılaştırmalı olarak incelenmesinde yaygın biçimde kullanılan doğrusal programlama temelli bir yöntemdir. Bu çalışmada OECD ülkelerinin sürdürülebilir tarımsal etkinlikleri, VZA modellerinden sırasıyla etkin ve etkin olmayan karar verme birimlerini (KVB) istenmeyen çıktıyı dikkate alarak değerlendiren Gevşeklik Tabanlı Ölçü (Slack-Based Measure – SBM) ve Süper Gevşeklik Tabanlı Ölçü (Super-SBM) modelleriyle analiz edilmiştir.

Çalışmanın ikinci bölümünde konuya ilişkin güncel literatür incelenmiş, üçüncü bölümde ise araştırmada kullanılan veri seti ve yöntem ayrıntılı biçimde sunulmuştur. Dördüncü bölümde analiz sonuçları ve tartışmalar yer almakta, son bölümde ise elde edilen bulgular doğrultusunda sonuç ve politika önerileri paylaşılmaktadır.

LİTERATÜR

Tarım ve hayvancılık sektörlerinde kısa vadeli kâr maksimizasyonu amacıyla gerçekleştirilen aşırı kaynak kullanımı ve çevresel tahribat, ekosistem dengesini bozmakta ve işletmelerin uzun vadeli sürdürülebilirliğini riske atmaktadır. Bu durum, tarımsal faaliyetlerin yalnızca ekonomik performans temelinde değil; çevresel etkileri de kapsayan bütüncül bir yaklaşımla ele alınmasını gerekli kılmaktadır. Dolayısıyla tarım politikalarının ve işletme stratejilerinin ekonomik ve çevresel boyutlarını entegre eden sürdürülebilirlik odaklı bir çerçeveye dayanması önem arz etmektedir.

Bu kapsamda literatür incelemesi gerçekleştirilmiş; çalışmalar "Tarımsal Eko-Etkinliğin Ölçümü", "Ürün Temelli Tarımsal Etkinlik Çalışmaları" ve "İstenmeyen Çıktıların Dâhil Edildiği Çalışmalar" olmak üzere üç başlık altında sistematik biçimde sınıflandırılarak sunulmuştur.

Tarımsal Eko-Etkinliğin Ölçümü

Tarımsal eko-etkinliğin ölçülmesi, sürdürülebilir kalkınma hedeflerinin izlenmesi ve kaynak kullanım etkinliğinin değerlendirilmesi açısından kritik öneme sahiptir. Etkinliğin doğru biçimde belirlenmesi, sürdürülebilir tarım politikalarının mevcut durumunu anlamayı, çevresel baskı unsurlarını tanımlamayı ve iyileştirme alanlarını ortaya koymayı mümkün kılmaktadır. Bu değerlendirmeler, stratejik planlama süreçlerine girdi sağlayarak ekonomik büyüme ile çevresel koruma hedeflerinin dengelenmesinde temel bir araç işlevi görmektedir. Bu bağlamda, tarımsal etkinliğin çok boyutlu biçimde incelenmesi literatürde giderek daha fazla önem kazanmaktadır. VZA, çoklu girdi-çıktı yapısına dayalı ölçüm kabiliyeti sayesinde tarımsal üretim sistemlerinin etkinliğini değerlendirmede en yaygın kullanılan nicel yöntemlerden biri olarak öne çıkmaktadır.

Hoang & Alauddin (2012), 30 OECD ülkesinin ekonomik, çevresel ve ekolojik etkinlik düzeylerini VZA ile değerlendirmiştir. Moutinho ve ark. (2018), 22 Avrupa ülkesinin tarımsal ekonomik ve çevresel etkinliğini VZA, Stokastik Sınır Analizi (SFA) ve Genel Maksimum Entropi (GME) yaklaşımlarını karşılaştırarak analiz etmiş ve çevresel göstergelerin etkinlik düzeyleri üzerinde belirleyici rol oynadığını göstermiştir. Gerdessen & Pascucci (2013), Avrupa Birliği (AB) ülkelerinin tarımsal sürdürülebilirliklerini değerlendirmede ekonomik ve çevresel göstergelerin yanı sıra çıktı olarak genç çiftçi oranını ve tarımda eğitim seviyesini dikkate alarak sosyal göstergeleri de çalışmaya dâhil etmiştir. Sonraki yıllarda yapılan çalışmalar, yöntemin genişletilmiş biçimlerine yönelmiştir. Örneğin, Toma ve ark. (2017) AB ülkelerinin tarımsal etkinliğini Bootstrap-VZA yöntemiyle analiz ederek tahmini etkinlik skorlarının güven aralıklarını elde etmiştir; Wang & Wang (2022) ise Malzeme Dengesi Prensibi (MBP) tabanlı VZA modelini kullanarak Çin'in 29 bölgesinde teknik, çevresel ve maliyet etkinliklerinin yanı sıra sağlık etkinliğini de değerlendirmiştir. Dirik ve ark. (2023), OECD ülkelerinin 2019 yılı tarımsal etkinliklerini VZA ile ölçmüş ve ardından parçalı elastiklik analizi uygulayarak ülkelerin ölçeğe göre getiri (returns to scale) karakterizasyonlarını ortaya koymuştur. Menten ve ark. (2023), 2011–2020 yılları arasında OECD ülkelerindeki organik tarım üretiminin etkinliğini incelemiştir. Analizde öncelikle ülkelerin göreli etkinlikleri VZA ile ölçülmüş, ardından Katmanlı (Context-Dependent) VZA kullanılarak ülkeler etkinlik

düzeylerine göre gruplandırılmış ve dönemler arası değişim Malmquist Toplam Faktör Verimliliği (TFV) Endeksi ile analiz edilmiştir. Aydın ve ark. (2023), 2010–2019 yılları arasında 38 OECD ülkesinin tarımsal ticaret performansını analiz etmiştir. Araştırmada, Kategorik VZA ile TFV yöntemleri birlikte kullanılmıştır. Kategorik VZA modelinde ülkeler, her yıl için hiyerarşik kümeleme analizi ile benzer ticaret hacmine göre gruplara ayrılmıştır. Ayrıca ülkelerin genel etkinlikleri, teknoloji etkinlikleri ve toplam faktör etkinliklerinin zaman içindeki değişimleri incelenmiştir. Wang ve Zhang (2025), 2017–2021 dönemi panel verilerine dayanarak Çin'in Anhui Eyaleti'ndeki 16 şehrin tarımsal üretim etkinliğini ölçmek ve etkileyen faktörleri belirlemek amacıyla üç aşamalı VZA ve Malmquist indeksini entegre eden bir model kullanmıştır. İlk aşamada girdi yönelimli BCC modeli kullanılarak başlangıç teknik etkinlik değerleri hesaplanmıştır. İkinci aşamada etkinlik değerlerindeki çevresel ve rassal etkileri izole etmek için SFA uygulanmış, çevresel değişkenler (sulama suyu tüketimi, kırsal hane halkı harcanabilir geliri, sanayileşme düzeyi) modele dâhil edilmiştir. Son aşamada düzeltilmiş girdiler kullanılarak VZA yeniden uygulanmış ve "gerçek" etkinlik değerleri hesaplanmıştır. Muren ve ark. (2025), 2014–2022 dönemine ait ilçe ve bölge düzeyindeki mekânsal verileri kullanarak Çin'deki tarımsal üretim etkinliğini ve sürdürülebilir kalkınma potansiyelini VZA ve Malmquist TFP indeksi ile değerlendirmiştir.

Yukarıda özetlenen çalışmalar, tarımsal etkinlik analizlerinde VZA'nın farklı genişletilmiş versiyonlarının (Bootstrap-VZA, Kategorik VZA, Üç Aşamalı VZA, MBP tabanlı modeller vb.) yaygın biçimde kullanıldığını ve ekonomik performansın yanı sıra çevresel ve sosyal boyutların da analize dâhil edilmeye başlandığını göstermektedir. Özellikle istenmeyen çıktıları ve çevresel göstergeleri modele entegre eden çalışmalar, geleneksel etkinlik ölçümlerinin sürdürülebilirlik boyutunu yansıtmada yetersiz kalabileceğini ortaya koymuştur. Bununla birlikte literatürde OECD ülkeleri özelinde çevresel boyutu açık biçimde içeren ve tarımsal eko-etkinliği bütüncül bir çerçevede değerlendiren çalışmaların sınırlı olduğu görülmektedir. Ayrıca mevcut çalışmaların önemli bir bölümünde istenmeyen çıktılar veri dönüşümü veya dolaylı yaklaşımlar aracılığıyla analize dâhil edilmiştir. Bu çalışmada, söz konusu boşluktan hareketle, tarımsal üretim sürecinde ekonomik çıktılar ile çevresel yükü birlikte ele alan bir model kurgulanmış; istenmeyen çıktılar analize dâhil edilerek ülkelerin yalnızca üretim performansları değil, aynı zamanda çevresel sürdürülebilirlik düzeyleri de değerlendirilmiştir. Böylece mevcut literatürden metodolojik olarak yararlanılmış, ancak sürdürülebilirlik perspektifi güçlendirilerek çalışmaya özgün bir katkı sunulmuştur.

Ürün Temelli Tarımsal Etkinlik Çalışmaları

Literatürde tarımsal etkinlik analizlerinin bir bölümü ürün bazında yürütülmüştür. Ho ve ark. (2021), Vietnam'daki kahve üreticilerinin etkinliğini VZA ile analiz etmiş; Song & Chen (2019), tahıl üretimindeki su ayak izi ve eko-etkinliği SFA ile incelemiş. March ve ark. (2016), süt üretim sistemlerinde fosfor kullanımını istenmeyen çıktı olarak ele alırken; Sabiha ve ark. (2017), pirinç çiftliklerinde yüksek verimli pirinç üretimi için eko-etkinliği istenmeyen çıktıları da dikkate alarak değerlendirmiştir. Djuraeva ve ark. (2023), Özbekistan'ın Semerkant, Kaşkaderya ve Surhanderya bölgelerinde buğday üretimi için teknik etkinliği SFA ile analiz etmiştir.

Tarımsal sürdürülebilirliğin stratejik önemi nedeniyle literatürde etkinlik analizlerinin yalnızca ülke düzeyinde değil, ürün ve çiftlik ölçeğine kadar indirgenerek de ele alındığı görülmektedir. Bu çalışmalar, belirli üretim faaliyetlerinde kaynak kullanım yapısının ayrıntılı biçimde ortaya konmasına katkı sağlamaktadır. Bununla birlikte, sürdürülebilir tarım politikalarının yönlendirilmesi açısından ülkelerarası karşılaştırmalı makro değerlendirmelere de ihtiyaç duyulmaktadır. Bu doğrultuda mevcut çalışma, OECD ülkelerinin sürdürülebilir tarımsal etkinliğini ülke düzeyinde ve istenmeyen çıktıları dikkate alarak analiz etmektedir.

İstenmeyen Çıktıların Dâhil Edildiği Çalışmalar

Son yıllarda çevresel etkinlik analizinde istenmeyen girdi ve çıktılar (undesirable inputs/outputs) önemli bir inceleme boyutu haline gelmiştir. VZA'da istenmeyen girdilerin artırılması, istenmeyen çıktıların ise azaltılması amaçlanmaktadır (Liu & ark., 2010). Literatüre bakıldığında, çevresel etkinlik analizinde istenmeyen girdiler genellikle atık yönetimi sonucunda istenmeyen çıktıların geri dönüşümü ile sürece dahil edilmiştir (Wojcik ve ark., 2017). Örneğin; endüstriyel atık işleme (katı, sıvı ve gaz) (Li & ark., 2020), arıtılmış su tüketimi (Andre & ark., 2024) veya e-atık dönüşümü (örneğin batarya, pil vb.) (Rashidi ve ark., 2025). Dahası, yenilenebilir enerji ile elde edilen enerji tüketimi, Ar-Ge harcamaları da istenmeyen girdiler olarak değerlendirilmiştir (Ekiz Bozdemir ve ark., 2024). Üretim faaliyetleri sonucunda ortaya çıkan sera gazı emisyonları, kimyasal kirlilik, toprak bozulması gibi unsurlar ise istenmeyen çıktıya örnek olarak verilebilir. İstenmeyen çıktının değerlendirildiği çalışmalara bakıldığında, 3 gruba ayrıldığı söylenebilir. Bunlardan ilki istenmeyen çıktının girdi olarak değerlendirilerek minimize edilmesinin amaçlandığı çalışmadır. Fakat bu yaklaşım üretim fonksiyonları teorisiyle tutarlı değildir ve bu nedenle son dönemlerde tercih edilmemektedir (Watanabe & Tanaka, 2007). Bir diğer yaklaşım ise istenmeyen çıktının monoton azalan bir fonksiyon yardımıyla dönüştürülmesidir (Ekiz Bozdemir ve ark., 2024). Bu fonksiyonlar, veri dönüşümü nedeniyle bilgi kaybına neden olabileceği gibi negatif veri oluşumu gibi bazı

dezavantajlara da sahiptir. Etkinlik ölçümünde istenmeyen çıktıyı modele doğrudan dahil eden çalışmalar ise son grubu oluşturmaktadır. Bu çalışmada, tarımsal etkinlik analizinde istenmeyen çıktı olarak sera gazı emisyonu belirlenmiş, SBM ve S-SBM modelleri ile değerlendirilmiştir. Bu nedenle bölümün devamında istenmeyen çıktıyı dikkate alan çalışmalara yer verilmiştir.

Domagała (2021), AB ülkelerindeki tarımın ekonomik ve enerji etkinliğini Süper Etkinlik (SE) modeliyle analiz etmiş; çalışmada istenmeyen çıktı olan tarım kaynaklı sera gazı emisyonunu girdi olarak ele almıştır. Ancak, istenmeyen çıktının girdi olarak değerlendirilmesi yaklaşımı, üretim sürecinin yapısal özelliklerini her zaman tam olarak yansıtamadığından, son yıllarda bu değişkenin modele dâhil edilme biçimi farklı yöntemlerle ele alınmaya başlanmıştır. Bu nedenle, istenmeyen çıktıları doğrudan modele entegre edebilen SBM ve S-SBM modelleri, sürdürülebilir tarım etkinliğinin ölçümünde daha uygun yaklaşımlar olarak kabul edilmektedir. Sharma & Majumdar (2021), 28 Asya ülkesinin çevresel tarımsal etkinliğini CO_2 emisyonlarını istenmeyen çıktı olarak dikkate alarak, herhangi bir varsayım veya veri dönüşümüne gerek duymadan SBM modeliyle değerlendirmiştir. Benzer şekilde Khezri ve ark. (2023), 27 OECD ülkesinin çevresel etkinliğini CO_2 emisyonu ve ekolojik ayak izi göstergelerini istenmeyen çıktı olarak dâhil ederek analiz etmiştir. Mamghaderi ve ark. (2023) ise aynı ülke grubunun 2000–2017 dönemine ait 16 yıllık çevresel etkinliğini, ekolojik ayak izini istenmeyen çıktı olarak dikkate alarak Window-SBM modeliyle dinamik biçimde incelemiştir. Tang ve ark. (2023), Çin'in 31 eyaletine ait 2003–2020 dönemi panel verilerini kullanarak tarımsal üretim hizmetlerinin tarımsal eko-etkinlik üzerindeki etkilerini SBM ile analiz etmiştir. Çalışmada, istenmeyen çıktı olarak kullanılan karbon emisyonu altı kaynaktan hesaplanmıştır: kimyasal gübre, pestisit, plastik örtü, tarımsal dizel, sulama ve tarımsal ekim alanları. Han ve ark. (2024), 2010–2022 döneminde Çin'in 29 eyaletindeki kamu çiftliklerinde tarımsal karbon emisyonlarının etkinliğini S-SBM modeli ile analiz etmiştir. Çalışmada istenmeyen çıktı olarak kimyasal gübre, pestisit, tarımsal film, dizel yakıt, arazi işleme, sulama ve pirinç ekimi olmak üzere yedi ana karbon kaynağından meydana gelen emisyonlar hesaplanmıştır. Wang ve ark. (2025), Çin'in 31 bölgesinde 2000–2021 dönemi için tarımsal eko-etkinliği SBM ile değerlendirmiştir. Çalışmada, istenmeyen çıktı olarak yalnızca CO_2 değil; aynı zamanda CH_4 ve N_2O emisyonları da modele dâhil edilmiştir. Kyshakevych ve ark. (2025), AB tarım sektöründe eko-etkinliği ölçmek için S-SBM modelini kullanmıştır. Araştırmada kaynak temelli model, ekolojik model ve ekonomik model olmak üç farklı girdi yönelimli VZA modeli geliştirilmiş olup istenmeyen çıktı olarak CO_2 kullanılmıştır. Rodríguez-Fernández ve ark. (2025), İspanya'da 2004–2022 dönemi için bölgesel tarımsal eko-etkinliği SBM ile değerlendirmiştir. Çalışmada istenmeyen çıktı, çiftlik bazında sera gazı emisyonları (CO_2, CH_4, N_2O) olarak belirlenmiştir. Chen ve ark. (2025), Çin'in 30 eyaletine ait 2002–2021 dönemi panel verilerini kullanarak tarımsal enerji etkinliğinin ölçülmesi amacıyla üç aşamalı bir VZA yöntemi geliştirmiştir. Birinci aşamada SBM modeliyle başlangıç etkinlikleri hesaplanmış, ikinci aşamada SFA ile çevresel değişkenlerin ve rastgele faktörlerin etkileri giderilmiş ve üçüncü aşamada düzeltilmiş girdi değerleriyle yeniden VZA analizi gerçekleştirilerek nihai etkinlik değerleri elde edilmiştir. Çalışmada istenmeyen çıktı olarak tarımsal CO_2 emisyonu kullanılmıştır. Czyżewski & Kryszak (2025), 2005–2018 dönemine ait verileri kullanarak 99 ülkenin tarımsal sera gazı azaltım potansiyelini değerlendirmeyi amaçlamıştır. Çalışmada, ülkeler tarımsal üretkenliklerine göre kümeleme analiziyle (k-ortalamalar) üç gruba ayrılmıştır. Her küme için VZA tabanlı hibrit süper etkinlik meta-frontier modeli ile çevresel, ekonomik ve sosyal boyutları birlikte ele alan bir etkinlik modeli geliştirilmiştir. Modelde, istenmeyen çıktı olarak tarımsal sera gazı emisyonu kullanılmıştır. Yılmaz (2025), AB ülkeleri ile Türkiye'nin tarım sektöründeki eko-etkinliğini 2003–2022 dönemi için karşılaştırmalı olarak VZA (VRS yaklaşımı) ile analiz etmiştir. Analizde istenmeyen çıktı olarak sera gazı emisyonu modele Seiford & Zhu (1995) yaklaşımıyla tersine çevrilerek (reciprocal) entegre edilmiştir.

Genel olarak değerlendirildiğinde, literatürde istenmeyen çıktıları dikkate alan VZA temelli çalışmaların son yıllarda belirgin biçimde arttığı görülmektedir. Bu çalışmaların önemli bir kısmı, özellikle tarım sektöründe sera gazı emisyonlarının çevresel performans üzerindeki etkisini ortaya koymaya odaklanmıştır. Bununla birlikte, istenmeyen çıktının modele dâhil edilme biçimi çalışmalar arasında farklılık göstermekte; bazı araştırmalarda dönüşüm yaklaşımlarının tercih edildiği, bazılarında ise değişkenin doğrudan modele entegre edildiği görülmektedir. Son dönem çalışmalarının ağırlıklı olarak doğrudan entegrasyona imkân tanıyan SBM ve türevi modellere yönelmesi, bu yaklaşımın metodolojik açıdan daha tutarlı sonuçlar sunduğunu göstermektedir. Bu eğilimden hareketle, mevcut çalışmada tarımsal etkinlik analizinde istenmeyen çıktı olarak sera gazı emisyonu SBM ve Super-SBM modelleri aracılığıyla doğrudan değerlendirilmiştir.

Çizelge 1'de, bu çalışmada olduğu gibi, tarımsal etkinlik bakımından ülkelerin karşılaştırıldığı çalışmalar yer almaktadır.

Çizelge 1. Tarımsal etkinlik bakımından ülkelerin / bölgelerin karşılaştırıldığı bazı çalışmalar
Table 1. Some studies comparing countries/regions in terms of agricultural efficiency

Makale	KVB	Girdi	Çıktı/İstenmeyen Çıktı	Model
Moutinho ve ark. (2018)	27 Avrupa ülkesi	-iş gücü -tarım alanı -enerji	-net katma değer	VZA ve SFA
Gerdessen & Pascucci (2013)	252 bölgesel tarım sistemi (AB İstatistiki Bölge Birimleri Sınıflandırması (NUTS2) düzeyi)	Çevresel göstergeler: -toprak erozyonu riski -bitkisel üretimde arazi kullanım yoğunluğu -hayvansal üretimde arazi kullanım yoğunluğu -sulanan alanların önemi	Ekonomik göstergeler: -iş gücü verimliliği -tarımda sabit sermaye oluşumu Sosyal göstergeler: -genç çiftçiler oranı -tarımda eğitim seviyesi	CRS ve VRS
Toma ve ark. (2017)	25 AB ülkesi	-işgücü -arazi -sermaye -gübre -sulama alanı	-tarımsal üretim değeri	Bootstrap VZA
Domagała (2021)	26 AB Ülkesi	- arazi alanı - istihdam - gübre tüketimi - enerji tüketimi	-tarımsal üretim değeri İstenmeyen çıktı: - Sera gazı emisyonu	SE
Sharma & Majumdar (2021)	28 Asya ülkesi	-tarım arazisi -tohum -gübre	-pirinç üretimi İstenmeyen çıktı: - CO_2 emisyonu	Yönsel mesafe fonksiyonu (Directional distance function - DDF) ve SBM
Khezri ve ark. (2023)	27 OECD ülkesi	-sermaye stoğu -işgücü -enerji tüketimi	-GSYİH İstenmeyen çıktı: -CO_2 emisyonu -ekolojik ayak izi	SBM
Mamghaderi ve ark. (2023)	27 OECD ülkesi	-sermaye stoğu -işgücü -enerji tüketimi	-GSYİH İstenmeyen çıktı: -ekolojik ayak izi	Window SBM
Menten ve ark. (2023)	32 OECD ülkesi	-organik tarım arazisi -organik üretici sayısı	- organik ürün satışları	Katmanlı VZA ve Malmquist Toplam Faktör Verimliliği (TFV)
Aydın ve ark. (2023)	38 OECD ülkesi	-liman verimliliği ve ulaşım kalitesi -gümrük ve sınır yönetimi -hükümet düzenlemeleri -finans ve e-ticaret	-toplam tarımsal ticaret hacmi (ihracat + ithalat)	Katmanlı VZA ve Malmquist Toplam Faktör Verimliliği (TFV)
Dirik ve ark. (2023)	37 OECD ülkesi	-tarım arazisi -tarımsal iş gücü	-bitkisel üretim değeri -hayvansal üretim	VZA

		-çiftlik hayvanı sayısı -gübre kullanımı -sermaye stoku	değeri.	
Kyshakevych ve ark. (2025)	27 AB ülkesi	-enerji tüketimi -işgücü -sabit sermaye tüketimi -tarım alanı	-tarımsal üretim değeri -tarımsal hizmet çıktısı -katma değer -tarım ihracatı İstenmeyen çıktı: CO_2 emisyonu	S-SBM
Czyżewski & Kryszak (2025)	99 ülke	-arazi -işgücü -enerji -azot gübresi -pestisit -hayvan sayısı	-tarımsal üretim değeri -gıda güvenliği endeksi. İstenmeyen çıktı: CO_2 emisyonu	VZA tabanlı hibrit SE meta-frontier modeli
Yılmaz (2025)	25 AB ülkesi ve Türkiye	-tarım sektöründe çalışanlara yapılan ödemeler -enerji tüketimi -sabit sermaye oluşumu	- tarımsal GSYİH İstenmeyen çıktı: Sera gazı emisyonları (CO_2, CH_4, N_2O)	VZA

MATERYAL ve METOD

Metod: Veri Zarflama Analizi (VZA)

Bir sürecin girdileri ile çıktı değerleri arasındaki ilişkiyi ifade eden "etkinlik", parametrik ve parametrik olmayan yöntemler aracılığıyla ölçülebilmektedir. Veri Zarflama Analizi (VZA), yalnızca girdi ve çıktı değerlerinden yararlanarak etkinlik ölçümü gerçekleştiren, bu değerlere önceden herhangi bir ağırlık ataması veya normalizasyon işlemi gerektirmeyen ve bu yönüyle etkinlik analizlerinde en yaygın kullanılan parametrik olmayan yöntemlerden biridir (Liu ve ark., 2010). VZA, ilk olarak Charnes ve ark. (1978) tarafından benzer Karar Verme Birimleri'nin (KVB'ler) göreli etkinliklerinin değerlendirilmesi adına ortaya konmuş ve geliştirilen model literatürde CCR (Charnes- Cooper- Rhodes) modeli olarak adlandırılmıştır. CCR modeli, girdileri (x_1, x_2) ve çıktıları (y_1, y_2) olan bir KVB'nin girdilerinin $(tx_1, tx_2); t > 0$ olarak artması durumunda çıktılarının da (ty_1, ty_2) olarak ifade edilen ölçeğe göre sabit getiri (Constant Return to Scale –CRS) varsayımı ile çalışmaktadır. Banker ve ark. (1984) tarafından CCR modeline, k KVB sayısını ifade etmek üzere, $\sum_{k\in N} \lambda_k = 1$ konvekslik kısıtının eklenmesi sonucunda ölçeğe göre değişken getiri (Variable Return to Scale-VRS) varsayımlı BCC (Banker-Charnes-Cooper) modelini geliştirmiştir. VRS varsayımında girdinin t birim artması sonucunda çıktı aynı veya farklı oranda artabilir, azalabilir veya sabit kalabilir. Klasik modeller olarak da adlandırılan CCR ve BCC modelleri, etkin KVB'ler için etkinlik skorunu 1 ile sınırlayarak etkin sınırı oluşturmakta, etkin olmayan KVB'ler içinse 0-1 arasında değerler üretmektedir. Böylelikle klasik modeller, etkin ve etkin olmayan KVB'leri birbirinden ayırt etmekte, etkin olmayan KVB'ler için bir tercih sıralaması oluşturmakta, fakat etkin KVB'ler için bir sıralama sunamamaktadır. Bu nedenle, Andersen & Petersen (1993) tarafından etkin olmayan KVB'ler için klasik modeller ile aynı sonucu üreten ve dahası, etkin KVB'ler için de bir sıralama sunan Süper Etkinlik (SE) modeli önerilmiştir. SE modelinde değerlendirme altındaki etkin KVB etkin sınırdan çıkarılmakta ve böylelikle var olan etkin sınır kırılarak yeni etkin sınır oluşmaktadır. Etkinliği ölçülen etkin KVB'nin oluşan yeni etkin sınıra olan uzaklığı böylelikle 1'in üzerine çıkmaktadır. CCR, BCC ve SE modellerinde amaç fonksiyonu girdi minimizasyonu ya da çıktı maksimizasyonu şeklinde yönelimlidir. Buna ek olarak, radyal modeldirler ve girdi-çıktı gevşek değişkenlerini dikkate almamaktadırlar. Radyal modeller, KVB'lerin etkinlik ölçümünde girdi ve çıktı gevşek değişkenlerini dikkate almadıklarından olursuz (infeasible) çözümler üretebilmekte ya da aşırı yüksek ölçümler yapabilmektedir (Li ve ark., 2013).

Radyal modellerin dezavantajlarından dolayı Tone (2001) tarafından amaç fonksiyonu girdi ve çıktı gevşek değişkenlerinden oluşan Gevşeklik Tabanlı Ölçü (Slack Based Measure- SBM) modeli önerilmiştir. SBM modeli,

non-radyal model olarak girdi ve çıktı gevşek değişkenlerini dikkate alarak olumsuz ve aşırı yüksek çözümler sorununu ortadan kaldırmaktadır. Buna ek olarak, Tone (2004) tarafından gerçekleştirilen çalışmada bir süreçte istenen çıktıların yanı sıra kötü veya istenmeyen çıktı olarak adlandırılan unsurlar modele dahil edilmiştir.
k adet KVB'nin olduğu bir durumda her bir KVB'nin girdi, çıktı ve istenmeyen çıktısı sırasıyla $x \in R^m$, $y^g \in R^s$ ve $y^b \in R^v$ olmak üzere, $X = [x_1,\ x_2, \dots, x_k] \in R^{mxk}$, $Y^g = \left[y_1^g, y_2^g, \dots, y_k^g\right] \in R^{qxk}$ ve $Y^b = \left[y_1^b, y_2^b, \dots, y_k^b\right] \in R^{vxk}$ matrisleri ile temsil edilmektedir. Burada $X > 0$, $Y^g > 0$ ve $Y^b > 0$'dır. Üretim olanağı kümesi (P), λ yoğunluk vektörü olmak üzere $P = \{(x, y^g, y^b) | x \geq X\lambda,\ y^g \leq Y^g\lambda, y^b \geq Y^b\lambda, \lambda \geq 0\}$'dir.

Çizelge 2. Doğrusal ve doğrusal olmayan SBM ve S-SBM modelleri (Tone, 2001; Tone, 2002; Tone, 2004)
Table 2. Linear and non-linear SBM and S-SBM models

Doğrusal olmayan SBM modeli (1)

$$\min \rho = \frac{1 - \frac{1}{m}\sum_{i=1}^{m} \frac{s_i^-}{x_{i0}}}{1 + \frac{1}{q+v}\left(\sum_{r=1}^{q} \frac{s_r^g}{y_{r0}^g} + \sum_{b=1}^{v} \frac{s_b^v}{y_{b0}^b}\right)}$$

öyle ki

$$x_{i0} = \sum_{k=1}^{n} \lambda_k x_{ik} + s_i^- \qquad i = 1, \dots, m$$

$$y_{r0}^g = \sum_{k=1}^{n} \lambda_k y_{rk}^g - s_r^g \qquad r = 1, \dots, q$$

$$y_{b0}^b = \sum_{k=1}^{n} \lambda_k y_{bk}^b + s_r^b \qquad b = 1, \dots, v$$

$$\sum_{k=1}^{n} \lambda_k = 1$$

$$1 + \frac{1}{q+v}\left(\sum_{r=1}^{q} \frac{s_r^g}{y_{r0}^g} + \sum_{b=1}^{v} \frac{s_b^v}{y_{b0}^b}\right) > 0$$

$$s_i^-, s_r^g, s_b^v \geq 0, \lambda_k \geq 0 \ \ k = 1, \dots, n$$

Doğrusal SBM modeli (2)

$$\rho = \min\left(T - \frac{1}{m}\sum_{i=1}^{m} \frac{Ts_i^-}{x_{i0}}\right)$$

öyle ki

$$Tx_{i0} = \sum_{k=1}^{n} T\lambda_k x_{ik} + Ts_i^- \qquad i = 1, \dots, m$$

$$Ty_{r0}^g = \sum_{k=1}^{n} T\lambda_k y_{rk}^g - Ts_r^g \qquad r = 1, \dots, q$$

$$Ty_{b0}^b = \sum_{k=1}^{n} T\lambda_k y_{bk}^b + Ts_r^b \qquad b = 1, \dots, v$$

$$\sum_{k=1}^{n} \lambda_k = 1$$

$$1 = T + \frac{1}{q+v}\left(\sum_{r=1}^{q} \frac{Ts_r^g}{y_{r0}^g} + \sum_{b=1}^{v} \frac{Ts_b^v}{y_{b0}^b}\right)$$

$$T \geq 0, s_i^-, s_r^g, s_b^v \geq 0, \lambda_k \geq 0 \ \ k = 1, \dots, n$$

Doğrusal olmayan S-SBM modeli (3)

$$\min \tau = \frac{\frac{1}{m}\sum_{i=1}^{m} \frac{\bar{x}_i}{x_{i0}}}{\frac{1}{q+v}\left(\sum_{r=1}^{q} \frac{\bar{y}_r^g}{y_{r0}^g} + \sum_{b=1}^{v} \frac{\bar{y}_r^b}{y_{b0}^b}\right)}$$

öyle ki

$$\bar{x}_i \geq \sum_{k=1,k\neq 0}^{n} \lambda_k x_{ik} \qquad i = 1, \dots, m$$

$$\bar{y}_r^g \leq \sum_{k=1,k\neq 0}^{n} \lambda_k y_{rk}^g \qquad r = 1, \dots, q$$

$$\bar{y}_b^b \geq \sum_{k=1,k\neq 0}^{n} \lambda_k y_{bk}^b \qquad b = 1, \dots, v$$

$$\sum_{k=1,k\neq 0}^{n} \lambda_k = 1$$

$$\bar{x}_i \geq x_{i0}, \bar{y}_r^g \leq y_{r0}^g, \bar{y}_b^b \geq y_{b0}^b, \bar{y}_r^g \geq 0$$
$$\lambda_k \geq 0 \ \ k = 1, \dots, n$$

Doğrusal S-SBM modeli (4)

$$\min \tau = \frac{1}{m}\sum_{i=1}^{m} \frac{T\bar{x}_i}{x_{i0}}$$

öyle ki

$$T\bar{x}_i \geq \sum_{k=1,k\neq 0}^{n} T\lambda_k x_{ik} \qquad i = 1, \dots, m$$

$$T\bar{y}_r^g \leq \sum_{k=1,k\neq 0}^{n} T\lambda_k y_{rk}^g \qquad r = 1, \dots, q$$

$$T\bar{y}_b^b \geq \sum_{k=1,k\neq 0}^{n} T\lambda_k y_{bk}^b \qquad b = 1, \dots, v$$

$$\sum_{k=1,k\neq 0}^{n} \lambda_k = 1$$

$$1 = \frac{1}{q+v}\left(\sum_{r=1}^{q} \frac{T\bar{y}_r^g}{y_{r0}^g} + \sum_{b=1}^{v} \frac{T\bar{y}_r^b}{y_{b0}^b}\right)$$

$$T \geq 0, \bar{x}_i \geq x_{i0}, \bar{y}_r^g \leq y_{r0}^g, \bar{y}_b^b \geq y_{b0}^b, \bar{y}_r^g \geq 0$$
$$\lambda_k \geq 0 \ \ k = 1, \dots, n$$

SBM ve S-SBM modelleri kesirli ve doğrusal olmayan bir amaç fonksiyonuna sahip olduğundan, bu yapının doğrudan çözülmesi klasik doğrusal programlama yöntemleriyle mümkün değildir. Bu nedenle modelin doğrusal forma dönüştürülmesi metodolojik açıdan gerekli bir adımdır. Charnes - Cooper tarafından geliştirilen dönüşüm

ile model doğrusal programlama modeline dönüşmekte ve böylece problem mevcut optimizasyon çözücüleriyle güvenilir, hızlı ve kararlı biçimde çözülebilmektedir. Doğrusal forma dönüştürmenin en önemli avantajı, çözüm sürecinin standart doğrusal programlama algoritmaları (örneğin, simpleks) aracılığıyla etkin biçimde yürütülmesidir. Bu durum özellikle büyük örneklemli uygulamalarda hesaplama verimliliğini artırmakta ve modelin pratikte uygulanabilirliğini güçlendirmektedir. Ayrıca doğrusal yapı, modelin teorik özelliklerinin analiz edilmesini ve sonuçların karşılaştırılmasını kolaylaştırmaktadır. Dolayısıyla doğrusal dönüşüm, yalnızca teknik bir avantaj değil; aynı zamanda modelin uygulanabilirliğini, hesaplanabilirliğini ve analitik gücünü artıran önemli bir avantajdır. Çizelge 2'de doğrusal olmayan SBM modeli (1), doğrusal SBM modeli (2), doğrusal olmayan S-SBM modeli (3) ve doğrusal S-SBM modeli (4) yer almaktadır. Çalışmada model (2) ve model (4) bir diğer ifade ile doğrusal SBM ve S-SBM modelleri ile etkinlik değerlendirmesi gerçekleştirilmiştir. Model (1)'de (x_0, y_0^g, y_0^b) değerlendirilen KVB'nin girdi, çıktı ve istenmeyen çıktısını ifade ederken $S = (S^-, S^g, S^b)$ ise girdi, çıktı ve istenmeyen çıktı gevşek değişkenlerini ifade etmektedir. Amaç fonksiyonu, girdi fazlalıklarını azaltırken çıktı eksikliklerini de en aza indirecek şekilde en iyi oranı elde etmeyi amaçlamaktadır. Amaç fonksiyonunun $\rho^* = 1$ değerini alması, bir diğer ifadeyle KVB'nin etkin olabilmesi ancak ve ancak $S^- = 0, S^g = 0$ ve $S^b = 0$ ile mümkündür. $\rho^* < 1$ olması durumunda ise KVB etkin değildir ve girdi veya çıktılarının iyileştirilmesi gerekmektedir. $x_{i0} = \sum_{k=1}^{n} \lambda_k x_{ik} + s_i^-, i = 1, \dots, m$ kısıtı KVB_0'ın girdisinin diğer KVB'lerin girdilerinin ağırlıklı toplamı ve girdi fazlalığından (s_i^-) oluştuğunu açıklarken $y_{r0}^g = \sum_{k=1}^{n} \lambda_k y_{rk}^g - s_r^g,\ r = 1, \dots, q$ kısıtı ise KVB_0'ın çıktısının diğer KVB'lerin ağırlıklı toplamı ve çıktı eksikliğinden (s_r^g) oluştuğunu açıklamaktadır. Kötü çıktılar ters mantıkla ele alındığından $y_{b0}^b = \sum_{k=1}^{n} \lambda_k y_{bk}^b + s_r^b, b = 1, \dots, v$ kısıtındaki s^b, ilk kısıtta olduğu gibi fazlalığı ifade etmektedir. s_i^-, s_r^g veya s^b gevşek değişkenlerinin pozitif değerler alması KVB'nin girdi fazlası, çıktı eksikliği ya da istenmeye çıktı fazlalığı olduğunu ifade etmektedir. Bir diğer ifadeyle KVB'nin etkin olmadığı anlamına gelmektedir. $\sum_{k=1}^{n} \lambda_k = 1$ kısıtı VRS varsayımını sağlarken, $1 + \frac{1}{q+v}\left(\sum_{r=1}^{q} \frac{s_r^g}{y_{r0}^g} + \sum_{b=1}^{v} \frac{s_b^v}{y_{b0}^b}\right) > 0$ kısıtı ise modelin matematiksel geçerliliğini ve amaç fonksiyonunun pozitif olmasını güvence altına almaktadır. Son olarak, işaret kısıtlarına yer verilmiştir.

Model (1)'in Charnes-Cooper dönüşümü kullanılarak doğrusal hale dönüştürülmesi sonucunda Çizelge 2'de yer alan model (2) elde edilmiştir. Bu dönüşümde kesirli amaç fonksiyonunun paydasını ortadan kaldırmak amacıyla model, paydayı 1'e eşitleyen pozitif bir skaler olan T yardımcı değişkeni ile yeniden ölçeklendirilmiştir. Teknik olarak amaç fonksiyonu T/T ile çarpılmakta; böylece pay kısmı T ile çarpılırken, payda kısmı 1'e eşitlenmektedir. Bu nedenle payda ifadesi modele bir kısıt olarak eklenmekte ve doğrusal form elde edilmektedir. T karar değişkeni etkin olmayan KVB'lerin etkin olabilmesi için girdi, çıktı ve istenmeyen girdilerin ne ölçüde azaltılması veya artırılması gerektiğini ifade etmektedir. Doğrusal olmayan S-SBM modelinde (3) ise süper etkinlik yaklaşımı gereği, değerlendirilen KVB referans kümesinden çıkarılmakta, böylece etkin sınır kırılmakta ve yeni etkin sınır oluşumu ile etkinlik skoru 1'in üzerine çıkmaktadır. Model (3)'ün Charnes – Cooper dönüşümü ile doğrusallaştırılması sonucunda ise model (4) elde edilmiştir.

SBM modeli etkin ve etkin olmayan KVB'leri ayırt etmekte, etkin olmayan KVB'leri sıralarken etkin KVB'ler için ayırt edici bir özellik sunamamaktadır. Bu nedenle sadece etkin KVB'leri sıralayabilmek için Tone (2002) tarafından Süper-SBM modeli önerilmiştir. Burada etkin KVB'lerin etkinlik skorları 1'in üzerinde iken etkin olmayan KVB'lerin etkinlik skoru $\rho^* = 1$'dir. Bu nedenle etkin ve etkin olmayan KVB'ler için tam bir sıralama elde etmek adına sırasıyla SBM ve S-SBM modellerinin uygulanması gerekmektedir.

Materyal

Tarımsal üretim süreci, genel olarak girdilerin belirli bir teknoloji altında kullanılarak çıktılara dönüştürüldüğü bir üretim fonksiyonu çerçevesinde ele alınmaktadır. Bu kapsamda, çalışmada kullanılan değişkenler literatürde yaygın biçimde benimsenen üretim-teknoloji ilişkisine uygun olarak seçilmiştir. Enerji, gübre, pestisit ve tarım alanı değişkenleri üretim sürecine doğrudan dâhil edilen üretim faktörleri olduklarından, tarımsal faaliyetlerin girdilerini temsil etmektedir. Enerji kullanımı, mekanizasyon düzeyinin ve üretim yoğunluğunun bir göstergesidir; aynı zamanda üretim maliyetleri ve karbon ayak izinin temel belirleyicisidir. Gübre ve pestisit kullanımı, kimyasal girdi bağımlılığını yansıtarak toprağın verimliliğini artırırken çevresel riskleri de beraberinde getirmektedir. Tarım alanı ise üretim kapasitesinin mekânsal boyutunu temsil ederek, kullanılan doğal kaynak miktarını doğrudan yansıtmaktadır. Çıktı değişkeni olarak tarımsal üretim değeri seçilmiştir. Bu gösterge, üretim sürecinin ekonomik performansını yansıtan, birim girdilerden elde edilen toplam tarımsal katma değeri temsil eden kapsamlı bir ölçüttür. İstenmeyen çıktı olarak sera gazı emisyonu değişkeninin seçilmesi ise tarımsal üretimin çevresel etkilerini doğrudan dikkate alan bütüncül bir yaklaşımın sonucudur. Tarımsal faaliyetlerden kaynaklanan CO_2 emisyonları hem enerji kullanımına hem de kimyasal girdilerin aşırı tüketimine bağlı olarak ortaya çıkmakta ve çevresel etkinliğin azalmasına neden olmaktadır. Bu nedenle, sera gazı emisyonunun modele istenmeyen bir çıktı olarak entegre edilmesi, üretim fonksiyonunun hem ekonomik hem de ekolojik boyutunu

yansıtarak tarımsal etkinliğin sürdürülebilirlik temelli bir perspektiften değerlendirilmesini mümkün kılmaktadır. Çizelge 3'te, çalışmada kullanılan değişkenlerin kısa tanımları ile bu değişkenlere ilişkin literatürdeki referanslar sunulmuştur.

Çizelge 3. Girdi, çıktı ve istenmeyen çıktı için referans çalışmalar
Table 3. Reference studies for inputs, outputs, and undesirable outputs

Değişken	Değişken türü	Referans	Tanım
Enerji (ton)	Girdi	Moutinho ve ark. (2018), Domagała (2021), Khezri ve ark. (2023), Mamghaderi ve ark. (2023), Kyshakevych ve ark. (2025), Czyżewski & Kryszak (2025), Yılmaz (2025)	Enerji, tarımsal üretim sürecinde kullanılan tüm enerji kaynaklarının (yakıt, elektrik, makine gücü vb.) toplam tüketimini ifade etmektedir.
Gübre (hektar başına kullanılan miktar/ kg)	Girdi	Toma ve ark. (2017), Domagała (2021), Sharma & Majumdar (2021), Dirik ve ark. (2023), Czyżewski & Kryszak (2025)	Gübre, tarımsal üretimde verimliliği artırmak amacıyla kullanılan kimyasal ve organik maddelerin toplam kullanım miktarını temsil etmektedir.
Pestisit (ton)	Girdi	Czyżewski & Kryszak (2025)	Pestisit, tarımsal üretimde zararlı organizmalarla mücadelede kullanılan kimyasal maddelerin toplam kullanım miktarını ifade etmektedir.
Tarım alanı (hektar)	Girdi	Moutinho ve ark. (2018), Kyshakevych ve ark. (2025)	Tarım alanı, ekim, dikim veya otlatma faaliyetleri için kullanılan toplam arazi büyüklüğünü göstermektedir.
Tarımsal üretim değeri (dolar)	Çıktı	Toma ve ark. (2017), Domagała (2021), Kyshakevych ve ark. (2025), Czyżewski & Kryszak (2025)	Tarımsal üretim değeri, bir ülkenin belirli bir dönemde gerçekleştirdiği tarımsal üretimin toplam ekonomik değerini ifade etmektedir.
Sera gazı emisyonu (ton)	İstenmeyen çıktı	Domagała (2021), Sharma & Majumdar (2021), Khezri ve ark. (2023), Kyshakevych ve ark. (2025), Czyżewski & Kryszak (2025)	Sera gazı emisyonu, tarımsal üretim sürecinde ortaya çıkan sera gazlarının toplam miktarını ifade etmektedir.

Sürdürebilir tarımsal etkinliğin belirli bir zaman için ölçümü yanlı bir değerlendirmeye neden olabileceği için zaman aralığında değerlendirmesi daha güvenilir olacaktır. Ayrıca yapılan yatırım veya iyileştirmelerin belirli bir zaman zarfı sonunda çıktıya dönüşmesi nedeniyle tarımsal etkinliğin panel verisi ile değerlendirilmesi daha uygun olacaktır. Bu doğrultuda, 32 OECD ülkesinin sürdürülebilir tarımsal etkinliği 2018–2021 dönemi için değerlendirilmiştir. Girdi ve çıktı değişkenlerine ilişkin veri eksikliği nedeniyle Amerika Birleşik Devletleri ve Yeni Zelanda analiz kapsamına dahil edilmemiştir. Veri setinde gerçekleştirilen ön analizler sonucunda, İzlanda, Lüksemburg, Estonya ve Slovenya'nın girdi ve çıktı değişkenleri bakımından diğer ülkelere kıyasla belirgin biçimde uç değerlere sahip olduğu tespit edilmiştir. Söz konusu ülkelerin analiz kapsamına dahil edilmesi, parametrik olmayan ve uç değerlere duyarlı bir yöntem olan Veri Zarflama Analizi'nde etkinlik sınırının yapay biçimde şekillenmesine ve sonuçların sapmasına yol açabilecektir. Bu nedenle, etkinlik skorlarının güvenilirliğini ve modelin ayırt ediciliğini korumak amacıyla ilgili ülkeler analiz kapsamı dışında bırakılmıştır. Enerji, pestisit, tarım alanı ve sera gazı emisyonu değişkenleri OECD (https://data-explorer.oecd.org/)'dan, gübre ve tarımsal üretim değeri ise World Bank web sitesinden elde edilmiştir (https://datacatalog.worldbank.org/). İlgili verilere min–maks normalizasyonu uygulanmış ve normalizasyon sonucunda bazı gözlemler için sıfır değerler oluşmuştur. Her ne kadar VZA negatif olmayan değerlerle çalışabilen bir yöntem olsa da, özellikle SBM ve süper-SBM gibi oran temelli modellerde sıfır değerler hesaplama sürecinde bölme işlemleri nedeniyle sayısal sorunlara yol açabilmektedir. Bu nedenle, modelin sayısal kararlılığını sağlamak amacıyla tüm normalize edilmiş girdi ve çıktı değişkenlerine çok küçük bir pozitif sabit (ε) eklenmiştir. Bu çalışmada ε değeri 10^{-9} olarak alınmıştır. Eklenen ε değeri veri dağılımını ve göreli büyüklük ilişkilerini etkilemeyecek düzeyde seçilmiş olup, yalnızca hesaplama sürecindeki olası tanımsızlık problemlerini önlemeyi amaçlamaktadır. Çizelge 4'te normalize edilmiş girdi, çıktı ve istenmeyen çıktı için tanımlayıcı istatistik değerleri yer almaktadır.

Çizelge 4. Girdi, çıktı ve istenmeyen çıktıya ait tanımlayıcı istatistik değerleri
Table 4. Descriptive statistics for inputs, outputs, and undesirable output

	Enerji	Gübre	Pestisit	Tarım alanı	Tarımsal üretim değeri	Sera gazı emisyonu
Ortalama	0.233	0.107	0.166	0.065	0.234	0.183
Medyan	0.093	0.052	0.051	0.010	0.110	0.072
Standart sapma	0.259	0.180	0.231	0.176	0.246	0.218

Not: Panel veri 2018-2021 yılları arasında 32 ülkeye ait 6 göstergeyi içermektedir.

Çizelge 4 incelendiğinde, tüm değişkenlerde ortalama değerlerin medyandan yüksek olduğu ve standart sapmaların ortalamaya yakın seyrettiği görülmektedir. Bu durum dağılımın sağa çarpık olduğunu ve ülkeler arasında girdi–çıktı düzeyleri bakımından belirgin farklılıklar bulunduğunu göstermektedir. Söz konusu farklılıklar ülkelerin yapısal, ekonomik ve tarımsal ölçek özelliklerinden kaynaklanmakta olup, analiz öncesinde tüm değişkenler normalize edilerek ölçek etkisi kontrol altına alınmış ve uç değerlere sahip gözlemler veri setinden çıkarılarak olası sapmalar giderilmiştir. Ayrıca VZA, parametrik olmayan ve dağılım varsayımı gerektirmeyen bir yöntem olduğundan, uç değerlerin veri setinden çıkarılması ile elde edilen veri yapısındaki heterojenlik metodolojik bir sorun teşkil etmemektedir. Aksine, makul düzeyde varyasyon karar birimleri arasındaki göreli performans farklılıklarının daha net ortaya konulmasına katkı sağlamakta ve modelin ayırt edicilik gücünü güçlendirmektedir.

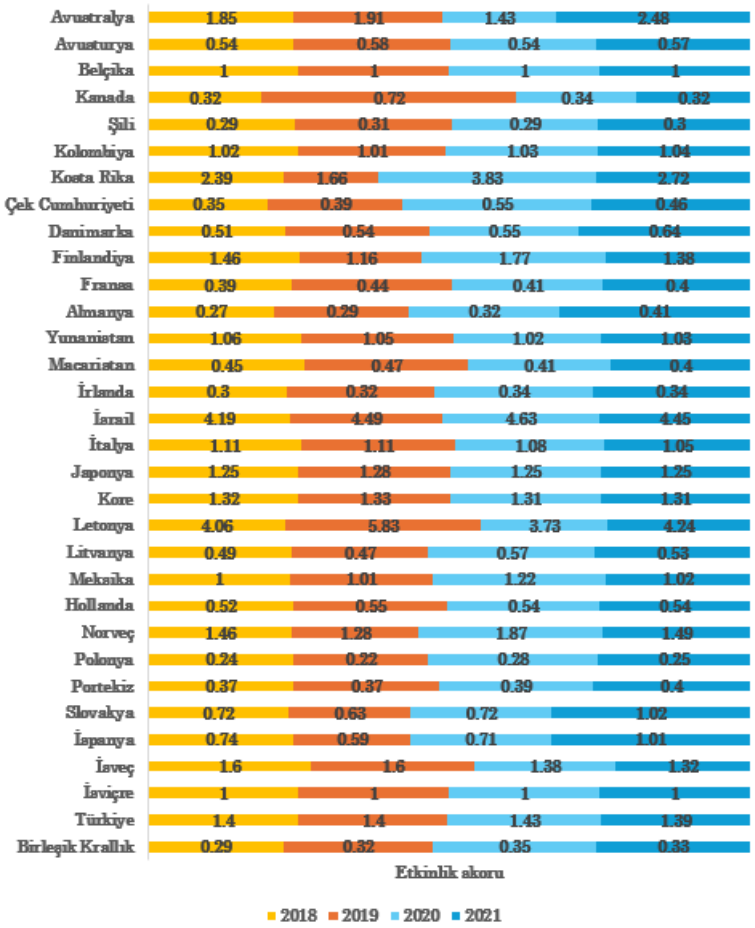
BULGULAR ve TARTIŞMA

Etkin olmayan KVB'ler için SBM, etkin KVB'ler için S-SBM modeli ile ölçülen yıllara göre tarımsal etkinlik skorları Şekil 1'de yer almaktadır. Çizelge 5'te ise ülkelerin ortalama tarımsal etkinlik skorları yer almaktadır.

2018-2021 yılları arasında ortalama tarımsal etkinlik skoruna göre etkin olan ülkeler sırası ile Letonya (4.47), İsrail (4.44), Kosta Rika (2.65), Avustralya (1.92), Norveç (1.53), İsveç (1.48), Finlandiya (1.44), Türkiye (1.41), Kore (1.32), Japonya (1.26), İtalya (1.09), Meksika (1.06), Yunanistan (1.04), Kolombiya (1.03), İsviçre (1.00), Belçika (1.00)'dır. Etkin olmayan ülkeler ise sırasıyla Slovakya (0.77), İspanya (0.76), Danimarka (0.56), Avusturya (0.56), Hollanda (0.54), Litvanya (0.52), Çek Cumhuriyeti (0.44), Macaristan (0.43), Kanada (0.43), Fransa (0.41), Portekiz (0.38), İrlanda (0.33), Birleşik Krallık (0.32), Almanya (0.32), Şili (0.30), Polonya (0.25)'dir. Etkin ve etkin olmayan ülkelere bakıldığında, ülkelerin 3 gruba ayrıldığı söylenebilir. Bunlardan ilki, diğer ülkelerden belirgin şekilde ayrışan Letonya, İsrail ve Kosta Rika'dır. Bu ülkeler dönem boyunca yüksek etkinlik düzeyini korumuş ve veri setindeki en ayırt edici performansı göstermişlerdir. Özellikle Letonya ve İsrail'in tüm yıllarda 4 yakın veya üzerinde seyreden etkinlik skorları dikkat çekicidir. Bir diğer grup ise yüksek-orta düzeyde etkinlik skoruna sahip olan Avustralya (1.92), Norveç (1.53), İsveç (1.48), Finlandiya (1.44), Türkiye (1.41), Kore (1.32), Japonya (1.26), İtalya (1.09), Meksika (1.06), Yunanistan (1.04), Kolombiya (1.03), İsviçre (1.00) ve Belçika (1.00)'dır. Bu ülkelerin birçoğu etkin sınırın üzerinde yer alırken, İsviçre ve Belçika ise etkin sınırda yer almaktadır. Buna ek olarak Kore, Japonya, Kolombiya, Yunanistan, İtalya ve Türkiye'nin nispeten istikrarlı bir seyir izlediği söylenebilir. Son grup, düşük ortalama etkinlik skoruna sahip ülkelerdir; bu ülkeler etkin olmayan ülkelerdir. Bu grupta yer alan İspanya ve Slovakya, 2021 yılında etkin duruma gelerek diğer ülkelerden ayrışmış olsa da ortalama etkinlik skoruna bakıldığında son grupta yer almışlardır. Polonya (0.25), Şili (0.30), Birleşik Krallık (0.32), Almanya (0.32), İrlanda (0.33) ve Portekiz (0.38) tüm yıllarda düşük etkinlik skoruna sahip olan ülkelerdir.

Çizelge 5. Ortalama etkinlik skorları
Table 5. Average efficiency scores

KVB	Ortalama skor	KVB	Ortalama skor	KVB	Ortalama skor
Avustralya	**1.92**	Almanya	0.32	Hollanda	0.54
Avusturya	0.56	Yunanistan	**1.04**	Norveç	**1.53**
Belçika	**1.00**	Macaristan	0.43	Polonya	0.25
Kanada	0.43	İrlanda	0.33	Portekiz	0.38
Şili	0.30	İsrail	**4.44**	Slovakya	0.77
Kolombiya	**1.03**	İtalya	**1.09**	İspanya	0.76
Kosta Rika	**2.65**	Japonya	**1.26**	İsveç	**1.48**
Çekya	0.44	Kore	**1.32**	İsviçre	**1.00**
Danimarka	0.56	Letonya	**4.47**	Türkiye	**1.41**
Finlandiya	**1.44**	Litvanya	0.52	Birleşik Krallık	0.32
Fransa	0.41	Meksika	0.91		



Şekil 1. 32 OECD ülkesinin 2018-2021 yıllarına ait tarımsal etkinlik skorları
Figure 1. Agricultural efficiency scores of 32 OECD countries for the years 2018–2021

Çizelge 6'da etkin olmayan KVB'lerin etkin duruma gelebilmesi için girdi, çıktı ve istenmeyen çıktılarındaki değişimleri ifade eden gevşek değişkenler, bir diğer ifadeyle girdi tasarrufu (input saving) ve çıktı fazlası (output surplus) yer almaktadır. Etkin olmayan KVB'lerin etkin olabilmesi için ulaşması gereken değerler girdi ve istenmeyen çıktı için sırası ile $x_0^{yeni} = T \times x_0^{eski} - s_i^-$ve $y_0^{yeni,bad} = T \times y_0^{eski,bad} - s_b^b$, çıktı için ise $y_0^{yeni,good} = \frac{y_0^{eski,good}}{T} + s_r^g$ formülü ile hesaplanmaktadır. Örneğin; Etkinlik skoru en düşük ülke olan Polonya'nın etkin duruma gelebilmesi için enerji tüketiminin 0.29*0.74-0.01=0.21 bir diğer ifadeyle 0.29 ton olan enerji tüketimini 0.21 tona düşürmesi gerekmektedir. Aynı zamanda gübre miktarının 0.05*0.74-0.01=0.03 kg, pestisit miktarının 0.15 *0.74-0.03=0.081 ton, tarım alanının 0.04*0.74-0.02=0.0096 hektara düşürmesi gerekirken çıktı değişkeni olan tarımsal üretim değerinin ise 0.14/0.74+0=0.19 dolara çıkartması gerekmektedir. Dahası, istenmeyen çıktı olan sera gazı emisyonunu ise 0.23*0.74-0.12=0.05 tona dramatik şekilde düşürmesi gerekmektedir.

Araştırmada elde edilen bulgular, literatürde tarımsal çevresel etkinlik ve eko-etkinlik üzerine gerçekleştirilen çalışmalara bazı yönleriyle benzerlik göstermektedir. Örneğin, Yılmaz (2025) tarafından yürütülen analizde Türkiye ve İtalya, etkin ülkeler arasında yer almış; ayrıca İsveç, Finlandiya ve Yunanistan çevresel ve ekonomik etkinlik açısından güçlü performans sergilemiştir. Her iki araştırmada da Polonya, Çekya, Slovakya ve Macaristan gibi Doğu Avrupa ülkeleri düşük etkinlik skorlarıyla dikkat çekmiştir. Dirik (2023) tarafından gerçekleştirilen çalışmada da Kore ve İtalya etkin ülkeler arasında yer alırken, Türkiye yüksek etkinlik skoruyla öne çıkmıştır.

Ayrıca İsveç ve Japonya her iki araştırmada da göreceli olarak yüksek performans sergilemiştir. Slovakya ve Çekya ise her iki analizde de düşük etkinlik düzeyine sahip ülkeler olarak öne çıkmıştır. Dirik (2023)'ün analizinde Norveç etkinlik skoru bakımından düşük ülkeler arasında yer almakta olup, bu farklılığın söz konusu çalışmada istenmeyen çıktıların dikkate alınmamasından kaynaklanmış olabileceği değerlendirilmektedir. Mamghaderi ve ark. (2023) tarafından yürütülen araştırmada, Norveç yüksek etkinlik düzeyi ile öne çıkarken Litvanya ve Çekya düşük etkinlik skorlarıyla hem söz konusu çalışmada hem de bu araştırmada benzer konumda yer almıştır. Khezri ve ark. (2023) tarafından gerçekleştirilen çalışmada da Norveç, Lüksemburg ve Birleşik Krallık çevresel ve ekolojik

ayak izi etkinliği açısından en etkin ülkeler olarak belirlenmiştir. Buna karşın, Litvanya, Slovakya, Çekya, Estonya ve ABD en düşük performansa sahip ülkeler arasında yer almıştır. Bu araştırmadaki bulgularla karşılaştırıldığında, Norveç'in yüksek etkinlik düzeyi tutarlıdır. Ayrıca Litvanya, Slovakya ve Çekya her iki analizde de düşük performans sergilemiştir. Ancak, Birleşik Krallık bu çalışmada görece düşük etkinlikte olup, söz konusu farklılık ekolojik ayak izi değişkenlerinin kullanımına ve veri dönemi farklılıklarına bağlanabilir. Domagała (2021)'e göre eko-etkinlik liderleri İtalya, Yunanistan, Kıbrıs, Hollanda ve Portekiz'dir. Bu araştırmada da İtalya ve Yunanistan yüksek etkinlik düzeyine sahip olup, Kıbrıs veri setine dâhil değildir. Buna karşılık Hollanda ve Portekiz bu çalışmada düşük etkinlik skoruna sahiptir. Domagała (2021)'in "eko-etkinlikte geride kalanlar" olarak tanımladığı Polonya, Letonya, Estonya, Çekya, Macaristan, Finlandiya, Slovakya, Belçika ve Litvanya düşük etkinlik ortalamasına sahiptir (0.57'nin altında). Ancak mevcut çalışmada Letonya, Finlandiya ve Belçika etkin ülkeler arasında yer almaktadır. Bu farklılığın temel nedenleri arasında veri dönemi farkı (Domagała, 1990–2019; mevcut çalışma, 2018–2021) ve VZA modelinin göreli etkinlik ölçüm yapısı bir diğer ifade ile etkinlik değerlendirmesinde yer alan ülke veri setinin farklı olması sayılabilir. Moutinho ve ark. (2018) tarafından 27 Avrupa ülkesine ilişkin olarak gerçekleştirilen çalışmada, VZA ve SFA yöntemleri birlikte uygulanmış ve Hollanda, İtalya, Lüksemburg, Kıbrıs ve İspanya en etkin ülkeler olarak belirlenmiştir. Bu araştırmada da İtalya etkin iken Hollanda ve İspanya'nın etkinlik skorları sırasıyla 0.54 ve 0.76'dır. Her iki araştırmada da Litvanya, Çekya, Polonya, Macaristan ve Slovakya düşük etkinlik skorlarına sahip ülkeler arasında yer almaktadır.

Çizelge 6. 2021 yılında etkin olmayan KVB'lerin gevşek değişkenleri
Table 6. Slack variables of inefficient DMUs in 2021

KVB	T (yardımcı karar değişkeni)	Gevşek Değişken s_1^- (enerji tüketimi)	Gevşek Değişken s_2^- (gübre)	Gevşek Değişken s_3^- (pestisit)	Gevşek Değişken s_4^- (tarım alanı)	Gevşek Değişken s_1^g (tarımsal üretim değeri)	Gevşek Değişken s_1^b (sera gazı emisyonu)
Avusturya	0.84	0.03	0.01	0.01	0.00	0.00	0.01
Kanada	0.82	0.40	0.01	0.34	0.08	0.00	0.14
Şili	0.77	0.00	0.06	0.04	0.03	0.00	0.03
Çekya	0.76	0.04	0.00	0.01	0.00	0.00	0.02
Danimarka	0.71	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.04
Fransa	0.81	0.25	0.02	0.19	0.02	0.00	0.17
Almanya	0.79	0.50	0.01	0.13	0.01	0.00	0.17
Macaristan	0.76	0.02	0.00	0.03	0.01	0.00	0.02
İrlanda	0.68	0.00	0.65	0.00	0.00	0.00	0.10
Litvanya	0.74	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.01
Hollanda	0.77	0.01	0.01	0.03	0.00	0.00	0.05
Polonya	0.74	0.12	0.02	0.08	0.02	0.00	0.12
Portekiz	0.74	0.01	0.01	0.03	0.00	0.00	0.02
Birleşik Krallık	0.75	0.19	0.05	0.02	0.02	0.00	0.15

s^-: Girdilerde etkinliğe ulaşmak için gerekli mutlak azalma miktarı; s^b: İstenmeyen çıktının azaltılması gereken miktar, s^g: Çıktıdaki artış miktarı, T: Oransal düzeltme faktörü

SONUÇ ve ÖNERİLER

Tarımsal üretim, ekonomik kalkınmanın temel bileşenlerinden biri olmasının yanı sıra çevresel sürdürülebilirlik üzerinde doğrudan etkiler yaratan stratejik bir sektördür. Artan gıda talebi, doğal kaynakların sınırlılığı ve iklim değişikliğinin giderek belirginleşen etkileri, tarımsal etkinliğin çevresel etkilerle birlikte değerlendirilmesini zorunlu kılmaktadır. Bu bağlamda, sürdürülebilir tarımsal etkinliğin ölçülmesi; hem kaynak kullanımının verimliliğini hem de çevresel performansı eşzamanlı olarak dikkate alan bütüncül bir değerlendirme olanağı sunmaktadır.

Bu çalışmada, 32 OECD ülkesinin 2018–2021 dönemindeki sürdürülebilir tarımsal etkinlikleri, istenmeyen çıktı olan sera gazı emisyonunu doğrudan dikkate alabilen SBM ve S-SBM modelleri ile analiz edilmiştir. Araştırmanın temel amacı, ülkelerin ekonomik ve çevresel performanslarını birlikte değerlendirerek tarımda sürdürülebilirlik düzeylerini karşılaştırmalı biçimde ortaya koymaktır. Bulgular, OECD ülkeleri arasında dikkat çekici etkinlik farklılıklarının bulunduğunu göstermektedir. 2018–2021 yılları arasında Letonya (4.47), İsrail (4.44) ve Kosta Rika (2.65) en yüksek ortalama etkinlik skorlarına sahip ülkeler olarak öne çıkmıştır. Bu ülkelerin yüksek etkinlik performansı, görece daha düşük girdi yoğunluğuyla sürdürülebilir üretim uygulamalarını birlikte kullanabilmelerinden kaynaklanıyor olabilir. Özellikle küçük ve orta ölçekli tarım işletmelerinin yaygın olduğu ülkelerde, girdi kullanımının daha kontrollü olması çevresel yüklerin sınırlı kalmasına katkı sağlayabilmektedir.

Avustralya (1.92), Norveç (1.53), İsveç (1.48), Finlandiya (1.44), Türkiye (1.41), Kore (1.32), Japonya (1.26) da yüksek etkinlik düzeyleriyle sürdürülebilir tarım performansında güçlü bir konum sergilemiştir. Bu ülkelerde çevresel düzenlemelerin görece sıkı olması ve tarımsal üretimde teknolojik yeniliklerin yaygın şekilde uygulanması, girdi kullanımının daha verimli yönetilmesine katkı sağlayan unsurlar arasında değerlendirilebilir. Buna karşın Polonya (0.25), Şili (0.30), Almanya (0.32), Birleşik Krallık (0.32), İrlanda (0.33) ve Portekiz (0.38) gibi ülkelerde etkinlik skorlarının oldukça düşük olduğu görülmektedir. Bu durum, bazı ülkelerde üretim süreçlerinde yüksek girdi kullanımına rağmen çıktının aynı ölçüde artmaması veya çevresel yüklerin görece yüksek kalması ile ilişkilendirilebilir. Özellikle yoğun girdi kullanımına dayalı üretim sistemlerinde enerji, gübre ve pestisit tüketiminin yüksek olması çevresel performansı sınırlayarak etkinlik skorlarını aşağı çekebilmektedir. Çalışma kapsamında Türkiye'nin 2018–2021 dönemine ilişkin sürdürülebilir tarımsal etkinlik düzeyi, ortalama 1.41 olarak hesaplanmıştır. Bu değer, Türkiye'nin OECD ülkeleri arasında görece yüksek etkinlik düzeyine sahip ülkelerden biri olduğunu göstermektedir. Türkiye'nin bu konumunun temelinde, son yıllarda tarımsal üretim teknolojilerinde yaşanan ilerlemeler, yenilenebilir enerji yatırımlarının artması ve tarımsal destek politikalarının çeşitlenmesi yer almış olabilir.

Etkin olmayan tüm ülkelerin etkin olabilmeleri için girdilerini ve istemedikleri çıktılarını azaltmaları ya da çıktılarını artırmaları gerekmektedir. Bu bölümde diğer ülkelere göre girdi ve çıktılarında belirgin şekilde değişimler gerçekleştirmesi gereken ülkelere yer verilmiştir. Çizelge 6'da enerji girdisine ilişkin gevşek değişken değerlerinin (s_1^- - enerji tüketimi) özellikle Almanya, Fransa, Kanada ve Birleşik Krallık için görece yüksek olduğu görülmektedir. Bu durum söz konusu ülkelerde enerji kullanımının etkinlik üzerinde belirleyici bir baskı unsuru olduğunu göstermektedir. Dolayısıyla, bu ülkelerde enerji tüketiminin azaltılması tarımsal etkinliğin artırılmasına katkı sağlayacaktır. Bu durum, fosil yakıt bağımlılığının azaltılması ve güneş, rüzgâr, hidroelektrik, biyokütle ile jeotermal gibi yenilenebilir enerji kaynaklarının tarım sektöründe daha yaygın kullanılmasının önemini vurgulamaktadır. Bu doğrultuda, fosil yakıt sübvansiyonlarının gözden geçirilmesi ve tarımsal mekanizasyonda elektrifikasyonun teşvik edilmesi enerji girdisindeki fazla kullanımın azaltılmasına katkı sağlayabilir. Buna ek olarak, hükümetler enerji verimliliğini artırmak için AR-GE yatırımlarını teşvik ederek enerji tasarrufu sağlayan teknolojilere yönelik destek programları geliştirebilir. Örneğin, tarım makineleri üreticileri; enerji tasarrufu sağlayan, tarım arazilerinin verimliliğini koruyan ve toprak yapısını iyileştiren ileri teknolojiye sahip ekipmanlar geliştirmeye teşvik edilebilir. Çiftçilere bu tür makine ve ekipmanların temini için yeşil kredi olanaklarının (düşük veya sıfır faiz oranlı krediler) sağlanması da uygulanabilir bir stratejidir. Diğer bir girdi olan gübre kullanımına ilişkin sonuçlara bakıldığında, Çizelge 6'da özellikle İrlanda için gübre girdisine ait gevşek değişken değerinin (s_2^- - gübre) oldukça yüksek olduğu dikkat çekmektedir. Bu durum söz konusu ülkede gübre kullanımının etkinlik açısından önemli bir iyileştirme alanı olduğunu göstermektedir. Bunun yanı sıra Şili ve Birleşik Krallık'ta da görece yüksek bir azaltım gereksinimi bulunmaktadır. Yoğun hayvancılıkla bilinen İrlanda'da gübre yönetim planlarının uygulanması, organik gübre kullanımının teşvik edilmesi ve hassas tarım teknolojileri ile gübrelemenin optimize edilmesi, gübre girdisine ilişkin fazla kullanımın azaltılmasına katkı sağlayabilir. Benzer şekilde, pestisit girdisi (s_3^- - pestisit) dikkate alındığında, Kanada, Fransa, Almanya ve Polonya'nın daha yüksek oranda düşüş sağlaması gerektiği dikkat çekmektedir. Bilindiği üzere pestisitler, toprak ve su kirliliğine yol açarak insan sağlığı üzerinde doğrudan ve dolaylı olumsuz etkiler yaratmaktadır. Bu bağlamda, doğal gübreler (ahır gübresi, kompost, yeşil gübre) ve organik maddece zenginleştirilmiş toprak iyileştiricilerin kullanımının zorunlu olduğu organik tarım uygulamaları ile kimyasal gübrelerin yalnızca kontrollü biçimde kullanılmasına izin veren iyi tarım uygulamalarının yaygınlaştırılması ve bu yöntemlerle elde edilen ürünlerin pazarlanmasının çeşitli fonlarla desteklenmesi önerilebilir. Tarım alanı girdisine ilişkin sonuçlara göre (s_4^- - tarım alanı), bazı ülkelerde (Kanada, Fransa ve Almanya) tarım alanlarının azaltılmasının etkinlik artışıyla ilişkili görünmesine rağmen, nüfus artışı ve gıda güvenliği gereksinimleri dikkate alındığında bu durumun pratikte uygulanabilir olmadığı değerlendirilmektedir. Tarım alanı azaltılması yerine bu ülkelerin daha etkin bir arazi kullanımı yapısına yönelmeleri gerekmektedir. Ekim nöbeti, verimli sulama teknolojileri, besin yakalayıcı örtü bitkileri (catch-cover crops) ve akıllı sulama sistemleri gibi yenilikçi yaklaşımlar daha uygun stratejiler olarak öne çıkmaktadır. Bu doğrultuda, politika yapıcılar açısından kaynak etkinliğini artırmaya yönelik bilgi-temelli tarım uygulamalarının yaygınlaştırılması önem arz etmektedir. Bunların yanı sıra, yerel hükümetlerin tarım sektöründeki yatırımları artırmak amacıyla finansal destek mekanizmalarını güçlendirmesi ve çiftçilere finansal teşvikler sağlaması sürdürülebilir üretimi destekleyecektir. Ayrıca, kentleşmenin tarım üzerindeki etkilerinin izlenmesi ve kırsal alanların modernizasyonunu teşvik eden politikaların geliştirilmesi önerilebilir. Bu politikaların etkili biçimde uygulanabilmesi, çiftçilerin eğitim düzeyiyle de yakından ilişkilidir. Bu bağlamda, çiftçilere yönelik eğitim programlarının artırılması sürdürülebilir üretim hedeflerine ulaşmada önemli bir araçtır. Eğitimli ve nitelikli iş gücünün tarım sektörüne katılımı, sürdürülebilir teknolojilerin yaygınlaştırılması ve enerji tasarrufu sağlayan yeniliklerin benimsenmesi açısından kritik öneme sahiptir. Örneğin, AB ülkelerinde Ortak Tarım Politikası (CAP) kapsamında, düşük karbonlu tarıma geçen çiftçiler yapılan

dönüşüm maliyetleri için tazminat talep edebilmektedir. Sera gazı emisyonu bakımından ise (s_1^b - sera gazı emisyonu) Fransa, Almanya, Kanada ve Polonya'nın çevresel yüklerini önemli ölçüde azaltmaları etkinliğe ulaşmaları açısından kritik görünmektedir. Girdi ve istenmeyen çıktı azaltımının yanı sıra bazı ülkelerde temel gereklilik girdileri dramatik biçimde azaltmak değil, üretim değerini artırmaktır. Özellikle Avusturya, Çekya, Danimarka, Macaristan, Litvanya ve Portekiz için mevcut kaynak yapısı büyük ölçüde korunarak üretim çıktısının iyileştirilmesi etkin sınıra yaklaşmada daha belirleyici görünmektedir. Genel olarak sonuçlar, etkin olmayan ülkelerin büyük bölümünde sorunun yalnızca üretim yetersizliğinden değil, aynı zamanda yüksek girdi yoğunluğundan ve çevresel yükten kaynaklandığını göstermektedir. Dolayısıyla etkinliğe ulaşmak için kaynak kullanımının rasyonelleştirilmesi ve sera gazı emisyonlarının belirgin biçimde azaltılması temel politika önceliği olarak öne çıkmaktadır.

SBM ve S-SBM modellerinin uygulanması, istenmeyen çıktıları doğrudan analize entegre ederek sürdürülebilir tarım performansının güvenilir ve karşılaştırılabilir biçimde ölçülmesine olanak tanımış, ayrıca ülkeler arasında tam sıralama yapılabilmesini sağlamıştır. Bu yönüyle araştırma, OECD ülkeleri arasında sürdürülebilir tarımsal etkinlik farklarının ortaya konmasına katkı sunmaktadır. Buna karşın, analiz kapsamında kullanılan değişkenler ekonomik ve çevresel göstergelerle sınırlıdır; sosyoekonomik unsurlar (örneğin çiftçi eğitim düzeyi, kırsal kalkınma desteği, teknolojik adaptasyon gibi) modele dâhil edilmemiştir. Bu durum, sürdürülebilir tarımsal etkinliğin sosyal boyutlarının değerlendirilmesinde belirli kısıtlar yaratmaktadır. Bunun yanı sıra, çalışma belirli bir dönem için gerçekleştirilen etkinlik ölçümüne dayanmaktadır ve zaman içerisindeki verimlilik değişimlerinin hangi faktörlerden kaynaklandığını ayrıntılı biçimde ayırt etmeye yönelik bir analiz içermemektedir. Son olarak, araştırmanın yalnızca OECD ülkelerini kapsaması elde edilen bulguların farklı üretim yapısına ve kurumsal koşullara sahip ülke gruplarına doğrudan genellenmesini sınırlayabilir. Gelecek çalışmalarda sürdürülebilir tarımsal etkinliğin belirleyicilerinin daha kapsamlı biçimde analiz edilebilmesi amacıyla sosyoekonomik değişkenlerin modele dâhil edilmesi yararlı olabilir. Ayrıca etkinlik düzeylerinde zaman içerisinde meydana gelen değişimlerin daha ayrıntılı biçimde incelenmesi ve bu değişimlerin olası belirleyicilerinin ekonometrik yaklaşımlar ile değerlendirilmesi, sürdürülebilir tarım politikalarının daha hedefe yönelik biçimde tasarlanmasına katkı sağlayacaktır.

Araştırmacıların Katkı Oranı Beyan Özeti

Yazarlar makaleye eşit oranda katkı sağlamış olduklarını beyan eder.

Çıkar Çatışması Beyanı

Makale yazarları aralarında herhangi bir çıkar çatışması olmadığını beyan eder.

KAYNAKLAR

Andersen, P., & Petersen, N. (1993). A procedure for ranking efficient units in data envelopment analysis. *Management Science, 39*(10), 1179-1297.

André, F. J., Buendía, A., & Santos-Arteaga, F. J. (2024). Efficient water use and reusing processes across Spanish regions: A circular data envelopment analysis with undesirable inputs. *Journal of Cleaner Production*, *434,* 139929.

Aydın, U., Kaya, G., Karadayı, M. A., Ülengin, F., & Ülengin, B. (2023). OECD ülkelerinin tarımsal ticaret performansının değerlendirilmesi: Dinamik bir model önerisi. *Endüstri Mühendisliği*, *34*, 110–136.

Aydın Eryılmaz , G., & Kılıç, O. (2018). Türkiye'de sürdürülebilir tarım ve iyi tarım uygulamaları. *KSÜ Tarım ve Doğa Dergisi, 21*(4), 624-631.

Banker, R., Charnes, A., & Cooper, W. (1984). Some models for estimating technical and scale inefficiencies in data envelopment analysis. *Management Science, 30*(9), 1078-1092.

Charnes, A., Cooper, W., & Rhodes, E. (1978). Measuring the efficiency of decision making units. *European Journal of Operational Research, 2*(6), 429-444.

Chen, Y., Hu, S., Lu, W., Zhu, W., Pan, Y., & Shen, Y. (2025). Improvement of the method for calculating agricultural energy efficiency based on the three-stage Data Envelopment Analysis. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, *33*(1), 153–165

Czyżewski, B., & Kryszak, Ł. (2025). Assessing potential reductions of agricultural GHG in countries with different land productivities: Long-term integrated efficiency in DEA hybrid meta-frontier model. *Plos One, 20*(2), e0315571.

Dirik, C., Sahin, S., & Atıcı, K. B. (2023). Veri zarflama analizi ile etkinlik ölçümü ve parçalı elastiklik analizi: OECD ülkelerinin tarımsal performansları üzerine bir uygulama. *Verimlilik Dergisi*, *57*(1), 1-22.

Domagała, J. (2021). Economic and environmental aspects of agriculture in the EU Countries. *Energies, 14*(22), 7826.

Djuraeva, M., Bobojonov, I., Kuhn, L., & Glauben, T. (2023). The impact of agricultural extension type and form on technical efficiency under transition: An empirical assessment of wheat production in Uzbekistan. *Economic Analysis and Policy*, *77*, 203–221.

Ekiz, M.K, & Şakar, C. T. (2020). A new approach to rank all alternatives in data envelopment analysis: ASES. *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, *35*(2), 683-695.

Ekiz Bozdemir, M., Avcı Azkeskin, S., & Akman, G. (2024). Environmental efficiency analysis to ranking system for all units with undesirable. *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, 39*(4), 2435-2445.

Ganda, F. (2023). The influence of agricultural policy on carbon emissions in selected OECD countries. *Heliyon, 9*(9), e19881.

Gerdessen, J. C., & Pascucci, S. (2013). Data Envelopment Analysis of sustainability indicators of European agricultural systems at regional level. *Agricultural Systems, 118*, 78-90.

Gürkan, H., Bayraktar, N., & Bulut, H. (2017). İklim değişikliği nedeniyle artan kuraklığın ayçiçeği ve pamuk verimi üzerine etkileri. *KSÜ Doğa Bilimleri Dergisi, 20*, 216-221.

Han, G., Xu, J., Zhang, X., & Pan, X. (2024). Efficiency and driving factors of agricultural carbon emissions: A study in Chinese state farms. *Agriculture*, *14*(9), 1454.

Heidari, M. D., Turner, I., Ardestani-Jaafari, A., & Pelletier, N. (2021). Operations research for environmental assessment of crop-livestock production systems. *Agricultural Systems, 193*, 103208.

Ho, T. Q., Hoang, V. N., & Wilson, C. (2021). Trade-off analysis of cost and nutrient efficiency of coffee farms in vietnam: A more generalised approach. *Journal of Environmental Management, 279*, 111601.

Hoang, V.-N., & Alauddin, M. (2012). Input-orientated data envelopment analysis framework for measuring and decomposing economic, environmental and ecological efficiency: an application to OECD agriculture. *Environmental and Resource Economics, 51*, 431–452.

Khezri, M., Mamghaderi, M., Razzaghi, S., & Heshmati, A. (2023). Comprehensive environmental assessment index of ecological footprint. *Environmental Management, 71*(1), 465–482.

Kwiatkowski, C. A., Pawłowska, M., Harasim, E., & Pawłowski, L. (2023). Strategies of climate change mitigation in agriculture plant production—a critical review. *Energies, 16*(10), 4225.

Kyshakevych, B., Melnyk, O., Maksyshko, N., Maturin, Y., & Kotyk, Y. (2025). Systemic issues and efficiency reserves in EU agriculture: A slack-based DEA approach. *Agricultural and Resource Economics: International Scientific E-Journal*, *11*(1), 46–68.

Li, H., Fang, K., Yang, W., Wang, D., & Hong, X. (2013). Regional environmental efficiency evaluation in China: Analysis based on the Super-SBM model with undesirable outputs. *Mathematical and Computer Modelling, 58*, 1018–1031.

Li, D., Wang, M. Q., & Lee, C. (2020). The waste treatment and recycling efficiency of industrial waste processing based on two-stage data envelopment analysis with undesirable inputs. *Journal of Cleaner Production*, *242*, 118279.

Lin, B., & Xu, B. (2018). Factors affecting CO_2 emissions in China's agriculture sector: A quantile regression. *Renewable and Sustainable Energy Reviews, 94*, 15-27.

Liu , J., Lu, L., Lu, W.M., & Lin, B. (2010). Data envelopment analysis 1978–2010: A citation-based literature survey. *Omega, 41*(1), 3-15.

Liu, W. B., Meng, W., Li, X. X., & Zhang, D. Q. (2010). DEA models with undesirable inputs and outputs. *Annals of Operations Research*, 173(1), 177-194.

Mamghaderi, M., Mamkhezri, J., & Khezri, M. (2023). Assessing the environmental efficiency of OECD countries through the lens of ecological footprint indices. *Journal of Environmental Management, 338*, 117796.

March, M. D., Toma, L., Stott, A. W., & Roberts, D. (2016). Modelling phosphorus efficiency within diverse dairy farming systems– pollutant and non-renewable resource?. *Ecological indicators, 69*, 667-676.

Menten, C., Özal Saraç, N., & Çekiç, B. (2023). OECD ülkelerindeki organik tarım üretim etkinliğinin sürdürülebilir kalkınma hedefleri çerçevesinde değerlendirilmesi. *Hacettepe Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi*, *41*(Tarım Özel Sayısı), 77–97.

Moutinho, V., Madaleno, M., Macedo, P., Robaina, M., & Marques, C. (2018). Efficiency in the European agricultural sector: Environment and resources. *Environmental Science and Pollution Research, 25*(1), 17927–17941.

Moutinho, V., Robaina, M., & Macedo, P. (2018). Economic-environmental efficiency of European agriculture-a generalized maximum entropy approach. *Agricultural Economics, 64*(10), 423–435.

Muren, X., Sun, X., Yao, J., & Cao, L. (2025). Evaluating agricultural efficiency and sustainable development in China. *Scientific Reports*, *15*, 23047.

OECD, (1988). Eco-efficiency. Paris: Organisation for Economic Co-operation and Development. https://www.oecd.org/content/dam/oecd/en/publications/reports/1998/03/eco-

efficiency_g1gh9ad5/9789264040304-en.pdf.

OECD, (2021). Agricultural Policy Monitoring and Evaluation 2021: Addressing the Challenges Facing Food Systems, OECD Publishing, Paris. https://doi.org/10.1787/2d810e01-en.

Rashidi, S. F., Olfati, M., Mirjalili, S., Platoš, J., & Snášel, V. (2025). A comprehensive DEA-based framework for evaluating sustainability and efficiency of vehicle types: Integrating undesirable inputs and social-environmental indicators. *Cleaner Engineering and Technology*, *27*, 100989.

Repar, N., Jan, P., Dux, D., Nemecek, T., & Doluschitz, R. (2017). Implementing farm-level environmental sustainability in environmental performance indicators: A combined global-local approach. *Journal of Cleaner Production, 140*, 692-704.

Rodríguez-Fernández, M. P., Hidalgo-González, C., & Pérez-Neira, D. (2025). A comprehensive regional approach to eco-efficiency in Spanish agriculture over time. *Agronomy*, *15*(3), 621.

Sabiha, N. E., Salim, R., & Rahman, S. (2017). Eco-efficiency of high-yielding variety rice cultivation after accounting for on-farm environmental damage as an undesirable output: An empirical analysis from Bangladesh. Australian *Journal of Agricultural and Resource Economics, 61*(2), 247-264.

Selvanathan, S., Jayasinghe, M. S., Selvanathan, E. A., Abbas, S. A., & Iftekhar, M. S. (2023). Energy consumption, agriculture, forestation and CO_2 emission nexus: an application to OECD countries. *Applied Economics, 55*(37), 4359-4376.

Sharma, S., & Majumdar, K. (2021). Efficiency of rice production and CO_2 emissions: A study of selected Asian countries using DDF and SBM-DEA. *Journal of Environmental Planning and Management, 64*(12), 2133–2153.

Song, J., & Chen, X. (2019). Eco-efficiency of grain production in China based on water footprints: A stochastic frontier approach. *Journal of Cleaner Production, 236*, 117685.

Streimikis, J., & Saraji, M. K. (2022). Green productivity and undesirable outputs in agriculture: A systematic review of DEA approach and policy recommendations. *Economic Research-Ekonomska Istraživanja, 35*(1), 819-853.

Tang, W., Zhou, F., Peng, L., & Xiao, M. (2023). Does agricultural productive service promote agro-ecological efficiency? Evidence from China. *Thermal Science*, *27*(3A), 2109–2118.

Tekiner-Moğulkoç, H., & Şişman, Z. (2022). Using malmquist TFP index for evaluating agricultural productivity: Agriculture of Türkiye NUTS2 regions. *Sigma Journal of Engineering and Natural Sciences, 40*(3), 513–528.

Toma, P., Miglietta, P. P., Zurlini, G., Valente, D., & Petrosillo, I. (2017). A non-parametric bootstrap-data envelopment analysis approach for environmental policy planning and management of agricultural efficiency in EU countries. *Ecological Indicators, 83*, 132-143.

Tone, K. (2001). A slacks-based measure of efficiency in data envelopment analysis. *European Journal of Operational Research, 130*(3), 498-509.

Tone, K. (2002). A slacks-based measure of super-efficiency in data envelopment analysis. *European Journal of Operational Research, 143*, 32–41.

Tone, K. (2004). *Dealing with undesirable outputs in DEA: a slacks-based measure (SBM) approach*. Toronto: Presentation at NAPW III.

Wang, Q., & Wang, K. (2022). The synergistic and trade off effects of economic environmental health improvement in agriculture sector: evidence from China. *Environmental Science and Pollution Research, 29*, 52590–52604.

Wang, L.-F., & Zhang, X.-F. (2025). Analyze agricultural efficiency and influencing factors based on the three-stage DEA model and Malmquist index. *Frontiers in Earth Science*, *13*, 1633859.

Wang, G., Zhao, M., Zhao, B., Liu, X., & Wang, Y. (2025). Reshaping agriculture eco-efficiency in China: From greenhouse gas perspective. *Ecological Indicators, 172*, 113268.

Watanabe, M., & Tanaka, K. (2007). Efficiency analysis of Chinese industry: A directional distance function approach. *Energy Policy, 35*, 6323–6331.

Wojcik, V., Dyckhoff, H., & Gutgesell, S. (2017). The desirable input of undesirable factors in data envelopment analysis. *Annals of Operations Research*, *259*(1), 461-484.

Yılmaz, D. İ. (2025). Eco-efficiency in the agricultural sector: A cross-country comparison between the European Union and Türkiye. *Sustainability*, *17*(13), 5713.

Xu, B., & Lin, B. (2017). Factors affecting CO_2 emissions in China's agriculture sector: Evidence from geographically weighted regression model. *Energy Policy, 104*, 404-41.