

ÇUKUROVA ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

DOKTORA TEZİ

Bozulabilir Ürünler İçin Tedarik Zinciri Optimizasyonu

Şeyda TAŞKINIRMAK

Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı

Ekim, 2025

ÇUKUROVA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

DOKTORA TEZ ONAYI

Bozulabilir Ürünler İçin Tedarik Zinciri Optimizasyonu

Şeyda TAŞKINIRMAK

Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı

Bu Doktora Tezi 03/10/2025 Tarihinde Aşağıdaki Jüri Üyeleri Tarafından Değerlendirilmiş ve Oy Birliği ile Kabul Edilmiştir.

Jüri : Prof. Dr. Ali KOKANGÜL (Danışman)
: Prof. Dr. Oya YÜREĞİR
: Doç. Dr. Melik KOYUNCU
: Doç. Dr. Cansu DAĞSUYU
: Dr. Öğr. Üyesi Fikri EGE

**Bu Tez Fen Bilimleri Enstitüsü, Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalında Hazırlanmıştır.
Tez No:**

Prof. Dr. Sadık DİNÇER
Enstitü Müdürü

Not: Bu tezde kullanılan özgün ve başka kaynaktan yapılan bildirişlerin, çizelge ve fotoğrafların kaynak gösterilmeden kullanımı, 5846 sayılı Fikir ve Sanat Eserleri Kanunundaki hükümlere tabidir.

İÇİNDEKİLER

ÖZ	I
ABSTRACT.....	II
TEŞEKKÜR.....	III
ÇİZELGELER DİZİNİ	V
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	VI
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	VII
1. GİRİŞ	1
1.1. Problemin Tanımı	2
1.2. Çalışmanın Amacı.....	3
1.3. Çalışmanın Adımları.....	4
1.4. Çalışmanın Orijinal Katkıları.....	5
1.5. Çalışmanın Organizasyonu	5
2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR.....	7
2.1. Bozulabilir Ürünlerde Tedarik Zinciri	7
2.2. Bozulabilir Ürünlerde Yeşil Tedarik Zinciri.....	10
2.3. Bozulabilir Ürünlerde Taşıma Modu Seçimi.....	12
2.4. Meyve ve Sebzelerde Görüntü İşleme ile Kalite Değerleme	14
2.5. Önceki Çalışmaların Değerlendirilmesi.....	16
3. MATERYAL VE METOT	19
3.1. Materyal.....	19
3.2. Bahçe Kalite Skorlarının Elde Edilmesi	20
3.1.1. Görüntü İşleme ile Bahçe Kalite Skoru Elde Edilmesi	21
3.1.2. Bulanık Mantık İle Bahçe Kalite Skoru Elde Edilmesi	25
3.2. Matematiksel Model ve Parametreler	26
3.2.1. Derin Öğrenme	31
3.2.2. Bulanık Mantık.....	36
3.2.3. Matematiksel Programlama.....	39
4. BULGULAR.....	49
4.1. Bahçe Kalite Skorlarının Belirlenmesi.....	49
4.1.1. Görüntü İşleme ile Bahçe Kalite Skorlarının Belirlenmesi	49
4.1.2. Bulanık Mantık İle Bahçe Kalite Skorlarının Belirlenmesi.....	53
4.2. Matematiksel Model Yaklaşımı	60
4.2.1. Tek Amaçlı Matematiksel Modelleme Yaklaşımı	60
4.2.2. Çok Amaçlı Matematiksel Modelleme Yaklaşımı.....	62
4.3. Duyarlılık Analizi	74

5. SONUÇLAR ve ÖNERİLER.....	77
KAYNAKLAR	79
ÖZGEÇMİŞ	85
EK A. Bulanık Mantık Yönteminde Kullanılan Kural Tabanları	89



**ÇUKUROVA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

DOKTORA TEZİ

Bozulabilir Ürünler İçin Tedarik Zinciri Optimizasyonu

Şeyda TAŞKINIRMAK

Danışman: Prof. Dr. Ali KOKANGÜL

Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı

ÖZ

Türkiye'nin taze meyve ihracatı, ürünlerin bozulabilir yapısı ve yüksek kalite beklentileri nedeniyle maliyet, teslimat süresi, karbon emisyonu ve tazelik gibi birbiriyle çelişen hedeflerin dengelenmesini gerektirmektedir. Bu tezde, narenciye ve diğer seçili taze meyveler için sürdürülebilir bir tedarik zinciri optimizasyonu amacıyla bütünlük bir yaklaşım geliştirilmiştir. Öncelikle seçilmesi olası bahçelerin kalite skorları iki yöntemle belirlenmiştir. Yeterli görüntü verisi bulunan meyveler için derin öğrenme tabanlı sınıflandırma (MobileNetV2, ResNet50, DenseNet121) ve veri yetersizliğinde renk, yüzey durumu ve şekil gibi özellikleri kullanan bulanık mantık çıkarımı uygulanmıştır. Ardından, elde edilen kalite skorları; kapasite, talep, taşıma süresi, maliyet ve karbon emisyon verileriyle birlikte çok amaçlı bir matematiksel modelde kullanılmıştır. Model, maliyet, karbon emisyonu, teslimat süresi ve elde kalan ürün miktarını minimize ederken tazelik ve kaliteli ürün miktarını maksimize etmeyi hedeflemektedir. Ayrıca bozulma oranları stokastik olarak dikkate alınmış ve havayolu taşımacılığı için kilograma bağlı kademeli maliyet yapısı eklenmiştir. Model, Türkiye'den Avrupa ve Kuzey Amerika'daki 11 pazara taze meyve ihracatı yapmakta olan büyük bir işletmeden alınan gerçek veriler kullanılarak kurulmuştur. Kurulan matematiksel modellerin taşıma modu tercihleri, maliyet ve emisyon değerlerinin değişimine göre duyarlılık analizleri yapılmıştır. Sonuçta kalite odaklı çözümlerin dengeli ve sürdürülebilir optimum kararlar sunduğu ortaya konmuştur.

Anahtar Kelimeler: Sürdürülebilir tedarik zinciri, Çok amaçlı optimizasyon, Bulanık mantık, Görüntü İşleme, Karbon Emisyonu

CUKUROVA UNIVERSITY
INSTITUTE OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

PhD THESIS

Supply Chain Optimization for Perishable Products

Şeyda TAŞKINIRMAK

Advisor: Prof. Dr. Ali KOKANGÜL

Department of Industrial Engineering

ABSTRACT

Turkey's fresh fruit exports require balancing multiple conflicting objectives such as cost, delivery time, carbon emissions, and freshness due to the perishable nature of the products and the high quality expectations of target markets. In this thesis, an integrated approach has been developed to optimize the sustainable supply chain for citrus and other selected fresh fruits. First, the quality scores of potential orchards were determined using two complementary methods: deep learning-based classification models (MobileNetV2, ResNet50, DenseNet121) for products with sufficient image data, and a fuzzy logic inference system utilizing attributes such as color, surface condition, and shape when data availability was limited. Subsequently, the obtained quality scores were integrated into a multi-objective mathematical model along with capacity, demand, transportation time, cost, and carbon emission data. The model aims to maximize freshness and the quantity of high-quality products while minimizing cost, carbon emissions, delivery time, and the amount of unsold products. Moreover, stochastic deterioration rates were incorporated into the model, and a weight-dependent piecewise cost structure was implemented for air transportation. The model was constructed using real data from a major company exporting fresh fruit from Turkey to 11 markets in Europe and North America. Sensitivity analyses were conducted to examine the impacts of changes in transportation mode preferences, costs, and emission levels. The results demonstrate that quality-oriented solutions provide balanced and sustainable optimal decisions.

Key Words: Sustainable supply chain, Multi-objective optimization, Fuzzy logic, Image processing, Carbon emissions

İthaf

Canım oğlum Enes'e

Varlığın, sevgin ve gülüşlerin en zor anlarımda bana güç ve ilham kaynağı oldu. Bu çalışmayı, sana duyduğum sonsuz sevgiyle sana adıyorum.

TEŞEKKÜR

Tez çalışmam süresince değerli bilgi, deneyim ve yönlendirmeleriyle bana ışık tutan, akademik birikimim üzerinde derin katkıları bulunan sayın danışmanım Prof. Dr. Ali KOKANGÜL' e en içten teşekkürlerimi sunarım. Akademik hayatımda hem bilgileri hem de tecrübeleri ve ne zaman zorlansam manevi desteğiyle hep yanımda olan kıymetli hocam Doç. Dr. Cansu DAĞSUYU' na çok teşekkür ederim.

Ayrıca, tez jürimde yer alarak kıymetli zamanlarını ayıran, yapıcı eleştirileri ve değerli katkılarıyla çalışmamın gelişmesine büyük destek veren saygıdeğer jüri üyeleri Prof. Dr. Oya YÜREGİR, Doç. Dr. Melik KOYUNCU, Doç. Dr. Cansu DAĞSUYU ve Dr. Öğr. Üyesi Fikri EGE' ye teşekkür ederim.

Hayatım boyunca her zaman bana inanan, maddi ve manevi desteklerini esirgemeyen annem Mehtap ÇELİKCAN, babam Mahmut ÇELİKCAN, kardeşlerim Şeyma, Seher ve Ceylin'e şükran borçluyum.

Tüm süreçlerimde yanımda olan desteğini esirgemeyen yol arkadaşım kıymetli eşim Cemil'e çok teşekkür ediyorum. Doktora sürecimin en güzel hediyesi canım oğlum Enes'e sevgisi, neşesi, varlığı ve hayatıma kattığı tüm güzellikler için sonsuz teşekkürler.

Tez sürecim boyunca beni motive eden tüm arkadaşlarıma destekleri için çok teşekkür ederim.

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 3.1. Temel Eğitim Parametreleri.....	23
Çizelge 3.2. Modelde Kullanılan Temel Kümeler ve İndeksler	27
Çizelge 3.3. Bahçe-Ürün Kapasiteleri (kg).....	27
Çizelge 3.4. Ülke-ÜrünTalepleri (kg).....	28
Çizelge 3.5. Ürünlerin Min Tazelik ve Maks Taşıma Süresi.....	28
Çizelge 3.6. Ülkelerin Taşıma Moduna Göre Mesafeleri (km)	29
Çizelge 3.7. Taşıma Modu Bekleme Süreleri.....	29
Çizelge 3.8. Havayolu Blokları ve Maliyetleri	30
Çizelge 3.9. Taşıma Modu Karbon Emisyon Katsayıları	30
Çizelge 3.10. F1 Skoru Sınıflandırma Aralığı	35
Çizelge 4.1. Mimarilerin Karşılaştırılması	50
Çizelge 4.2. Test Kümesi Sınıf Bazlı Performans Ölçütleri	50
Çizelge 4.3. Bahçe Bazında Sınıf Dağılımları, KS ve AKS Değerleri	52
Çizelge 4.4. Üyelik Fonksiyon Değerleri	54
Çizelge 4.5. Tek Amaçlı ve Önceliklendirmesiz Hedef Programlama Çözümü Karşılaştırması ...	63
Çizelge 4.6. Tek Amaçlı ve Ağırlıklı Hedef Programlama Çözümü Karşılaştırması.....	67
Çizelge 4.7. Tek Amaçlı Çözümler ve Senaryo 1 Karşılaştırması	71
Çizelge 4.8. Tek Amaçlı Çözümler ve Senaryo 2 Karşılaştırması	72
Çizelge 4.9. Duyarlılık Analizi Sonuçları.....	75

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 3.1. Çalışmanın İş Akış Diyagramı	20
Şekil 3.2. Sağlıklı Portakal Görüntüsü	21
Şekil 3.3. Kara Lekeli Portakal Görüntüsü	21
Şekil 3.4. Yaralı Portakal Görüntüsü	22
Şekil 3.5. Yeşil Portakal Görüntüsü	22
Şekil 3.6. Portakal Görüntülerinin Alınması	22
Şekil 3.7. Üçgen Üyelik Fonksiyonu	37
Şekil 3.8. Yamuk Üyelik Fonksiyonu	37
Şekil 4.1. Derin Öğrenme Tabanlı Görüntü Sınıflandırma ve Bahçe Kalite Skoru Üretim Süreci	49
Şekil 4.2. Test Kümesi Karışıklık Matrisi	51
Şekil 4.3. Bahçe ve Ürün Bazında Kalite Skorlarının Isı Haritası	56
Şekil 4.4. Nar- Bahçe 5 için Üyelik Fonksiyon Grafiği	56
Şekil 4.5. Nar-Bahçe 2 için Üyelik Fonksiyon Grafiği	57
Şekil 4.6. Limon- Bahçe için 5 Üyelik Fonksiyon Grafiği	57
Şekil 4.7. Limon- Bahçe 2 için Üyelik Fonksiyon Grafiği	58
Şekil 4.8. Şeftali- Bahçe 4 için Üyelik Fonksiyon Grafiği	58
Şekil 4.9. Şeftali- Bahçe 7 için Üyelik Fonksiyon Grafiği	59
Şekil 4.10. Kayısı- Bahçe 1 için Üyelik Fonksiyon Grafiği	59
Şekil 4.11. Kayısı- Bahçe 2 için Üyelik Fonksiyon Grafiği	60
Şekil 4.12. NGP Kayısı, Limon ve Nar için Karar Değişkeni ($xijkp$) Sonuçları	64
Şekil 4.13. NGP Portakal ve Şeftali için Karar Değişkeni ($xijkp$) Sonuçları	65
Şekil 4.14. NGP İle Toplam Taşınan Miktarın Taşıma Modlarına Göre Dağılımı	66
Şekil 4.15. WGP Kayısı, Limon ve Nar için Karar Değişkeni ($xijkp$) Sonuçları	68
Şekil 4.16. WGP Portakal ve Şeftali için Karar Değişkeni ($xijkp$) Sonuçları	69
Şekil 4.17. WGP İle Toplam Taşınan Miktarın Taşıma Modlarına Göre Dağılımı	70
Şekil 4.18. Senaryo 1 ile Ülke- Ürün Bazında Seçilen Taşıma Modları	71
Şekil 4.19. Senaryo 1 ile Toplam Taşınan Miktarın Taşıma Modlarına Göre Dağılımı	72
Şekil 4.20. Senaryo 2 ile Ülke- Ürün Bazında Seçilen Taşıma Modları	73
Şekil 4.21. Senaryo 2 ile Toplam Taşınan Miktarın Taşıma Modlarına Göre Dağılımı	74

SİMGELER VE KISALTMALAR

AKS	: Ağırlıklı Kalite Skoru
CNN	: Evrişimli Sinir Ağı
FAO	: Birleşmiş Milletler Gıda ve Tarım Örgütü
GA	: Genetik Algoritma
GPU	: Grafik İşlem Birimi
HSI	: Ton, Doygunluk, Yoğunluk
HSL	: Renk Tonu, Doygunluk, Parlaklık
ISM	: Yorumlayıcı Yapısal Modelleme
KS	: Kalite Skoru
MICMAC	: Çapraz Etki Matrisi – Sıralamaya Uygulamalı Çarpım
MILP	: Karma-Tam sayılı Doğrusal Programlama
NGP	: Önceliklendirmesiz Hedef Programlama
NSGA-II	: Baskın Olmayan Sıralama Genetik Algoritması II
OWA	: Sıralı Ağırlıklı Ortalama
RFID	: Radyo Frekansı ile Tanımlama
RGB	: Kırmızı, Yeşil, Mavi
RMN	: Risk Azaltma Numarası
RPN	: Risk Öncelik Numarası
TISM	: Toplam Yorumlayıcı Yapısal Modelleme
TPU	: Tensör İşlem Birimi
VNS	: Değişken Komşuluk Arama
WGP	: Ağırlıklı Hedef Programlama

1. GİRİŞ

Son yıllarda, tedarik zinciri yönetimi ve lojistik endüstrisinin gelişmesiyle birlikte, genel olarak tarımsal ürün tedarik zinciri ve özel olarak meyve sebze zinciri, birçok ülkenin ekonomik kalkınmasının çok önemli ve stratejik bir parçası olarak kabul edilmiştir (Nguyen ve ark., 2020). Gıda ve Tarım Örgütü'nün (FAO) bir raporuna göre, 2018'de Çin, meyve üretiminde dünya çapında lider ülkeler listesinde 243.592 milyon ton/yıl civarında bir üretim ile ilk sırada yer alırken, Türkiye 23.599 milyon ton meyve sebze üretimiyle 5. sırada yer almaktadır (FAO, 2020).

Meyve-sebze tedarik zinciri; üretimin gerçekleştiği bahçelerden konsolidasyon merkezlerine ve oradan da ihracat pazarlarına farklı taşıma modları (karayolu, denizyolu, havayolu) aracılığıyla ulaştırılan karmaşık bir yapıya sahiptir. Bu yapının etkin yönetimi, üretim bölgelerinin coğrafi dağılımı, ihracat pazarlarının çeşitliliği ve taşıma seçeneklerinin maliyet, süre ve kalite üzerindeki farklı etkileri nedeniyle stratejik planlama gerektirir. Rekabet gücü açısından maliyetlerin minimize edilmesi önem taşırken, ürün kalitesi ve tazeliği özellikle yaş meyve-sebze ihracatında müşteri memnuniyeti ve marka imajını doğrudan etkileyen kritik unsurlar hâline gelmiştir. Taşıma süresi, sıcaklık kontrolü, elleçleme süreçleri ve soğuk zincir yönetimi bu faktörlerin korunmasında belirleyici rol oynamaktadır (Ahumada ve Villalobos, 2009).

Son yıllarda toplam gıda üretiminin yaklaşık %20 ila %60'ının tedarik zincirinin çeşitli aşamalarında bozulduğu bilinmektedir (Lemma ve ark., 2014). Meyveler yüksek oranda bozulabilir özellikte olduklarından, taşıma ve depolama süreçlerinde sıcaklığın kontrol altında tutulması zorunludur. Bu nedenle, tedarik zincirinde soğutma sistemiyle donatılmış taşıma araçlarının kullanımı yaygınlaşmıştır. Ancak soğutmalı taşıma araçları, geleneksel taşıma araçlarına kıyasla daha fazla enerji tüketmekte ve bu durum hem karbon emisyonlarının artmasına hem de operasyonel maliyetlerin yükselmesine neden olmaktadır (Tassou ve ark., 2009). Dolayısıyla bozulmayı önlemeye yönelik bu zorunluluk, ekonomik ve çevresel etkileri de beraberinde getirerek tedarik zinciri planlamasında maliyet, emisyon ve tazelik hedeflerinin birlikte değerlendirilmesini gerekli kılmaktadır. Bu da dünyada hava kirliliğinin oluşmasına etki eden lojistik faktörlerden birini oluşturmaktadır. Her gün binlerce ürünün taşıma işleminin yapılması ve bu taşımada kullanılan araçların çoğunun fosil yakıtlarla çalışması karbondioksit gazlarının atmosfere karışmasına neden olmaktadır. Tedarik zinciri yapılarında kullanılan taşıtlar karbon emisyonunu ciddi derecede etkilemektedir. 2020'de toplam sera gazı emisyonlarının dörtte birinden taşımacılık sorumlu olduğu ve bunlardan karayolu taşımacılığı toplam emisyonların %70'inden fazlasını ürettiği ortaya konmuştur (Enzmann ve Ringel, 2020). İklim değişikliğiyle ilgili uluslararası kaygılar, 1997'de sanayileşmiş ülkeler için ulaşılmaması gereken yasal olarak bağlayıcı emisyon hedeflerini içeren Kyoto Protokolü'nün ortaya çıkmasına neden olmuştur (Böhringer, 2003). Bu protokol ile gelişmiş ve gelişmekte olan ülkelerin karbon emisyonlarının azaltılması hedeflenmiştir. Dünya genelinde yapılan protokoller ile görüldüğü gibi karbon emisyonunun azaltılması çevre ve iklim değişikliği için büyük

önem taşımaktadır. Küresel sıcaklığı 2030 yılına kadar taahhüt edilen oranda artıran sürdürülebilir bir dünya için sıcaklık artışının 1,5–2° ile sınırlandırılması gerekmektedir (Yapraklı ve Bayramoğlu, 2017). Bu amaçla 2015 yılında Türkiye'nin de içinde bulunduğu 196 ülke bir araya gelerek sera gazı emisyon oranlarının azaltılması konusunda Paris İklim Anlaşması imzalamışlardır. Karbon ayak izi Türkiye'nin ekolojik ayak izinin %46'sını oluşturmaktadır. Karbon ayak izi, bir ürünün üretimi, nakliyesi, kullanımı ve bozulmasının tüm aşamalarında ortaya çıkan karbondioksit emisyonunun ölçüsüdür (Akyol ve Uçar, 2021). Bütün bu sebeplerden dolayı bozulabilir ürünlerin taşınması büyük önem taşımaktadır. Bozulabilir ürünlerin taşınmasında kullanılan soğutmalı taşımacılık, soğutma sistemlerinin yüksek enerji tüketimi de önemli miktarda dolaylı sera gazı salımına yol açmaktadır. Bu durum, bozulabilir ürünlerin lojistiğinde karbon ayak izinin diğer ürün gruplarına kıyasla daha yüksek olmasına neden olmakta ve sürdürülebilir taşımacılık stratejilerinin geliştirilmesini zorunlu kılmaktadır (Tassou ve ark., 2009)

Tüm bu unsurlar birlikte değerlendirildiğinde, yaş meyve-sebze ihracatında yalnızca ekonomik değil; çevresel ve operasyonel sürdürülebilirliği de sağlayabilmek için çok kriterli ve çok amaçlı bir optimizasyon yaklaşımına ihtiyaç duyulmaktadır. Özellikle bahçe seçimi; üretim kapasitesi, kalite, hastalık riski, coğrafi konum ve lojistik altyapı gibi pek çok faktörün birlikte değerlendirilmesini gerektiren karmaşık bir karar problemidir. Karayolu, denizyolu ve havayolu taşımacılığının maliyet, zaman, tazelik ve emisyon üzerindeki farklı etkileri ise karar vericiler için önemli değişkenler oluşturmaktadır. Bu tez çalışmasında, Türkiye'den ihracat yapan bir meyve-sebze firmasının stratejik planlama sürecinde karşılaşılan bahçe seçimi ve taşıma modu belirleme problemini çözmek amacıyla; ürün kalitesinin görüntü işleme ve bulanık mantık yöntemleriyle değerlendirilmesi, maliyet-emisyon-tazelik-kapasite-talep dengesinin ise çok amaçlı matematiksel programlama ile optimize edilmesi hedeflenmiştir. Böylece karar vericilere maliyet, kalite ve çevresel etki dengesini gözetten, senaryo analizleriyle desteklenmiş bir karar destek aracı sunulmuştur.

1.1. Problemin Tanımı

Türkiye, dünya genelinde önemli bir taze meyve üreticisi ve ihracatçısı konumunda olup özellikle limon, portakal, nar, kayısı ve şeftali gibi yüksek katma değerli ürünleri Avrupa Birliği ülkeleri ve Kuzey Amerika pazarlarına ihraç etmektedir. Ancak bu ürünlerin ihracat süreci, bozulabilir doğaları ve yüksek kalite beklentileri nedeniyle çeşitli zorluklar içermektedir. Ürünlerin tazeliğinin korunması, taşıma maliyetlerinin azaltılması, teslimat sürelerinin kısaltılması ve karbon emisyonlarının düşürülmesi gibi birbiriyle çelişen hedeflerin aynı anda yönetilmesi, karar alma süreçlerini karmaşık hâle getirmektedir.

Tedarik zincirinde depolama, taşıma ve elleçleme aşamalarında yaşanan kalite kayıpları yalnızca ekonomik kayıplara yol açmakla kalmamakta, aynı zamanda müşteri memnuniyetinin azalmasına, marka güvenilirliğinin zedelenmesine ve ihracat pazarlarında rekabet gücünün

düşmesine neden olmaktadır. Bununla birlikte artan çevresel sürdürülebilirlik beklentileri, karbon ayak izinin azaltılması zorunluluğu ve lojistik maliyetlerdeki dalgalanmalar, mevcut tedarik zinciri yapılarını yeniden gözden geçirmeyi zorunlu kılmaktadır.

Özellikle bozulabilir ürünlerde karar alma süreci; kalite korunumu, taşıma maliyeti, teslimat süresi ve karbon emisyonu gibi çok sayıda parametrenin eşzamanlı olarak dikkate alınmasını gerektirir. Ayrıca taşıma süresi ve bozulma oranlarındaki belirsizlikler ile havayolu taşımacılığında uygulanan kademeli maliyet yapıları gibi gerçek hayat koşullarını temsil eden unsurlar modele dâhil edilmediğinde, karar destek sistemleri pratikte yetersiz kalmaktadır. Bu nedenle, kalite korunumu ve maliyet optimizasyonunu aynı çatı altında ele alan, çok boyutlu bir yaklaşımın geliştirilmesi kritik önem taşımaktadır.

Ürün kalitesinin doğru, nesnel ve otomatik bir şekilde ölçülmesi de kararların güvenilirliği açısından bir diğer önemli gerekliliktir. Geleneksel yöntemlerin subjektif değerlendirmelere dayanması ve yüksek iş gücü gerektirmesi, bu süreçte hata payını artırmaktadır. Bu çalışmada, bahçe bazlı kalite skorları; derin öğrenme tabanlı görüntü işleme teknikleri ile meyve görüntülerinin sınıflandırılması ve elde edilen sonuçların bulanık mantık çıkarımı ile bütünleştirilmesi yoluyla belirlenmiştir. Böylece kalite parametresi, sayısal ve karşılaştırılabilir bir göstergeye dönüştürülerek optimizasyon sürecine entegre edilmiştir.

Sonuç olarak, Türkiye'deki üretici bahçelerden Avrupa ve Kuzey Amerika'daki hedef pazarlara gerçekleştirilecek taze meyve ihracatında; hangi bahçelerin seçileceği, her ürünün hangi ülkeye hangi taşıma moduyla (karayolu, denizyolu, havayolu) ve ne miktarda gönderileceği gibi kritik kararların bütüncül bir şekilde ele alınmasına olanak tanıyan çok amaçlı bir optimizasyon modeline ihtiyaç vardır. Bu model, maliyetlerin azaltılması, karbon emisyonlarının düşürülmesi, teslimat süresinin kısaltılması, ürün kalitesinin korunması ve elde kalan ürün miktarının minimize edilmesi gibi birbiriyle çelişen hedefleri dengeli bir şekilde yönetmeyi amaçlamaktadır.

Bununla birlikte bu çalışma, yalnızca hangi kararların alınması gerektiğini değil, aynı zamanda bu kararların alınmaması durumunda ortaya çıkacak olumsuz sonuçları da ortaya koymaktadır. Uygun planlama yapılmadığında yüksek maliyetler, artan karbon salımı, teslimat gecikmeleri, müşteri memnuniyetsizliği ve ihraç edilemeyen ürünlerin ekonomik kayba yol açması gibi riskler kaçınılmaz hâle gelmektedir. Dolayısıyla önerilen model, karar vericilere yalnızca optimum çözümler sunmakla kalmaz, aynı zamanda bu çözümlerin uygulanmaması hâlinde karşılaşılabilecek ekonomik, çevresel ve operasyonel sonuçları da öngörerek stratejik bir yol haritası sağlar.

1.2. Çalışmanın Amacı

Bu çalışmanın temel amacı; Türkiye'den farklı bölgelerdeki ülkeler gerçekleştirilen meyve ihracatı için maliyet, karbon emisyonu, teslimat süresi, ürün kalitesi ve elde kalan ürün miktarı gibi

birbirinden kısmen bağımsız hedefleri dengeli biçimde ele alan, belirsizlikleri dikkate alan ve karar vericilere uygulanabilir çözümler sunan bir lojistik ağ tasarımı modeli geliştirmektedir.

Bu amaç doğrultusunda öncelikle, dikkate alınan ürünler içinden portakal için bahçelerinin ürün kalitesini nesnel ve ölçülebilir biçimde değerlendirebilmek için derin öğrenme tabanlı görüntü işleme yöntemleri uygulanmıştır. Daha sonra modelde dikkate alınacak diğer ürünler için bulanık mantık çıkarımı kullanılarak bahçe bazlı kalite skorları elde edilmiştir. Bu kalite skorları çok amaçlı bir karar destek sistemine entegre edilmiş; maliyet, emisyon, zaman, kalite ve elde kalan ürün miktarı hedeflerini aynı anda optimize eden hedef programlama tabanlı bir matematiksel model oluşturulmuştur.

Model, gerçek veri setleri (bahçe kapasiteleri, ülke talep miktarları, taşıma süreleri ve mesafeleri, karbon emisyon katsayıları, taşıma maliyetleri, raf ömrü ve bozulma oranları) kullanılarak uygulanmış ve farklı senaryolar altında analiz edilmiştir. Böylece karar vericilerin; ekonomik, çevresel ve kalite odaklı dengeli lojistik stratejiler geliştirebilmeleri ve sürdürülebilir ihracat yönetimi sağlayabilmeleri amaçlanmaktadır.

1.3. Çalışmanın Adımları

Çalışmada izlenen adımlar aşağıda verilmiştir.

- i. **Problemin Belirlenmesi:** Bu adımda incelenecek olan problem belirlenmiştir.
- ii. **Literatür Taraması:** Bozulabilir ürünler ve yeşil tedarik zinciri tasarımı konusunda yapılan çalışmalar incelenmiştir.
- iii. **Özgün Katkının Belirlenmesi:** Çalışmada dikkate alınan problemin literatürdeki çalışmalardan farklı yönleri belirlenmiştir.
- iv. **Probleme uygun çözüm yöntemlerinin belirlenmesi:** Belirsizlik içeren parametrelerle desteklenen çok amaçlı optimizasyon için, hedef programlama modeli geliştirilmiştir.
- v. **Problemin çözümü için gerekli verilerin toplanması:** Modelin çalıştırılabilmesi için bahçelere ait ürün arz miktarları, ülke bazlı talep değerleri, taşıma mesafeleri ve süreleri, karbon emisyon katsayıları, taşıma maliyetleri, ürün raf ömrü ve bozulma oranları gibi veriler toplanmıştır.
- vi. **Görüntü işleme ve bulanık mantık tabanlı kalite skorlarının elde edilmesi:** Toplanan meyve görselleri üzerinde derin öğrenme tabanlı görüntü sınıflandırma modelleri ile bahçe kalite skorları elde edilmiştir. Başka bir grup ürün için bulanık çıkarım sistemi ile her bahçe için sayısal kalite skorları üretilmiştir.
- vii. **Stokastik parametrelerin belirlenmesi ve matematiksel modelin oluşturulması:** Taşıma süresi ve ürün bozulma oranları gibi belirsizlikler için stokastik dağılımlar

tanımlanmış ve modelde kullanılmıştır. Çok amaçlı hedef programlama modeli; talep, kapasite, tazelik, taşıma süresi ve maliyet kısıtları altında formüle edilmiştir.

- viii. **Matematiksel modelin çözümü** : Tek amaçlı ve çok amaçlı kurulan optimizasyon modellerinin çözümü Python ortamında çözülmüştür.
- ix. **Duyarlılık analizi**: Modelin duyarlılığını test etmek için duyarlılık analizi yapılmıştır.
- x. **Sonuçların değerlendirilmesi ve öneriler**: Matematiksel model ile elde edilen sonuçlar karşılaştırılmış ve yorumlanmıştır. Gelecek çalışmalar için öneride bulunulmuştur.

1.4. Çalışmanın Orijinal Katkıları

Çalışmanın orijinal katkıları aşağıda verilmiştir:

1. Meyve bahçelerinin ürün kalitesinin belirlenmesinde, klasik yöntemler yerine; derin öğrenme tabanlı görüntü işleme ile meyve hastalık ve tazelik oranlarının çıkarılması ve bu sonuçların bahçe kalite skorlarıyla ilişkilendirilmesi sağlanmıştır. Bununla birlikte görüntü işleme için yeterli veri sağlanamayan ürünler için bulanık mantık çıkarımı ile bahçe kalite skorları belirlenerek sayısal ve karşılaştırılabilir bahçe kalite skorları üretilmiştir.
2. Elde edilen kalite skorları, Türkiye’den Avrupa ve Kuzey Amerika’ya yapılan meyve ihracatını planlayan çok amaçlı optimizasyon modeline doğrudan entegre edilmiştir. Böylece kalite faktörü, maliyet–zaman–emisyon gibi klasik lojistik kriterlerle aynı anda karar sürecine dahil edilmiştir.
3. Maliyet, karbon emisyonu, teslimat süresi, ürün kalitesi ve elde kalan miktar hedeflerini aynı anda dikkate alan; stokastik parametreler ile desteklenmiş çok amaçlı hedef programlama modeli geliştirilmiştir.
4. Karayolu, denizyolu ve havayolu taşımacılığının birlikte değerlendirilmesini sağlayan multimodal bir yapı oluşturulmuştur. Özellikle havayolu için parçalı doğrusal maliyet fonksiyonu ve buna bağlı mod-seçim kısıtları geliştirilerek gerçek hayata yakın maliyet hesaplaması sağlanmıştır.
5. Çalışma, sadece maliyet ve zaman değil aynı zamanda ürün tazeliği ve karbon ayak izi boyutlarını da içeren bütünsel bir karar destek aracı sunarak bozulabilir ürün ihracatında sürdürülebilir ve rekabetçi stratejiler geliştirilmesine katkı sağlamaktadır.

1.5. Çalışmanın Organizasyonu

Çalışma beş bölümden oluşmaktadır. İlk bölümde, araştırmanın arka planı, problem tanımı sunulmuştur. İkinci bölümde, narenciye ve diğer taze meyveler için lojistik ve tedarik zinciri tasarımı üzerine yapılan çalışmalar incelenerek değerlendirilmiştir. Üçüncü bölümde, çalışmada kullanılan veri setleri (bahçe kapasiteleri, ülke talep miktarları, taşıma süreleri, maliyetler, emisyon katsayıları

vb.) ile bahçe kalite skorlarının belirlenmesinde kullanılan görüntü işleme ve bulanık mantık tabanlı yöntemler açıklanmıştır. Geliştirilen çok amaçlı matematiksel modelin karar değişkenleri, kısıtları ve amaç fonksiyonları detaylandırılmıştır. Dördüncü bölümde, tek amaçlı ve çok amaçlı modellerin çözüm sonuçları; maliyet, karbon emisyonu, kalite, teslimat süresi ve elde kalan ürün miktarı gibi performans göstergeleri açısından karşılaştırılmış ve duyarlılık analizi yapılmıştır. Son bölümde ise çalışmanın genel sonuçları ve gelecekte yapılabilecek çalışmalar için öneriler sunulmuştur.



2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

Çalışma konusu ile ilgili yapılan literatür taraması bozulabilir ürünlerde tedarik zinciri, bozulabilir ürünlerde yeşil tedarik zinciri, bozulabilir ürünlerde taşıma modu seçime ve meyve ve sebzelerde görüntü işleme ile kalite değerlendirme başlıkları altında incelenmiştir.

2.1. Bozulabilir Ürünlerde Tedarik Zinciri

Öncelikle, bozulabilir ürünlerin kısa raf ömrü, yüksek kalite beklentisi ve talep dalgalanmalarına karşı duyarlılığı nedeniyle tedarik zinciri yönetimi literatüründe nasıl ele alındığı incelenmiştir.

Osvold and Stirn (2008), taze sebzeler gibi bozulabilir gıdaların taşınmasında, ürünlerin kalitesinin korunması ve maliyetlerin minimize edilmesi için bir araç rotalama algoritması geliştirmişlerdir. Kurulan matematiksel modelde araç sayısını, toplam seyahat mesafesini, seyahat süresini ve kalite kaybını minimize etmeyi hedeflemişlerdir. Kalite kaybını azaltmak için, araçların rotaları boyunca depo durakları eklenmiş ve yeni araçlar atanmıştır. Slovenya gıda pazarında yapılan çalışmada 56 farklı örnek senaryo için simülasyonlar gerçekleştirilmiştir .

Chen ve ark. (2009), çalışmalarında bozulabilir gıdaların üretim planlaması ve taşıma rotalarının zaman pencereleri ile birlikte optimize edilmesini ele almışlardır. Kurulan matematiksel modelde toplam kârı maksimize etmeyi hedeflemişlerdir. Model tedarikçinin toplam gelirini, üretim ve taşıma maliyetlerini, zaman penceresi ihlali cezalarını ve kalite kayıplarını içerir. Araç rotalama problemi için değişiklik ve iyileştirme algoritmaları uygulanmıştır. Üretim ve teslimatın zamanlaması, kalite kayıplarını ve ceza maliyetlerini önemli ölçüde azaltmıştır. Araç sayısındaki artış, bozulma ve kalite kaybını azaltarak daha yüksek müşteri memnuniyeti sağlamıştır.

Rong ve ark. (2011), gıda kalitesi bozulmasını modelleyerek bunu üretim ve dağıtım planlamasına entegre etmişlerdir. Çalışmada gerçek bir vaka ele alınarak dolmalık biber gibi taze sebzeler için sıcaklık kontrolünün dikkate alan bir tedarik zinciri modeli geliştirmişlerdir. Bu model, taze gıdaların kalite kaybını zaman ve sıcaklık gibi çevresel faktörlere dayalı olarak analiz etmektedir. Önerilen karma tamsayılı doğrusal programlama modeli ile kalite değer kaybını, atık ve maliyetleri minize etmeyi amaçlamışlardır. Ana hedef, ürün kalitesinin gıda tedarik zinciri modellenmesine dahil edilmesinde ve ürün akışlarının ürün kalitesine göre farklılaştırılmasında yatmaktadır. Bu şekilde, ürün kalitesinin yönetilmesi ve sıcaklığın kontrol edilmesinin önemli yönleri, üretim ve tedarik zinciri yönetimi karar alma süreçlerine entegre edilebileceği savunulmuştur.

Amorim ve Almada Lobo (2014), bozulabilir gıda ürünlerinin taşınması sırasında kalite kaybını ve operasyonel maliyetleri optimize etmeyi hedeflemektedir. Önerilen model, araç rotalama problemi kapsamında tazelik seviyesini maksimize ederken dağıtım maliyetlerini minimize eden çok

amaçlı bir optimizasyonu ele almıştır. Çalışma kapsamında ürünlerin raf ömrü, tazelik seviyesi ve bozulabilirlik yoğunluğu gibi özellikler dikkate alınmıştır. Tazelik seviyesini artırmak, operasyonel maliyetlerde önemli bir artışa neden olmuştur. Tazelik seviyesinin %60'tan %90'a çıkarılması için araç sayısının dört katına çıkarılması gerekmiştir.

Wang ve ark. (2016), bozulabilir gıdaların dağıtımı için çok amaçlı bir rota optimizasyon modeli önermektedir. Model, taşınan ürünlerin tazelik seviyesini en üst düzeye çıkarırken toplam dağıtım maliyetlerini en aza indirmeyi amaçlamaktadır. Ayrıca, müşteri memnuniyetini artırmak için zaman pencereleri ve mekânsal zamansal mesafeleri göz önünde bulunduran bir çerçeve sunmaktadır. Model birinci aşaması K- Means Kümeleme ikinci aşaması Değişken Komşuluk Arama (VNS) ve Genetik Algoritma (GA) olan iki aşamalı bir çözüm algoritması önermektedir. MATLAB ortamında sayısal deneyler yapılarak algoritmanın verimliliği test edilmiştir. Önerilen algoritma, genetik algoritmaya kıyasla maliyetleri %15'e kadar azaltmış ve tazelik seviyesini %9'a kadar artırmıştır.

Hsiao ve ark. (2017), soğuk zincirlerde bozulabilir gıda dağıtımının kalite odaklı bir şekilde planlanması üzerine odaklanmaktadır. Gıda kalitesini ve raf ömrünü modelleyen bir yaklaşım geliştirilmiştir. Kalite seviyesi, gıdanın tahmini raf ömrüne dayalı olarak belirlenmiştir. Kalite bozulma oranı, depolama sıcaklığına ve zamanına göre hesaplanmıştır. Biyocoğrafya Tabanlı Optimizasyon ve sonuçlarını karşılaştırmak için genetik algoritma referans çözüm yöntemi olarak uygulanmıştır. Sıcaklık optimizasyonu ve kalite seviyesi değişimi, dağıtım sırasında gıda bozulmasını önemli ölçüde azaltmıştır. Çoklu sıcaklık ayarları ile çalışan araçlar, gıda kalitesini koruma ve dağıtım maliyetlerini dengeleme açısından etkili bulunmuştur.

Mohammed ve Wang (2017), et tedarik zinciri yönetiminde lojistik süreçlerin optimizasyonuna yönelik bir problemi ele almışlardır. Kurulan matematiksel modelde taşıma maliyetlerini minimize etmek, taşıma araçlarının sayısını en aza indirmek ve teslimat süresini optimize etmek amaçlanmıştır. Model, İngiltere'deki bir vaka çalışmasında uygulanmış ve çiftlik, mezbahe ve perakendeciler arasındaki ürün akışını optimize etmişlerdir. RFID (Radyo Frekansı ile Tanımlama) teknolojisi ile et ürünlerinin taşıma sürecindeki kalitesini izlemeyi önermişlerdir. Pareto optimizasyonu ve Pareto çözümleri arasından en uygun çözümü seçmek için TOPSİS yönteminden yararlanılmıştır. Karar vericilere, maliyet, araç sayısı ve teslim süresi arasında denge kurmaları için çoklu çözüm seçenekleri sunulmuştur. Elde edilen çözümler, işletmelerin taleplerine göre uyarlanabilir esneklik sağlamıştır.

Prakash ve ark. (2017), bozulabilir gıda tedarik zincirindeki risk analizi ve azaltmaya odaklanmaktadır. Tedarik, süreç, talep ve çevresel riskler gibi temel riskleri ve bunların birbirine bağımlılıklarını belirlemeyi amaçlamaktadır. Yorumlayıcı Yapısal Modelleme (ISM) ve MICMAC analizini kullanarak bu riskleri kategorilere ayırmakta ve azaltma stratejilerini önceliklendirmek için yapılandırılmış bir hiyerarşi geliştirmektedir. Bulgular, tahmin hataları ve tedarikçi kapasite sorunları gibi düşük seviyeli risklerin öncelikle ele alınması gerektiğini göstermektedir. Çalışma, karar

vermeyi optimize etmek için ISM'yi Risk Öncelik Numarası (RPN) ve Risk Azaltma Numarası (RMN) gibi araçlarla birleştiren entegre bir metodoloji önermektedir. Sonuçlar, sağlam risk yönetiminin, özellikle süt sektöründe tedarik zinciri dayanıklılığını ve verimliliğini önemli ölçüde artırabileceğini vurgulamaktadır.

Mogale ve ark. (2018), Hindistan'daki tahıl tedarik zinciri için silo konumlandırma ve tahsis problemini ele almaktadırlar. Çalışma, depolama kapasitelerini optimize ederek tahıl israfını azaltmak, nakliye ve depo maliyetlerini düşürmek ve gıda kalitesini korumak iyileştirmek için bekleme sürelerini en aza indirmeyi amaçlamaktadır. Modelin çözümü için karma tam sayılı doğrusal olmayan programlama kullanılmıştır. Bekleme sürelerinin azaltılması, gıda kalitesindeki kayıpları önemli ölçüde azaltmıştır. Depo konumlandırma ve araç tahsisi stratejileri, ürünlerin hızlı taşınmasını sağlamıştır. Duyarlılık analizi ile depo kapasiteleri, taşıma modları, araç sayısı gibi çeşitli parametrelerin model sonuçlarına etkisi analiz edilmiştir .

Balaji ve Arshinder (2016), Hindistan'daki meyve ve sebze gıda tedarik zincirindeki gıda israfının nedenlerini araştırmışlardır. Çalışmanın amacı, israfa katkıda bulunan başlıca faktörleri belirlemek ve kategorilere ayırmak, bunların birbirleriyle olan ilişkilerini analiz etmek ve Toplam Yorumlayıcı Yapısal Modelleme (TISM) ve Bulanık MICMAC Analizi kullanarak bunları itici güçleri ve bağımlılıklarına göre sıralamaktır. Belirlenen temel nedenler arasında zayıf lojistik altyapısı, soğuk depolama ve soğutmalı taşıyıcıların eksikliği ve yetersiz talep yönetimi yer almaktadır. Çalışma, yetersiz soğuk depolama ve verimsiz ağ tasarımı gibi temel sorunların ele alınmasının gıda israfını önemli ölçüde azaltabileceği sonucuna varmıştır. Bu, tedarik zinciri performansını artıracak, çiftçiler için daha iyi gelir sağlayacak ve gıda güvenliğini ve çevresel sürdürülebilirliği iyileştirecektir.

Bank ve ark. (2020), mevsimlik bozulabilir ürünler için iki aşamalı bir tedarik zincirinde entegre üretim ve dağıtım sorununu ele almışlardır. Makalenin amacı, iki aşamalı tedarik zincirinde entegre üretim ve dağıtım süreçlerini optimize ederek toplam üretim ve dağıtım süresini minimize etmektir. Karma Tam Sayılı Programlama modeli ile problem matematiksel olarak tanımlanmıştır. Genetik Algoritma ve Simüle Tavlama algoritmalarının düşük seviyeli bir hibrit formu geliştirilmiştir. Çalışma sonucunda üretim ve dağıtım kararlarının entegre edilmesinin bozulabilir malları işleyen tedarik zincirlerinde genel verimliliği artırdığını belirtmişlerdir .

Violi ve ark. (2020), tarım-gıda tedarik zinciri içinde taze meyveler üzerine odaklanmıştır. Özellikle Güney İtalya'da bir tarım-gıda şirketinin, üreticilerden tedarik ettiği mandalinaların bölgesel pazarlara dağıtımını ele alınmıştır. Bozulabilir ürünlerin kaybını en aza indirmeyi, Talep belirsizliğini etkin bir şekilde yönetmeyi, müşteri hizmet seviyesini yüksek tutmayı ve tedarik zincirinin toplam maliyetlerini optimize etmeyi hedeflemişlerdir. Bunun için bozulabilir ürünlerin envanter dengesi, araç rotası ve talep belirsizliği gibi faktörleri içeren bir stokastik programlama modeli geliştirilmiştir. Önerilen yöntem ile klasik deterministik ve ayrı envanter-dağıtım yaklaşımlarından daha düşük maliyet ve daha az bozulabilir ürün kaybı sağladıklarını belirtmişlerdir.

2.2. Bozulabilir Ürünlerde Yeşil Tedarik Zinciri

Tedarik zinciri yönetiminin çevresel etkilerinin giderek daha fazla önem kazanmasıyla birlikte, literatürde bozulabilir ürünlere yönelik yeşil tedarik zinciri yaklaşımları da öne çıkmıştır. Bu bölümde, karbon emisyonlarının azaltılması, enerji verimliliğinin artırılması ve çevresel sürdürülebilirliğin sağlanması amacıyla geliştirilen çalışmalar incelenmiştir.

Validi ve ark. (2014), İrlanda süt piyasasından bir örnek olay ele alınmıştır. İki katmanlı tedarik zinciri ile süt ürünlerinin dağıtım aşında taşımacılıktan kaynaklanan maliyetleri ve karbon emisyonunu çok amaçlı programlama, genetik algoritma ve pareto yöntemlerini bütünleşmiş bir şekilde kullanarak minimize etmişlerdir. AHP (Analitik Hiyerarşi Süreci) gibi araçlarla, araç tipi ve rota seçimi gibi kararların daha çevre dostu ve ekonomik olmasını sağlamayı hedeflemişlerdir. Ayrıca, senaryo analizleriyle, kapalı dağıtım rotalarının açılmasının sistem üzerindeki etkileri incelenmiş ve sürdürülebilirliği artıracak stratejiler önerilmiştir.

Soysal ve ark. (2014), Brezilya'nın Nova Andradina bölgesinden Avrupa Birliği'ne ihraç edilen sığır eti tedarik zinciri üzerinde bir vaka çalışması ile sığırların lojistik ağı sorunu için toplam lojistik maliyetini ve nakliye operasyonlarından kaynaklanan CO₂ emisyonlarını en aza indirmeyi amaçlayan çok amaçlı doğrusal programlama modeli sunmuşlardır. Araştırma, taşıma emisyonlarının yol yapısı, araç türü, yakıt türü, araç ağırlığı ve mesafe gibi faktörlerden nasıl etkilendiğini analiz etmektedir. Bununla birlikte Yeşil vergi teşvikleri, altyapı geliştirmeleri gibi sürdürülebilirlik girişimlerinin ekonomik ve çevresel etkilerini de değerlendirmişlerdir. .

Munhoz ve Morabito (2014) Brezilya'da narenciye üretim planlaması için bir optimizasyon yaklaşımı önermiştir. Portakal olgunlaşma eğrilerine dayalı üretim, harmanlama ve depolama kararları vermek için doğrusal programlama kullanılarak donmuş konsantre portakal suyu üretimi için bir toplu planlama modeli geliştirilmiştir. Model ayrıca bazı belirsiz parametreler için sağlam bir optimizasyon yaklaşımı entegre etmiştir .

De Keizer ve ark. (2015), bozulabilir ürünlerin tedarik zinciri ağ tasarımı probleminde toplam maliyeti en aza indirmek için simülasyon tabanlı bir optimizasyon yaklaşımı önermişlerdir. Çalışma, çiçek sektöründe Hollanda'dan Avrupa'ya dağıtım yapan bir işletme incelenerek gerçekleştirilmiştir. Nakliye, tedarik ve işleme konusundaki belirsizlikler karışık tam sayılı programlama ile modellenerek simülasyon ile entegre edilmiştir .

Musavi and Bozorgi-Amiri (2017) bir aktarma merkezinde toplam nakliye maliyetlerini, teslimat sırasındaki gıdaların tazeliğini, kalitesini ve araçların toplam karbon emisyonlarını optimize eden çok amaçlı bir karma tamsayılı doğrusal programlama olarak model kurmuşlardır Model, NSGA-II kullanılarak çözülmüştür. Sonuçlarda karbon emisyonu azaltılırken ürün kalitesi ve taşıma maliyetlerinin optimize edilebileceği görülmüştür .

Bortolini ve ark. (2018), taze gıda tedarik zincirlerinin sürdürülebilirliğini artırmak için yeniden kullanılabilir ve tek kullanımlık ambalaj seçimi ve yönetimini içeren bir tedarik zinciri yapısı önermişlerdir. Burada ambalaj, taşıma ve depolama maliyetlerinin azaltılması hedeflenirken, karbon

emisyonunun da düşürülmesi amaçlanmıştır. Model, karma tam sayılı doğrusal programlama (MILP) kullanarak çözülmüştür. Yeniden kullanılabilir ambalajlar çevresel etkileri azaltmada etkili olsa da, yüksek maliyetli olduğu tespit edilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre %52.9 tek kullanımlık ve %47.1 yeniden kullanılabilir ambalajların kullanımı optimum olmuştur. Çevresel etkileri azaltmak için kullanılan modelde emisyonların %45.1 azaltılırken, lojistik maliyetlerde %35.8'lik bir artışa neden olmuştur.

Allaoui ve ark. (2018), tarımsal gıda ürünleri için tedarikçilerin sayısı ve yerini doğrusal programlama modeli ile belirlemeyi amaçlamışlardır. Analitik Hiyerarşi Süreci (AHP) ve Sıralı Ağırlıklı Ortalama (OWA) yöntemleri kullanılarak potansiyel tedarikçiler, işleme tesisleri ve dağıtım noktaları belirli kriterlere göre değerlendirilmiştir. Karbon ayak izi, su ayak izi, iş sayısı ve toplam maliyeti minimum yapmayı hedeflemişlerdir. Önerilen model, bir agro-gıda şirketi üzerine uygulanmış ve 12 tedarikçi, 3 işleme tesisi, 5 dağıtım noktası ve 6 müşteri içeren bir ağı tasarımı optimize etmiştir.

Costa ve ark. (2014), bu çalışmada sebze üretimi ve dağıtımında ekolojik kısıtlamalar ile ekonomik hedefleri dengelemeye odaklanarak, bozulabilir stoklarla sürdürülebilir sebze mahsulü arz problemini ele almaktadır. Ürün rotasyonu planlarını, hasat sonrası depolama sınırlamalarını ve stokların bozulabilirliğini içeren bir matematiksel model önermektedir. Talep belirsizliğini ele almak için, belirsizlikler fark edildikten sonra düzeltici kararlar alınmasına olanak tanıyan, iki aşamalı stokastik programlama modeli tanıtılmıştır.

Chan ve ark. (2020), Çin'de bir et ürünleri tedarik zinciri üzerine vaka çalışması ele almışlardır. Çalışmalarının amaçları; lojistik sisteminin maliyetlerini düşürmek, gıda kalitesini korumak ve artırmak, çevresel sürdürülebilirliği sağlamak için karbon emisyonlarını minimize etmek ve teslimat sürelerini optimize ederek müşteri memnuniyetini artırmaktır. Problemin çözümü için çok amaçlı parçacık sürü optimizasyonu algoritması geliştirmişlerdir. Bu algoritma, maliyet azaltma ve kalite artırma hedeflerinde geleneksel yöntemlerden %15,51 daha başarılı olmuştur.

Rahimi ve ark. (2017), çok amaçlı stokastik bir envanter yönlendirme problemi için bir model geliştirmişlerdir. Model, ekonomik performans, müşteri hizmet seviyesi ve çevresel sürdürülebilirlik kriterlerini bir araya getiren entegre bir yaklaşım ele almaktadır. Problemin çözümünde belirsizlikler dikkate alınarak, talep, taşıma maliyetleri ve araç hızları gibi faktörler bulanık dağılımlarla modellenmiştir. Önerilen yöntem, taze ve bozulabilir ürünlerin kentsel lojistik ağlarında dağıtımına odaklanır ve müşteri memnuniyetini artırmayı, karbon ayak izini azaltmayı ve toplam tedarik zinciri karlılığını optimize etmeyi hedeflemektedir. Elde edilen sonuçlar doğrultusunda daha yüksek hizmet seviyesi sağlanması, müşteri memnuniyetini artırmış ancak bunun belirli bir maliyet artışına neden olduğu görülmüştür. Elektrikli araçların kullanımı, karbon emisyonlarını önemli ölçüde azaltmış ancak daha yüksek sabit maliyetlerle ilişkilendirilmiştir.

2.3. Bozulabilir Ürünlerde Taşıma Modu Seçimi

Bozulabilir ürünlerin tedarik zincirinde en kritik karar noktalarından biri taşıma modu seçimidir. Literatürde, ürün özellikleri, teslim süresi gereksinimleri, maliyet, mesafe ve çevresel etkiler gibi faktörlere bağlı olarak karayolu, denizyolu ve havayolu alternatiflerinin değerlendirilmesine yönelik çeşitli çalışmalar ele alınmıştır.

Bortolini ve ark. (2016), taze meyve sebze dağıtım zincirinde paketleme konularını ileri ve geri lojistiğin karar sürecine dahil ederek operasyonel maliyetlerin azalması, karbon ayak izinin düşürülmesi ve teslimat süresinin optimize edilmesini amaçlamışlardır. Çok modlu taşımacılığı (kamyon, tren ve uçak) içeren bir model geliştirmişlerdir. Üç amaçlı doğrusal programlama modeli kullanılarak çoklu ürünler ve çok seviyeli bir dağıtım ağı planlanmıştır. İtalya'dan Avrupa'nın farklı bölgelerine meyve ve sebze dağıtımını içeren bir vaka çalışması gerçekleştirilmiştir. Bu uygulamada karbon ayak izi %9,6 azaltılırken, maliyet sadece %2,7 artmıştır. Teslimat süreleri, ürünlerin raf ömrünü aşmadığı için gıda israfı önlenmiştir.

Yang ve ark. (2017), bozulabilir gıdalar için sıcaklık kontrolüne dayalı yeşil tedarik zinciri tasarımı ve pazarlama stratejilerini incelemişlerdir. Çalışmanın temel hedeflerinden biri enerji maliyetlerini ve karbon ayak izini azaltarak çevre dostu bir tedarik zinciri oluşturarak, sıcaklık kontrolü ve fiyatlama stratejilerini optimize ederek kanal kârını maksimize etmektir. Ayrıca gıda kalitesinin bozulma sürecini anlamak ve bozulma oranını en aza indirecek sıcaklıkları belirlemektir. Labuza'nın geliştirdiği kalite bozulma modeli temel alınmıştır. Bu modelde, sıcaklık ve zaman gibi faktörlerin kalite üzerindeki etkisi ele alınmıştır. Bozulabilir gıdalar için düşük sıcaklıkların enerji tüketimini artırmasına rağmen kalite kaybını azalttığı ve toplam kârı artırdığı bulunmuştur.

Yakavenka ve ark. (2020), Yunanistan ile Kuzey Doğu Avrupa arası meyve ihracatını inceleyerek tesis yerlerini belirlemeye çalışmışlardır. Multimodal taşımacılık seçenekleri (kara, deniz, demiryolu) ve farklı lojistik ağ yapılandırmaları incelenmiştir. Hedef programlama kullanarak toplam ulaşım maliyeti, teslim süresi ve karbon ayak izi minimizasyonunu amaçlayan bir model oluşturmuşlardır. Elde edilen sonuçlarda toplam maliyetleri ve karbon emisyonlarını aynı anda azaltabilirken, ürünlerin teslim süresini optimize edilebilmektedir. Bu sayede ürün kalitesi ve tazeliği de optimize edilerek müşteri memnuniyeti de arttırılmıştır. Modelde karar vericiler için ekonomik, çevresel ve sosyal hedefler belirlenmiştir. Hedeflerin ağırlıkları, karar vericilerin önceliklerine göre belirlenir ve bu ağırlıkların değişkenliği hassasiyet analizleri ile test edilmiştir .

Jouzdani ve Govindan (2021), süt ürünleri tedarik zincirlerine odaklanarak ürün bozulabilirliği ve yol tıkanıklıkları gibi faktörlerin tedarik zinciri operasyonları üzerindeki etkilerini analiz etmektedir. Süt ürünlerinin dağıtım planlamasını yaparken toplam maliyet ve yakıt tüketimini en aza indirmeyi amaçlamışlardır. Ekonomik hedeflerde %15'lik bir tavizin, çevresel ve sosyal etkileri sırasıyla %15 ve %51 oranında iyileştirebileceği görülmüştür. Çok amaçlı hedef programlama kullanarak taşıma kapasiteleri, sıcaklıkları ve araç tiplerine karar vermişlerdir. Karar

vericilere, sürdürülebilirlik hedefleri arasında tercih yapmalarına olanak tanıyan bir çözüm kümesi sunulmuştur.

Zanoni ve Ferreti (2019), çalışmalarında soğuk zincirin belirli bir örneği olarak tipik bir soğutulmuş gıda dağıtım ağı tasarımına ilişkin eko-verimliliğin optimizasyonu için bir model geliştirmektedir. Soğutulmuş gıda ile ilgili bir tedarik zincirini modellemek için, dağıtılan ürünlerin bozulabilirliği de depolama ve dağıtım faaliyetleri performanslarını etkilediği için modele dahil edilmiştir. Soğutulmuş yeşil bezelye için dağıtım ağının farklı alternatif yapılandırmalarını ele alan sayısal bir çalışma sunulmakta ve sonuçlar farklı alternatiflerin eko-verimliliği dikkate alınarak tartışılmaktadır. Soğuk zincir boyunca sıcaklık yönetimi, hem ekonomik maliyetler hem de kalite kayıpları açısından kritik bir rol oynamıştır. Daha düşük sıcaklıklar, daha az kalite kaybına neden olurken maliyetleri artırmıştır. Dağıtım merkezi sayısındaki artış, toplam maliyetleri azaltırken karbon salınımlarını artırmıştır. 2'den 6'ya kadar dağıtım merkezi sayısının artırılması, yıllık 1.8 milyon \$ tasarruf sağlarken, karbon salınımlarında 2.2 milyon ton artışa neden olmuştur.

Leleń ve Wasiak (2019), özellikle maliyet etkinliği ve kargo güvenliğine dikkat ederek, bozulabilir mallara yönelik çok modlu taşımacılık teknolojilerinin seçimi için bir karar verme modeli önermektedir. Çalışma, çok modlu lojistik ağlarının temel bileşenleri olarak karayolu-demiryolu kombinasyonlarına odaklanmaktadır. Model, hassas kargoların güvenliğini en üst düzeye çıkarırken aynı zamanda maliyet minimizasyonunu desteklemek üzere tasarlanmıştır.

Dulebenets ve arkadaşları (2016), çabuk bozulan ürünlere özel intermodal yük taşımacılığı ağlarının tasarımı için bir optimizasyon modeli geliştirmiştir. Model, deniz, hava, demiryolu ve karayolu gibi birden fazla taşıma modunu içermektedir. Birincil amacı, hem taşıma giderlerini hem de çabuk bozulan ürünlerden kaynaklanan ürün bozulma maliyetlerini entegre ederek toplam maliyeti en aza indirmektir. Çalışma, çerçeveyi deniz ürünleri, tarım ürünleri, et, balık, kabuklu deniz ürünleri ve ilaçlar dahil olmak üzere çok çeşitli hassas ürünlere uygulamaktadır.

Tirkolaee ve Aydın (2022), çok modlu lojistik seçenekleriyle sürdürülebilir tedarik zincirleri ve ulaşım ağlarının tasarımı için bütünleşik iki entegre çok amaçlı Karma Tam sayılı Doğrusal Programlama bir model sunmaktadır. Çerçeve, sürdürülebilirlik ve hizmet güvenilirliğinin hayati önem taşıdığı taze gıda, et ve aşı gibi son derece hassas ürünlerin dağıtımını ele almaktadır. Model, birden fazla hedefi kapsamaktadır: toplam maliyetleri, sera gazı emisyonlarını ve teslimat gecikmelerini en aza indirirken, iş fırsatları şeklinde sosyal faydaları en üst düzeye çıkarmak.

Li vd. (2021), taze ürünleri taşımak için otoyol ve yüksek hızlı demiryollarının kombine taşımacılığını uygulamış ve bu da taze ürünlerin intermodal taşımacılığı için bir rota karar referansı sağlamıştır.

Liang vd. (2022), yüksek hızlı demiryollarının katılımıyla çok amaçlı intermodal taşımacılık rotası optimizasyon problemlerini araştırmıştır. Çalışma, ulaşım maliyetleri, karbon emisyonları ve lojistik hizmet memnuniyetini göz önünde bulundurarak intermodal operatörler için etkili ulaşım çözümleri sağlamıştır.

2.4. Meyve ve Sebzelerde Görüntü İşleme ile Kalite Değerleme

Son olarak, son yıllarda meyve ve sebze tedarik zincirlerinde kalite değerlendirme süreçlerinde görüntü işleme ve yapay zeka tekniklerinin artan rolü dikkat çekmektedir. Literatürde renk, şekil, doku ve yüzey özelliklerine dayalı otomatik kalite sınıflandırma sistemlerinin geliştirildiği ve bu yaklaşımların kalite tahmini ve sınıflandırma doğruluğunu önemli ölçüde artırdığı görülmektedir.

Cubero ve ark. (2016), narenciye meyvelerinin hasattan satış aşamasına kadar kalite kontrolünde kullanılan bilgisayarlı görüş sistemlerine odaklanmaktadır. Bu sistemler, meyvenin dış özelliklerini (renk, boyut, şekil, kusurlar) ve iç özelliklerini (şeker oranı, asidite) değerlendirerek kalite kontrolünü otomatikleştirmeyi amaçlar. Ayrıca, hiperspektral görüntüleme gibi yenilikçi yöntemler, erken hastalık tespiti ve iç kalite analizi için kullanılmaktadır. Çalışma bu teknolojilerin tarım alanından paketlenme tesislerine kadar kullanımını ele almıştır.

Blasco ve ark. (2017), meyve ve sebzelerin hasat sonrası kalite kontrolü için kullanılan makine görüşüne dayalı ölçüm sistemlerini ele almışlardır. Meyve olgunluğunu ve kalitesini belirlemek için RGB, HSI ve CIELAB renk uzayları kullanılmıştır. Uygulanan algoritmalar, görüntüden elde edilen renk verilerini kullanarak olgunluk ve kalite sınıflandırması yapılmıştır.

Putra ve ark. (2018), Malang portakalının kalite modellemesi ve otomatik meyve sıralama sistemi için özellik çıkarımına odaklanmaktadır. Araştırma, görüntü işleme tekniklerini kullanarak meyvenin fiziksel ve renk tabanlı özelliklerini analiz etmeyi amaçlamaktadır. Özellikle HSV renk modeli, kontur tespiti, hull convex analizi ve RGB histogram analizi gibi yöntemler uygulanmıştır. Sistem, portakal çapı ve alanını %88 üzerinde bir doğrulukla ölçmüştür. Malang portakallarının renk varyasyonları nedeniyle, olgunluk seviyesi yalnızca çap ölçümleriyle sınıflandırılmıştır.

Srivastava ve ark. (2020), çalışmasında taşınabilir bir makine görüşü tabanlı sistem tasarımı tanıtmaktadır. Sistem, gerçek zamanlı görüntü alarak elde edilen görüntüleri depolamaktadır. Elde edilen segmentli görüntüler, çeşitli görüntü işleme algoritmaları kullanılarak renk, şekil, boyut ve doku gibi farklı özellikleri çıkarmak için kullanılmıştır. Çıkarılan özellikler bir araya getirilmiş ve elde taşınabilir bir sistem kullanılarak oluşturulan özellik veri kümesini toplanan narenciye örneklerinin standart kalite parametreleriyle ilişkilendirmek için farklı istatistiksel ve sinir ağı tabanlı modelleme yöntemlerinden geçirilmiştir. Klorofil, şeker içeriği, TSS, ağırlık, pH ve hacim gibi çeşitli kalite parametreleri için oluşturulan korelasyon modellerinin performansı değerlendirilmiş ve her kalite parametresi için en iyi performans gösteren modeller, geliştirilen elde taşınabilir makine görüşü tabanlı sistemi eğitmek için kullanılmıştır.

Malathy ve ark. (2021), meyvelerde hastalık tespiti için görüntü işleme yöntemlerini detaylı bir şekilde incelemekte ve önerilen bir yöntemi açıklamaktadır. Araştırma, özellikle meyve yüzeyindeki hastalıkların doğru şekilde tespiti ve sınıflandırılması üzerine odaklanmıştır. Bunun için

derin öğrenme algoritmaları, özellikle CNN kullanılmıştır. Eğitim ve test verileri kullanılarak; çürüklük, küf ve leke hastalıkları %97 doğrulukla sınıflandırılmıştır.

Soltani Firouz ve ark. (2022), meyve ve sebzelerde iç ve dış kusurların tespiti için makine görüşü ve görüntü işleme tekniklerinin kullanımını incelemektedir. Meyve ve sebzelerde kalite kaybına yol açan kusurlar (örneğin, morfolojik bozukluklar, patolojik hasarlar, mekanik zararlar) üretim süreçlerinde ekonomik kayıplara neden olmaktadır. Çalışma, bu kusurların tespiti için kullanılan çeşitli bilgisayarlı görüş sistemleri ve algoritmaları tanıtarak, tarım endüstrisinde kalite kontrol süreçlerini iyileştirmek için önerilerde bulunmaktadır.

Baloch ve ark. (2023), bu çalışmada görüntü işleme ve makine öğrenimi kullanarak meyve ve sebzelerin tazelik ve kalitesini değerlendiren bir sistem sunmaktadır. Çalışma, düşük maliyetli bir kalite kontrol yöntemi olarak yapay zeka destekli bir yazılım geliştirmeyi hedeflemiştir. TensorFlow kütüphanesi ve derin öğrenme modelleri kullanılarak bir algoritma tasarlanmış ve sınıflandırma doğruluğu %94 oranında başarılmıştır. Sistem, taze ve çürük gıdaları ayırt ederek kullanıcıların gıda kalitesini kontrol etmesine olanak tanımaktadır.

Foroughi ve ark. (2023), portakal kabuğunun renginden birkaç önemli virüs ve mantarı tanımlamak için bir görüntü işleme sistemi ve RGB - HSL dönüşümü kullanmışlardır. Önerilen algoritma hem sağlıklı hem de hastalıklı portakalları tespit etmektedir. Bu çalışmada, Melanosis, Kanser ve Kara Nokta hastalığı olan portakalların hastalıklarını teşhis etmek için bir algoritma önerilmektedir. Bu algoritma Python programlama kullanılarak gerçekleştirilerek %93,6 oranında doğrulukla sonuç vermiştir.

Emon ve ark. (2024), turuncgil yaprak hastalıklarının gerçek zamanlı olarak tespiti ve sınıflandırılması için geliştirilmiş bir derin öğrenme sistemini tanıtmaktadır. Araştırmacılar, farklı hastalıklara sahip yaprak görüntülerini kullanarak CNN tabanlı bir model oluşturmuştur. Modelin eğitiminde kullanılan özel ensemble (birleştirme) yöntemi sayesinde, öğrenme süreci hızlanmış ve model karmaşıklığı azaltılmıştır. Ayrıca, görüntü segmentasyonu ve öznetelik çıkarımı gibi tekniklerle yaprak hastalıkları tüm sınıflarda %96 doğruluk oranına ulaşarak tespit edilmiştir.

Song ve ark. (2020), turuncgil yaprak hastalıklarının gerçek zamanlı tespiti için YOLO algoritmasını kullanan bir sistem geliştirmiştir. Sistem, portakalda kanser ve portakalda yeşil görüntü hastalıklarını görüntü ve video üzerinden otomatik olarak tanımlayabilmektedir. Bu algoritma %95,4 ile hastalıkları doğru tespit etmiştir.

Singh ve ark. (2023), çalışmalarında ilk olarak portakal bahçelerindeki ağaçlarda meyveleri tespit etmek için yapay zeka algoritmalarını kullanmışlardır. Ardından, sınıflandırma görevini gerçekleştirmek için yalın yapay zeka modellerini incelenmiştir. Bu bağlamda, MobileNetV2, EfficientNetV2-B0 ve NASNet-Mobile'in performansını karşılaştırmışlardır. Görüntü sınıflandırmada, MobileNetV2 ve EfficientNetV2-B0 %100 doğruluk elde ederken, NASNet-Mobile %98 performans göstermiştir. Zamanlama performansına gelince, MobileNetV2 ve EfficientNetV2-B0'dan %10 da iyi bir hızda olduğu görülmüştür.

Xiang ve ark. (2019), meyve görüntülerinin sınıflandırılması için mobil cihazlar gibi düşük donanım gücüne sahip cihazlarda çalışabilecek hafif bir derin öğrenme modeli olan MobileNetV2'yi transfer öğrenme tekniği ile kullanmayı amaçlamışlardır. Elma, muz, karambola, guava ve kivi meyvelerine ait 3670 meyve görüntüsü kullanılarak en yüksek doğruluk %85.12 bulunmuştur. MobileNetV2, hem eğitim süresi hem de model büyüklüğü açısından MobileNetV1, InceptionV3 ve DenseNet121'e göre daha verimli olduğu görülmüştür.

Vaidya ve ark. (2023), turuncgil bitkilerinde görülen yaygın hastalıkların tespitine yönelik olarak görüntü işleme ve makine öğrenmesi tabanlı bir yaklaşım önermiştir. Sınıflandırma için hem klasik yöntemler (K-means, GLCM, SVM) hem de derin öğrenme yöntemleri (CNN) kullanılmıştır. CNN modeli, portakal yaprağı ve meyvelerinde citrus canker, melanose, greening, black spot, scab gibi hastalıkların sınıflandırılmasında yaklaşık %94 ile yüksek doğruluk göstermiştir. Ayrıca, çiftçilerin kullanımı için web tabanlı bir portal geliştirilmiş ve bu sistem sayesinde görseller yüklenerek hastalık tahmini yapılabilmektedir.

2.5. Önceki Çalışmaların Değerlendirilmesi

Bozulabilir ürünlerin tedarik zinciri yönetimine ilişkin literatür incelendiğinde, çalışmaların büyük ölçüde kalite kayıplarının minimize edilmesi, maliyetlerin düşürülmesi ve müşteri memnuniyetinin artırılması üzerine odaklandığı görülmektedir. Araştırmalar genel olarak dört ana eksenle toplanmaktadır.

İlk olarak, tedarik zinciri ve rotalama modelleri üzerine yapılan çalışmalar; araç sayısı, seyahat mesafesi, zaman pencereleri ve sıcaklık gibi faktörlerin ürün kalitesi üzerindeki etkisini dikkate almıştır (Osvald & Stirn, 2008; Chen vd., 2009; Rong vd., 2011). Bu çalışmalar, kalite kaybının üretim ve dağıtım planlamasıyla bütünleştirilmesinin önemini vurgulamış ve çok amaçlı optimizasyon yaklaşımlarıyla kalite-maliyet dengesi üzerinde yoğunlaşmıştır (Amorim & Almada Lobo, 2014; Wang vd., 2016).

İkinci olarak, yeşil ve sürdürülebilir tedarik zinciri yaklaşımları, karbon emisyonlarının ve çevresel etkilerin optimizasyona dâhil edilmesi gerektiğini ortaya koymuştur. Validi vd. (2014), Soysal vd. (2014) ve Musavi & Bozorgi-Amiri (2017) gibi çalışmalar, çok amaçlı programlama ve meta-sezgisel algoritmalar kullanarak çevresel, ekonomik ve sosyal hedeflerin birlikte ele alınabileceğini göstermektedir. Bu bağlamda çevresel sürdürülebilirlik ile maliyet minimizasyonu arasında bir denge arayışı dikkat çekmektedir.

Üçüncü olarak, taşıma modu seçimi ve multimodal/intermodal yaklaşımlar, farklı ulaşım kombinasyonlarının bozulabilir ürünler üzerindeki etkilerini incelemiştir. Bortolini vd. (2016), Yakavenka vd. (2020) ve Dulebenets vd. (2016) gibi araştırmalar, maliyet, teslim süresi ve karbon ayak izi kriterlerini dikkate alarak multimodal taşımacılığın avantajlarını ortaya koymuştur. Leleń & Wasiak (2019) ve Tirkolae & Aydın (2022) ise çok amaçlı hedef programlama çerçevesinde ekonomik, çevresel ve sosyal boyutları bütünsel şekilde değerlendirmiştir.

Son olarak, görüntü işleme ve makine öğrenmesi ile kalite değerlendirme çalışmaları giderek önem kazanmıştır. Erken dönem araştırmalar renk, şekil ve doku gibi görsel özelliklere dayanırken (Cubero vd., 2016; Blasco vd., 2017; Putra vd., 2018), son yıllarda derin öğrenme tabanlı modeller (Malathy vd., 2021; Soltani Firouz vd., 2022; Singh vd., 2023; Emon vd., 2024) yüksek doğruluk oranları ile öne çıkmaktadır. Bu gelişmeler, kalite kontrol süreçlerinin otomatikleşmesi, hastalık tespiti ve gerçek zamanlı sınıflandırma açısından önemli katkılar sağlamaktadır.

Genel olarak literatür, (i) kalite–maliyet–zaman dengesinin sağlanması, (ii) çevresel sürdürülebilirlik kriterlerinin optimizasyona entegrasyonu ve (iii) yeni teknolojiler ile nesnel kalite ölçümünün mümkün hale gelmesi olmak üzere üç temel eğilimi ortaya koymaktadır. Bununla birlikte bazı boşluklar dikkat çekmektedir. Çalışmaların çoğu tek boyutlu hedeflere odaklanmış olup, kalite, maliyet ve emisyonun aynı anda optimize edildiği entegre yaklaşımlar sınırlıdır. Ayrıca görüntü işleme ile elde edilen kalite skorlarının tedarik zinciri optimizasyon modellerine doğrudan entegre edildiği kapsamlı çalışmalar oldukça azdır. Son olarak, multimodal taşımacılık üzerine yapılan araştırmalarda ürün bazlı farklılaştırılmış uygulamaların eksikliği göze çarpmaktadır.

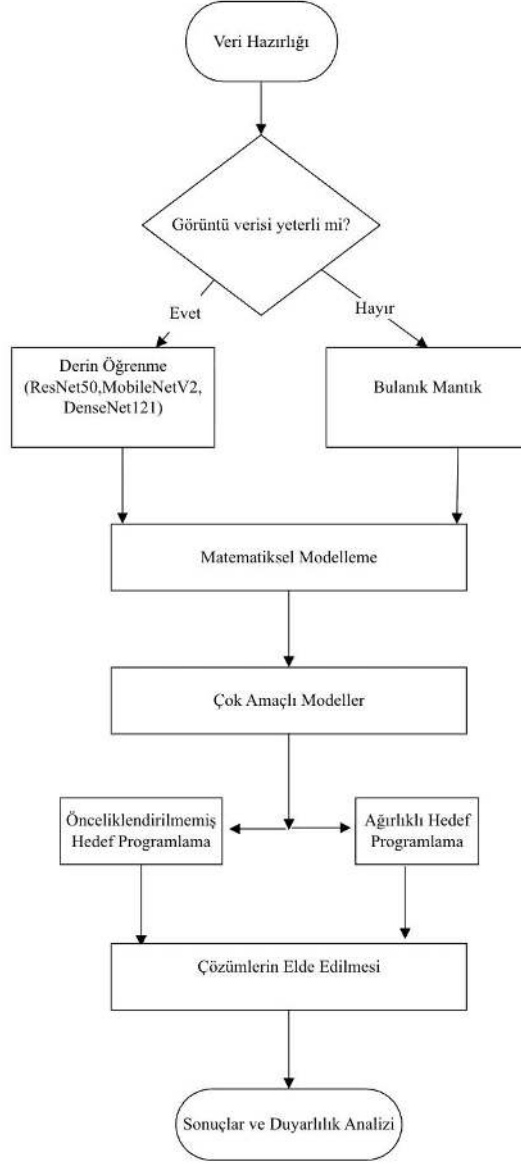


3. MATERYAL VE METOT

Çalışmada kullanılan materyal ve metot bu kısımda detaylı olarak açıklanmıştır.

3.1. Materyal

Bu çalışmada, Mersin’de faaliyet gösteren bir firmadaki uluslararası pazarlarda yaygın olarak ihraç edilen portakal, nar, limon, şeftali ve kayısı ürünleri incelenmiştir. Çalışma kullanılan materyaller; lojistik ve kalite verileri ile bu verilerin işlenmesinde kullanılan yazılım ortamlarından oluşmaktadır. Çalışma kapsamında, Türkiye’de yer alan farklı bahçelere ait ürün kapasite miktarları, ürün-bahçe bazında kalite değerlendirme sonuçları, hedef ülkelere ait talep miktarları, taşıma mesafeleri ve süreleri, ulaştırma modlarına ilişkin birim maliyet ve karbon emisyon katsayıları temel veri setini oluşturmaktadır. Ürünlerin bozulabilir yapısı nedeniyle günlük bozulma oranları ve raf ömrü bilgileri de modele dahil edilmiştir. Bahçe kalite skorları, görüntü işleme verilerinin yetersiz kaldığı durumlarda uzman görüşüne dayalı bulanık mantık tabanlı bir çıkarım sistemi ile elde edilmiştir. Tüm bu veriler, çalışmanın ilerleyen kısımlarında ayrıntılı olarak tanıtılan çok amaçlı matematiksel modelin parametreleri ve katsayılarını oluşturmuştur. Modelleme ve veri işleme süreçlerinde Python programlama dili kullanılmış, bulanık mantık modelinde ‘scikit-fuzzy’ kütüphanesinden, optimizasyon modellerinde ise ‘PuLP’ kütüphanesinden yararlanılmıştır. Çalışmanın iş akış diyagramı Şekil 3.1.’de verilmiştir.



Şekil 3.1. Çalışmanın İş Akış Diyagramı

3.1.1. Bahçe Kalite Skorlarının Elde Edilmesi

Bahçe kalitesi tedarik zinciri yönetiminde maliyet, tazelik ve pazar boyutu açısından önemli bir yere sahiptir. Düşük kaliteli ürün daha fazla fire oranıyla maliyet artışına neden olurken, hızlı bozulabilme ile de fire artışı ve taşıma modunun kritikliğini arttırmaktadır. Bununla birlikte düşük kaliteli ürün standart uyumsuzlukları nedeniyle ürünlerin pek çok ülkeden geri çevirmeleri olmaktadır. Bahçe kalite skorları belirlenirken yöntem seçiminde verinin büyüklüğü yöntemin belirlenmesinde etkili olmuştur. Portakal için yeterli veri sağlandığında görüntü işleme tabanlı sınıflandırma yapılmıştır. Diğer ürünler için ise uzman görüşüne dayalı bulanık mantık ile kalite skorları elde edilmiştir. Kalite skorlarının farklı yöntemlerle elde edilmiş olması matematiksel modelde ürün bazlı inceleme yapıldığı için birbirini etkilememektedir.

Görüntü İşleme ile Bahçe Kalite Skoru Elde Edilmesi

Bu çalışmada, ilk olarak portakalın dış yüzeyinde görülen hastalıkların tespiti için bir görüntü işleme ve sınıflandırma sistemi geliştirmek amaçlanmıştır. Daha sonra bu sistem kullanılarak farklı bahçelerden alınan portakalların hastalıkları sınıflandırarak bahçe kalite skorları belirlenecektir. Süreç, derin öğrenme temelli bir karar destek sisteminin tasarımı, uygulanması ve değerlendirilmesini kapsamaktadır. Bu yaklaşım, özellikle tarım endüstrisi gibi büyük ölçekli ve görsel kalite ayrımının zor olduğu sektörlerde verimliliği artırmak açısından önemlidir (Zhang ve ark., 2020).

Bahçelerden alınan portakal görüntülerine göre bahçe kalitelerinin dikkate alınması için sağlıklı, kara lekeli, yaralı ve yeşil olmak üzere dört farklı sınıf dikkate alınmıştır. ‘Sağlıklı’ sınıfı kalitesi yüksek portakal grubunu ifade etmektedir. ‘Yeşil’ sınıfı portakalın henüz tam olarak istenen olgunlukta olmadığını gösteren yeşil renkli portakallar için belirlenmiştir. ‘Kara Lekeli’ sınıfında mantar kaynaklı hastalık kabuğun üzerinde koyu kahverengi-siyah lekeler oluşturur. ‘Yaralı’ sınıfında ise meyvenin dış yüzeyinde bozukluklar ve yaralar mevcuttur.

Portakalda trips, dal sürtüğü, unlu bit, küf, soğuk vurma gibi kaliteyi doğrudan etkileyebilecek birçok hastalık meydana gelebilmektedir. Bu çalışmada, çalışmanın yapıldığı yıl bazlı en çok meydana gelen hastalıklar ve müşteri istekleri baz alınarak kara lekeli, yaralı ve yeşil portakal kalite bozuklukları incelenmiştir.

Fresh sınıfı sağlıklı meyveleri gösterirken, diğer üç sınıf çeşitli mantar veya bakteriyel hastalıklar nedeniyle yüzeyde renk değişimi, leke ve şekil bozuklukları gibi kusurlar içermektedir.

Her bir sınıf Şekil 3.2-Şekil 3.5.’de gösterilmiştir.



Şekil 3.2. Sağlıklı Portakal Görüntüsü



Şekil 3.3. Kara Lekeli Portakal Görüntüsü



Şekil 3.4. Yaralı Portakal Görüntüsü



Şekil 3.5. Yeşil Portakal Görüntüsü

Verilerin Toplanması

Bu çalışmada kullanılan meyve görüntüleri, araştırmacı tarafından akıllı telefon kamerası 48 MP çözünürlük ile çekilmiştir. Fotoğraflar, doğal ışık altında ve farklı açılardan alınarak meyvelerin renk, yüzey yapısı gibi kaliteyi etkileyen görsel özelliklerini yansıtacak şekilde kaydedilmiştir. Çekimler sırasında meyveye yaklaşık 30 cm mesafeden tripod yardımıyla Şekil 3.6.'deki gibi yapılmıştır. Elde edilen ham görüntüler, daha sonra sınıflandırma modeline uygun hale getirilmek için 224×224 piksele yeniden boyutlandırılmıştır.



Şekil 3.6. Portakal Görüntülerinin Alınması

Bu çalışmada 8 farklı bahçelerden alınacak portakal görüntüleri için örneklem büyüklüğü istatistiksel yöntemlerle belirlenmiştir. Her bir bahçe'deki toplam ürün kapasitesi bilindiğinden, örneklem büyüklüğü hesaplamasında Cochran (1977), tarafından önerilen Denklem (3.1)'deki formül kullanılmıştır. %95 güven düzeyi ve $\pm\%10$ hata payı temel alınarak yapılan hesaplamalar sonucunda, her bahçeden alınması gereken minimum görüntü sayısı belirlenmiştir. Belirlenen

örneklem sayısına göre her bahçeden rastgele seçilen portakallar görüntülenmiş ve modelde kullanılmak üzere veri setine dahil edilmiştir.

$$n_0 = \frac{z^2 p(1-p)}{e^2} \quad (3.1)$$

Burada n_0 sonsuz popülasyon için örneklem sayısını, z güven düzeyine ait standart normal dağılım katsayısını, p popülasyondaki oranın tahmini değerini, e kabul edilen hata payını ifade etmektedir.

$$n = \frac{n_0}{1 + \frac{n_0 - 1}{N}} \quad (3.2)$$

Ortam Kurulumu ve Parametre Ayarları

Portakal hastalıklarını sınıflandırmak amacıyla transfer öğrenme temelli bir derin öğrenme yaklaşımı uygulanmıştır. Modelin eğitimi ve değerlendirmesi Python programlama dili kullanılarak, TensorFlow ve Keras kütüphaneleri üzerinden gerçekleştirilmiştir.

Model giriş boyutu (görüntü boyutu), yığın büyüklüğü, epoch sayısı, doğrulama bölme oranı ve eğitim sırasında kullanılacak olan etiket yumuşatma, erken durdurma ve öğrenme oranı zamanlaması gibi parametreler önceden tanımlanmıştır. Tanımlanan parametreler sistemin hem öğrenme başarısını hem de zaman/maliyet etkinliğini optimize etmeyi hedeflemiştir. Bu parametrelerden bazıları Çizelge 3.1 'de verilmiştir.

Çizelge 3.1. Temel Eğitim Parametreleri

Mimari	Katman Sayısı	Yığın Büyüklüğü	Öğrenme Oranı	Epoch Sayısı
MobileNetV2	155	16	0.001	30
ResNet50	177	16	0.001	30
DenseNet121	429	16	0.001	30

Çalışmada eğitim veri seti, Kaggle platformunda açık kaynak olarak paylaşılan “Orange Diseases Dataset” veri tabanından elde edilmiştir (Silva ve ark.,2021). Veri setinde portakala ait görüntüler bulunmaktadır. Veri seti, Colab ortamına Google Drive üzerinden entegre edilmiş ve eğitim ve test olarak iki ana klasör halindedir. Eğitim seti içerisinde bulunan verilerden ayrıca %15 (150 görüntü) oranında ayırım yapılarak validasyon seti oluşturulmuştur. Böylece modelin eğitim sürecinde öğrenme performansı ve genelleme kabiliyeti sürekli olarak kontrol edilmiştir.

Görüntü Artırma ile Genelleme Yeteneğinin Artırılması

Model eğitiminde kullanılacak tüm görseller, 224×224 piksel boyutuna dönüştürülmüştür. Bu boyut, kullanılan önceden eğitilmiş CNN mimarilerinin (MobileNetV2, ResNet50 ve DenseNet121) giriş katmanlarıyla uyumluluk sağlamaktadır. Ayrıca, her mimarinin kendi ön işleme fonksiyonları (preprocess_input) kullanılmıştır.

Veri setinde görülen sınıf dengesizliğini azaltmak amacıyla sınıf ağırlıklandırma yöntemi kullanılmıştır. Bu yöntem ile az sayıda örneğe sahip sınıfların eğitimde daha fazla ağırlık kazanması sağlanmış ve modelin tüm sınıflara eşit derecede duyarlı olması amaçlanmıştır.

Modelin aşırı öğrenme riskini azaltmak için eğitim sırasında veri artırma tekniklerinden yararlanılmıştır. Eğitim setindeki her bir görüntü, eğitim sürecinde rastgele olacak şekilde şu dönüşümlere tabi tutulmuştur:

- $\pm 30^\circ$ döndürme
- Yatay ve dikey kaydırma (maksimum %20)
- Yakınlaştırma (zoom) ± 20
- Parlaklık değişimi (0.8–1.2 aralığında)
- Yatay çevirme (horizontal flip)

Bu sayede modelin farklı açılar, ışık koşulları ve varyasyonlar altında genelleme yeteneği artırılmıştır.

Mimari Kıyaslama ve Model Seçimi

Her mimari, eğitim ve doğrulama verisi kullanılarak eğitilmiş; ardından doğrulama verisi üzerinde Makro F1 skoru ve kayıp değerlerine göre değerlendirilmiştir. Eğitim verisindeki verilerin %85'i (850 görüntü) eğitim ve %15'i (150 görüntü) doğrulama için kullanılmıştır. Test verisi ayrı bir klasörde olup 115 görüntüden oluşmaktadır. Seçim süreci aşağıdaki öncelik sırasına göre yapılmıştır:

1. En yüksek Makro-F1 skoru
2. Skor eşitse en düşük kayıp değer
3. Hâlâ eşitse parametre sayısı az olan model seçilmiştir

Bu değerlendirme yöntemi, üretim ortamlarında kullanılacak modellerin hem doğruluk hem de sistem kaynakları açısından dengeli olmasını sağlamaktadır.

Modelin Nihai Eğitimi

Seçilen model, tüm eēitim verisi kullanılarak sıfırdan eēitilmiřtir. Eēitim süreci iki aşamada gerçekleştirilmiştir: Donduruřmuř mod ile önceden eēitilmiř katmanlar sabit tutulmuş, sadece son katmanlar eēitilmiřtir. İnce ayar (Fine-tuning) ile belirli derinlikteki katmanlar da eēitime dahil edilerek modelin hedef veri setine daha iyi adapte olması saēlanmıřtır.

Test Performansı ve Karar Destek Skorları

Modelin test seti üzerindeki başarı metriēi, sınıflara göre kesinlik, duyarlılık ve f1-skor şeklinde ölçülmüştür. Ek olarak, kalite ölçümü açısından modelin Denklem (3.3) ile gösterilen “Bahçe Kalite Skoru” elde edilmiştir.

$$Kalite\ Skoru = \frac{n_{fresh}}{n_{total}} \times 100 \quad (3.3)$$

n_{fresh} : Saēlıklı portakal görüntü sayısı

n_{total} : Toplam görüntü sayısı

Ayrıca, her sınıfa hastalık derecesine göre aēırlıklar atanarak Denklem (3.4) ‘de gösterilen “Aēırlıklı Kalite Skoru” hesaplanmıştır. Bu metrik, ürünlerin sınıflandırılmasını sadece doēruluk açısından deēil, aynı zamanda hastalık ciddiyeti açısından da deēerlendirme imknı sunar. Böylece sistem, sadece bir sınıflandırma aracı deēil, aynı zamanda bir karar destek aracı haline gelir.

$$Aēırlıklı\ Kalite\ Skoru = \max \left(0, 100 - \left(\frac{\sum_{c \in C} w_c \cdot n_c}{n_{total}} \times 25 \right) \right) \quad (3.4)$$

C : Sınıf kümesi

w_c : Sınıf c ‘ye ait aēırlık

n_c : Sınıf c ‘ye ait tahmin edilen görüntü sayısı

$$n_{total} = \sum_{c \in C} n_c$$

Bulanık Mantık İle Bahçe Kalite Skoru Elde Edilmesi

Araştırma kapsamında bahçelerin kalite seviyelerini ölçmeye yönelik görüntü tabanlı sınıflandırma yapılması hedeflenmiş; ancak mevcut koşullarda her bir ürün için yeterli ve dengeli görüntü verisi elde edilememesi nedeniyle bulanık mantık yaklaşımı tercih edilmiştir. Böylece rn kalitesinin ölçülmesi için uzman görüşlerine dayalı bir bulanık çıkarım sistemi geliştirilmiştir.

Model, her bir bahçenin ürün kalitesini üç temel özellik üzerinden deēerlendirmektedir:

- Renk (kötü, orta, iyi),
- Yüzey durumu (çok kusurlu, orta, az kusurlu),
- Şekil (bozuk, orta, iyi).

Bu üç girdi değişkeni, bulanık kümeler aracılığıyla sayısal aralıklara dönüştürülmüş; çıkış değişkeni ise 0–1 aralığında kalite skoru olarak tanımlanmıştır. Böylece her bir bahçe için ayrı bir kalite değeri elde edilmiştir. Bulanık mantık modeli, Python programlama dili kullanılarak Google Colab ortamında geliştirilmiştir.

3.1.2. Matematiksel Model ve Parametreler

Bu çalışmada geliştirilen çok amaçlı tedarik zinciri modeli; bahçelerin üretim kapasiteleri, ürün kaliteleri, taşıma yapısı, maliyet ve karbon emisyon katsayıları, ürün raf ömrü ve bozulma davranışları gibi gerçek verilerle oluşturulmuştur. Verilerin büyük bir kısmı Mersin’de meyve sebze ihracatı yapan bir firmadan elde edilmiştir. Model, Türkiye’den farklı ülkelere yapılan bozulabilir ürün ihracatında maliyet, çevresel etki, ürün tazeliği ve kaliteyi aynı anda dikkate alan bir karar destek aracı geliştirmek amacıyla tasarlanmıştır.

Bu kapsamda öncelikle bahçeler, ürünler, hedef ülkeler ve taşıma modları tanımlanmış; ardından her birine ait kapasite, talep, mesafe, hız, bekleme süresi, taşıma maliyeti ve karbon emisyonu gibi parametreler belirlenmiştir. Ürünlerin taşıma sırasında moda bağlı olarak bekleme zamanları ve bozulma oranları belirsizliği yansıtacak şekilde stokastik olarak modellenmiştir. Bu amaçla ürün ve taşıma modu bazında üçgensel dağılım parametreleri kullanılmıştır. Bahçelerin kalite seviyeleri ise görüntü işleme ve bulanık mantık yöntemiyle belirlenerek modele kaliteyi temsil eden sayısal katsayılar olarak dahil edilmiştir.

Modelde portakal, limon, nar, şeftali ve kayısı olmak üzere firmanın ihracat oranı ve kalite beklentisi yüksek 5 ürün çeşidi ele alınmıştır. Bu ürünlerin kalite bazlı özellikleri, raf ömrü, tazelik seviyesi, taşınabilecek maksimum süreleri gibi parametreleri farklılık göstermektedir. Bu ürünlerin tedarik zincirinde incelenmesi için her üründe 8 bahçe dikkate alınmıştır. Bu bahçelerden Avrupa’daki bazı ülkeler, Rusya, Amerika ve Kanada olmak üzere 11 ülkeye kara, hava ve deniz yolu ile yapılan ihracatlar dikkate alınmıştır. Modelde kullanılan temel kümeler ve indeksler Çizelge 3.2.’de verilmiştir.

Çizelge 3.2. Modelde Kullanılan Temel Kümeler ve İndeksler

Sembol	Kümeler	Elemanlar
(i)	Bahçeler	$i = \{1,2,3,4,5,6,7,8\}$
(p)	Ürünler	Limon, Portakal, Nar, Kayısı, Şeftali
(j)	Ülkeler	Litvanya, Almanya, Rusya Federasyonu, Polonya, İspanya, Hollanda, Kanada, İtalya, Amerika Birleşik Devletleri, İsveç, İngiltere
(k)	Taşıma Modları	Karayolu, Denizyolu, Havayolu

Firmadan alınan veriler doğrultusunda bahçelerin ürün bazında yıllık talep miktarı kg cinsinden Çizelge 3.3.'de verilmiştir.

Çizelge 3.3. Bahçe-Ürün Kapasiteleri (kg)

Bahçe	Limon	Portakal	Nar	Kayısı	Şeftali
1	118 249	235 640	98 844	19 958	236 703
2	113 069	266 112	86 904	17 894	279 358
3	104 289	258 268	101 860	18 181	247 668
4	119 962	223 537	96 115	19 877	230 527
5	119 204	233 243	74 622	19 215	227 429
6	121 301	237 980	99 360	18 723	272 877
7	105 464	232 149	86 326	17 487	262 687
8	107 359	260 071	110 969	19 322	242 751

Firmadan yıllık bazda alınan ülkelerin ürün talepleri Çizelge 3.4. ile gösterilmiştir.

Çizelge 3.4. Ülke-Ürün Talepleri (kg)

Ülke	Nar	Şeftali	Limon	Portakal	Kayısı
Litvanya	10 212.9	17 046.0	37 122.1	3 636.0	504.0
Almanya	8 846.4	20 000.0	43 984.8	6 600.0	5 808.0
Rusya Fed.	62 761.8	49 134.9	12 339.0	42 582.2	34 848.0
Polonya	15 622.2	39 946.8	10 953.0	14 000.0	5 000.0
İspanya	12 000.0	7 000.0	6 000.0	15 000.0	-
Hollanda	17 889.0	50 000.0	70 732.5	8 500.0	2 000.0
Kanada	48 376.8	17 000.0	91 565.0	46 000.0	7 432.8
İtalya	9 000.0	10 000.0	24 240.0	42 000.0	8 000.0
ABD	-	40 000.0	72 270.0	56 000.0	-
İsveç	8 000.0	12 000.0	19 557.0	4 503.6	-
İngiltere	44 119.8	1 097.7	-	18 000.0	1 560.0

Ürünlerin müşteriye ulaştığında olması beklenen minimum tazelik oranları bulunmaktadır. Bu oran da günlük bozulma oranı ve taşıma süresi ile ilişkilidir. Firmadan geçmiş yıllarda yapılan ihracat taşıma verilerine göre alınan minimum tazelik oranı ve ürünlerin maksimum taşıma süreleri Çizelge 3.5 .'de verilmiştir.

Çizelge 3.5. Ürünlerin Minimum Tazelik Oranı ve Maksimum Taşıma Süresi

Ürün	Minimum Tazelik(%)	Maksimum Taşıma Süresi (gün)
Limon	90	25
Portakal	90	25
Nar	85	25
Kayısı	95	6
Şeftali	95	5

Ülkelerin firmaya taşıma moduna göre değişen mesafeleri km olarak Çizelge 3.6. ' da gösterilmiştir. Kanada ve Amerika' dan karayolu ulaşımı bulunmamaktadır. Modların ortalama taşıma hızları karayolu için 1200 km/gün, denizyolu için 800 km/gün ve havayolu için 14000 km/gün olarak varsayılmıştır.

Çizelge 3.6. Ülkelerin Taşıma Moduna Göre Mesafeleri (km)

Ülke	Karayolu	Denizyolu	Havayolu
Litvanya	3100	4100	2100
Almanya	3050	6800	2400
Rusya Fed.	3400	1300	2100
Polonya	2900	3900	2000
İspanya	4500	3400	3400
Hollanda	3600	6850	2900
Kanada	–	10800	9200
İtalya	3100	2200	2000
ABD	–	11500	8800
İsveç	4500	8300	2850
İngiltere	3900	6200	3225

Modelde taşıma sürelerinin belirsizliğini yansıtmak amacıyla üçgen dağılım kullanılmıştır. Bu değerlere ait firma kayıtları olmadığı için olasılık dağılımları bulunamadığından minimum, ortalama ve maksimum değerleri yansıtan üçgen dağılım seçilmiştir. Her taşıma modu için minimum, ortalama ve maksimum süre değerleri günlük bazda belirlenmiş ve Çizelge 3.7. ile gösterilmiştir. Bu değerler sektör uzman görüşü ve saha deneyimlerine dayalı olarak tahmin edilmiştir ve taşıma süresindeki beklenmeyen gecikmeleri (yükleme, boşaltma, gümrük, hava koşulları vb.) kapsayacak şekilde modellenmiştir.

Çizelge 3.7. Taşıma Modu Bekleme Süreleri (gün)

Mod	Minimum	Ortalama	Maksimum
Karayolu	0.5	1.0	1.5
Denizyolu	1.5	2.0	3.0
Havayolu	0.3	0.75	1.2

Modların taşıma maliyetleri karayolu ve denizyolu için km başına ek giderler dahil sabit olup karayolunda 0.1 \$/ton-km, denizyolunda 0.06 \$/ton-km olarak belirlenmiştir. Havayolu maliyetleri ise parçalı maliyet olarak alınmıştır. Havayolu taşımacılığında belirli blok aralıklarında farklı fiyatlandırma politikası uygulanmaktadır. Bu bloklar ve taşıma maliyetleri Çizelge 3.8. 'de verilmiştir.

Çizelge 3.8. Havayolu Blokları ve Maliyetleri

Blok	Alt Sınır(kg)	Üst Sınır (kg)	Maliyet (\$/kg km)
1	0	100	0.0022
2	100	1000	0.0018
3	1000	5000	0.0016
4	5000	∞	0.0016

Modelin çevresel etkiyi azaltmak için oluşturulan amaç fonksiyonunda kullanılan karbon emisyon katsayıları Çizelge 3.9.'de verilmiştir. Değerler DEFRA (2023) raporundaki uluslararası taşımacılık için ortalama emisyon faktörlerine dayanmaktadır ve kilogram-kilometre başına karbondioksit eşdeğeri salınımını göstermektedir. Havayolu en yüksek karbon emisyon katsayısına sahipken denizyolu en düşük karbon emisyonunu oluşturur.

Çizelge 3.9. Taşıma Modu Karbon Emisyon Katsayıları

Mod	Emisyon (kg CO ₂ / kg km)
Karayolu	0.000062
Denizyolu	0.000016
Havayolu	0.000602

Bozulabilir ürünlerin taşınması sırasında meydana gelen kalite kaybını modellemek için ürün ve taşıma modu bazında günlük bozulma oranları tanımlanmıştır. Her meyvenin optimum sıcaklık ve nem altında dayanabileceği toplam süre ortalama olarak bilinmektedir. Literatürde, meyve ve sebzelerin bozulmasını modelleyen çalışmalardan bazıları kalite değişimlerini üstel bozulma modeline dayanan denklemlerle belirlemişlerdir (Zhao ve ark., 2023; Bailón-Moreno ve ark.,2018). Denklem (3.5)'de belirli bir T süre sonunda gözlenen bozulma oranı F bilindiğinde günlük bozulma katsayısı p hesaplanabilmektedir. Buradan her ürün için günlük bozulma katsayısı firmadan alınan ürün bazında maksimum taşıma süresi (T_p) ve taşıma sonunda olması gereken minimum tazelik oranı (F_p) baz alınarak hesaplanmıştır.

$$p = -\frac{\ln 1 - (1 - F_p)}{T_p} \quad (3.5)$$

Elde edilen değerler %20 arttırıp azaltılarak minimum ve maksimum değerler bulunmuştur. Buna göre de olasılık dağılımı tanımlanarak Çizelge 3.10 ile gösterilmiştir.

Çizelge 3.10. Ürün Bazında Bozulma Katsayıları

Ürün	Minimum	Ortalama	Maksimum
Limon	0.00337	0.00421	0.00506
Portakal	0.00337	0.00421	0.00506
Nar	0.00521	0.00651	0.00781
Kayısı	0.00684	0.00855	0.01206
Şeftali	0.00821	0.01026	0.01231

3.2. Metod

Çalışmada bahçe kalite skorlarını elde etmek için; derin öğrenme mimarileri ve bulanık mantık kullanılmıştır. Problem matematiksel modelle ifade edilerek hedef programlama ile çözülmüştür.

3.2.1. Derin Öğrenme

Derin öğrenme , makine öğrenmesinin bir alt dalı olarak çok katmanlı yapay sinir ağları aracılığıyla veri içerisindeki örüntüleri otomatik olarak öğrenme yeteneğine sahiptir. Geleneksel makine öğrenmesi yöntemlerinde özellik mühendisliği manuel olarak gerçekleştirilirken, derin öğrenme algoritmaları ham veriden hiyerarşik ve soyut özellikleri otomatik olarak çıkarabilir. Bu yaklaşım, özellikle yüksek boyutlu ve karmaşık veri problemlerinde önemli avantajlar sağlar (LeCun ve ark., 2014).

Derin öğrenme yöntemlerinin temel avantajları, veriden anlamlı özelliklerin otomatik olarak çıkarılabilmesi, ağırlı derin katmanları aracılığıyla hiyerarşik öğrenmenin mümkün olması ve büyük veri kümelerinde GPU (Grafik İşlem Birimi) veya TPU (Tensör İşlem Birimi) gibi paralel işlem birimleri ile etkin bir şekilde eğitim yapılabilmesidir. Bu sayede, düşük seviyeli kenar ve doku bilgileri gibi basit özellikler, ağırlı ileri katmanlarında daha soyut ve yüksek seviyeli kavramlara dönüştürülür; bu durum özellikle görüntü sınıflandırma gibi karmaşık görevlerde yüksek başarı sağlar.

Görüntü sınıflandırma problemlerinde Evrişimli Sinir Ağları (CNN) yaygın olarak kullanılmaktadır. ESA'lar, mekânsal ilişkileri koruyarak konvolüsyon filtreleri aracılığıyla özellik haritaları oluşturur ve havuzlama katmanları ile boyutları azaltarak parametre verimliliği sağlar.

Evrişimli Sinir Ağları

Evrişimli Sinir Ağları, özellikle görüntü sınıflandırma problemlerinde yaygın olarak kullanılan derin öğrenme mimarileridir. ESA'lar, giriş verisinden hiyerarşik özellikler çıkararak daha soyut temsiller oluşturur ve nihai sınıflandırmayı gerçekleştirir. Temel katmanları ve matematiksel açıklamaları aşağıdaki gibidir (Oshea ve ark. 2015):

Giriş Katmanı

Giriş katmanı, ham piksel verilerini alır ve genellikle $H \times W \times C$ boyutlu bir tensör olarak temsil edilir:

$$X \in R^{H \times W \times C} \quad (3.6)$$

Burada H ve W görüntünün yüksekliği ve genişliği, C ise kanal sayısını gösterir.

Konvolüsyon Katmanı

Konvolüsyon katmanı, giriş verisi üzerinde filtreler uygular ve özellik haritaları çıkarır. k -inci çıkı özellik haritası şu şekilde hesaplanır:

$$y_{i,j}^k = f\left(\sum_{m=0}^{M-1} \sum_{n=0}^{N-1} \sum_{c=0}^{C-1} x_{i+m,j+n,c} \cdot w_{m,n,c}^k + b^k\right) \quad (3.7)$$

Burada w^k filtre ağırlıkları, b^k bias terimi, f aktivasyon fonksiyonu (genellikle ReLU) ve y^k k -inci çıkış özellik haritasıdır.

Aktivasyon Fonksiyonu

Aktivasyon fonksiyonu, doğrusal olmayan bir dönüşüm sağlar ve modelin kapasitesini artırır. Doğrultulmuş Doğrusal Birim (ReLU) fonksiyonu en yaygın kullanılan aktivasyondur:

$$f(z) = \max(0, z) \quad (3.8)$$

Havuzlama Katmanı

Havuzlama katmanı, özellik haritalarının boyutunu küçültür ve parametre verimliliğini artırır. Maksimum havuzlama işlemi şu şekilde gösterilebilir:

$$y_{i,j}^k = \max_{0 \leq m < M, 0 \leq n < N} x_{si+m,sj+n}^k \quad (3.9)$$

Burada $M \times N$ havuzlama filtresi ve s kaydırma adımıdır.

Tam Bağlantılı Katman

Tam bağlantılı katman, çıkarılan özellikleri sınıf olasılıklarına dönüştürür. Softmax fonksiyonu ile c -inci sınıfın olasılığı:

$$y_c = \frac{\exp(z_c)}{\sum_{j=1}^K \exp(z_j)} \quad (3.10)$$

Burada z_c lineer kombinasyon sonucu ve K toplam sınıf sayısıdır.

ESA Mimarileri

ESA'nın en yaygın ve başarılı mimarileri ResNet50, MobileNetV2 ve DenseNet121'dir.

ResNet50

ResNet50, derin konvolüsyonel ağlarda sıkça karşılaşılan gradyan kaybı ve gradyan patlaması sorunlarını çözmek için artık bağlantılar kullanır. Geleneksel derin ağlarda katman sayısı arttıkça gradyanlar geri yayılım sırasında çok küçük veya çok büyük değerlere ulaşabilir. ResNet50, her artık blokta girişten çıkışa doğrudan eklenen bir bağlantı ile bu sorunu azaltır (Targ ve ark., 2016):

$$y = F(x, \{W_i\}) + x \quad (3.11)$$

Burada x giriş, y çıkış, F blok içindeki konvolüsyon, yığın normalizasyon ve aktivasyon fonksiyonlarından oluşan öğrenilen dönüşümü, $\{W_i\}$ ise blok ağırlıklarını ifade eder. Gradyan aktarımı şu şekilde gösterilebilir:

$$\frac{\partial L}{\partial x} = \frac{\partial L}{\partial y} (1 + \frac{\partial F}{\partial x}) \quad (3.12)$$

MobileNetV2

MobileNetV2, sınırlı hesaplama kaynakları için optimize edilmiş bir CNN mimarisidir. Özellikle derinlik ayrılabilir konvolüsyonlar kullanır. Bu yaklaşım iki aşamada çalışır (Sandler ve ark., 2018):

Derinlik konvolüsyonu: Her giriş kanalı için ayrı filtre uygulanır:

$$y_{i,j,c} = f(BN(\sum_{m=0}^{M-1} \sum_{n=0}^{N-1} x_{i+m,j+n,c} \cdot w_{m,n,c} + b_c)) \quad (3.13)$$

Noktasal konvolüsyon: 1×1 konvolüsyon ile kanallar yeniden birleştirilir:

$$y_{i,j,k} = f(BN(\sum_{c=0}^{C-1} y_{i,j,c} \cdot w_c^k + b_k)) \quad (3.14)$$

MobileNetV2 ayrıca ‘*inverted residual*’ ve ‘*linear bottleneck*’ blokları içerir, bu sayede bilgi kaybı azaltılır ve hesaplama verimliliği artırılır.

DenseNet121

DenseNet121, parametre verimliliğini ve gradyan akışını artırmak için ‘*densely connected*’ bloklar kullanır. Her katman tüm önceki katmanların çıktısını giriş olarak alır (Iandola ve ark., 2014)

$$x_l = H_l([x_0, x_1, \dots, x_{l-1}]) \quad (3.15)$$

Burada $H_l(\cdot) = \text{ReLU}(\text{BN}(\text{Conv}(\cdot)))$ dönüşüm fonksiyonunu ifade eder. Her dense bloğun sonunda ‘*transition layer*’ bulunur:

$$x_l^{\text{trans}} = \text{AvgPool}(\text{Conv}_{1 \times 1}(x_l)) \quad (3.16)$$

Bu yapı, derinliğe rağmen parametre verimliliğini korur ve daha önce öğrenilen özelliklerin tekrar kullanımına olanak sağlar.

Performans Metrikleri

Model performansı, doğruluk ve Makro-F1 skoru ile değerlendirilmiştir. Bu metrikler, özellikle sınıf dengesizliklerinin bulunduğu veri setlerinde modelin performansını daha tutarlı bir şekilde ölçmek için kullanılır.

Doğru pozitif (DP), modelin pozitif olarak tahmin ettiği ve gerçekte de pozitif olan örneklerin sayısını ifade eder. Yanlış pozitif (YP) ise modelin pozitif olarak tahmin ettiği ancak gerçekte negatif olan örneklerin sayısıdır. Yanlış negatif (YN), modelin negatif olarak tahmin ettiği ancak gerçekte pozitif olan örneklerin sayısını belirtirken, doğru negatif (DN) modelin negatif olarak tahmin ettiği ve gerçekte de negatif olan örnekleri ifade eder.

Doğruluk, modelin tüm tahminlerinin ne kadarının doğru olduğunu ölçer ve şu şekilde formüle edilir (Chinchor ve Sundheim, 1993):

$$\text{Doğruluk} = \frac{\sum_{c=1}^C DP_c + DN_c}{\sum_{c=1}^C DP_c + YP_c + YN_c + DN_c} \quad (3.17)$$

Kesinlik, modelin pozitif tahminlerinin ne kadarının doğru olduğunu gösterir ve aşağıdaki formülle hesaplanır(Chinchor ve Sundheim, 1993):

$$Kesinlik_c = \frac{DP_c}{DP_c + YP_c} \quad (3.18)$$

Duyarlılık ise modelin gerçek pozitif örneklerden ne kadarını doğru tahmin ettiğini ölçer(Chinchor ve Sundheim, 1993):

$$Duyarlılık_c = \frac{DP_c}{DP_c + YN_c} \quad (3.19)$$

Kesinlik ve Duyarlılık'ın harmonik ortalaması olan F1 skoru, özellikle sınıf dengesizliklerinde daha adil bir performans göstergesidir ve şu şekilde ifade edilir:

$$F1_c = 2 * \frac{Kesinlik_c * Duyarlılık_c}{Kesinlik_c + Duyarlılık_c} \quad (3.20)$$

F1 skoru literatürde genellikle Çizelge 3.11.'de özetlenen aralıklara göre değerlendirilmektedir(Powers, 2011; Sokolova ve Lapalme, 2009; Chicco ve Jurman, 2020)

Çizelge 3.11. F1 Skoru Sınıflandırma Aralığı

F1 Skoru Aralığı	Yorum
0.90 – 1.00	Mükemmel / Çok yüksek performans
0.80 – 0.89	Yüksek / Başarılı sınıflandırma
0.70 – 0.79	Kabul edilebilir fakat geliştirilmeli
0.60 – 0.69	Zayıf / Sınıflandırma hataları belirgin
< 0.60	Düşük / Çoğu uygulama için yetersiz

Makro-F1 skoru ise tüm sınıfların F1 skorlarının ortalamasını temsil eder ve şu şekilde hesaplanır:

$$Makro - F1 = \frac{1}{C} \sum_{c=1}^C F1_c \quad (3.21)$$

Burada C toplam sınıf sayısını ifade eder. Doğruluk ve Makro-F1 skorları, birlikte kullanılarak modelin genel ve sınıf bazlı performansı değerlendirilebilir ve özellikle dengesiz sınıflara sahip veri setlerinde modelin başarısını objektif olarak yansıtır.

3.2.2. Bulanık Mantık

Bu çalışmada belirsizlik içeren karar süreçlerinin modellenmesi amacıyla bulanık mantık (fuzzy logic) yöntemi tercih edilmiştir. Bulanık mantık, ilk kez 1965 yılında Prof. Lotfi A. Zadeh tarafından ortaya atılmıştır. Zadeh, klasik (ikili) mantık sistemlerinin insan düşünce yapısındaki belirsizlik ve yaklaşık yargıları ifade etmede yetersiz kaldığını öne sürmüştür. Bu yaklaşımla, gerçek yaşamın çoğu durumunun "evet/hayır", "doğru/yanlış" gibi keskin ayrımlar yerine "biraz", "çoğunlukla", "yaklaşık olarak" gibi bulanık ifadelerle tanımlanabileceğini savunmuştur (Zadeh, 2015).

Bu bağlamda, bulanık mantık; özellikle belirsizlik içeren karmaşık sistemlerin modellenmesi, insan benzeri karar süreçlerinin simülasyonu ve doğal dildeki belirsizliklerin işlenmesi gibi alanlarda klasik yöntemlere göre daha esnek ve uyarlanabilir çözümler sunmaktadır.

Klasik mantığın ikili (0 veya 1) yapısına karşın bulanık mantık, değişkenlerin ara değerlere sahip olabildiği ve insan mantığına daha yakın sonuçlar üreten bir yaklaşım sunar. Özellikle sosyal bilimler, mühendislik, tıp ve ekonomi gibi alanlarda kesin olmayan, sözel tanımlamalara dayanan verilerin analizinde etkili sonuçlar sunmaktadır (Mahmood, 2010).

Modelleme süreci aşağıdaki adımlarla gerçekleştirilmiştir:

- Giriş ve çıkış değişkenlerinin tanımlanması: Problemin yapısına uygun olarak sistemde kullanılan giriş ve çıkış değişkenleri belirlenmiştir.
- Üyelik fonksiyonlarının oluşturulması: Giriş ve çıkış değişkenleri için trapez ve üçgensel tipi üyelik fonksiyonları tanımlanmıştır.
- Kural tabanının oluşturulması: Uzman görüşleri ve literatürden yararlanılarak “Eğer... ise...” şeklinde kurallardan oluşan bir bulanık kural tabanı hazırlanmıştır.
- Çıkarım mekanizması: Mamdani tipi çıkarım sistemi uygulanmıştır.
- Durulaştırma : Nihai karar, ağırlıklı ortalama yöntemi ile bulanık çıktıdan net çıktıya dönüştürülmüştür.

Üyelik Fonksiyonları

Bulanık mantık sistemlerinde her giriş değişkeni için bir evrensel küme tanımlanır ve bu kümedeki her öğenin bulanıklık derecesi, bir üyelik fonksiyonu ile belirlenir.

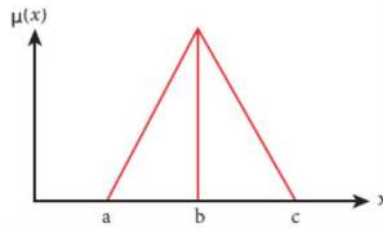
Bir üyelik fonksiyonu:

$\mu_A(x)$: $X \rightarrow [0,1]$ şeklindedir. Burada $\mu_A(x)$, x elemanının A bulanık kümesine üyelik derecesini gösterir.

$\tilde{A} = (a, b, c)$ parametreleri bulunan üçgen üyelik fonksiyonu şu şekilde tanımlanır:

$$\mu_A(x) = \begin{cases} 0 & x \leq a \\ \frac{x-a}{b-a} & a < x \leq b \\ \frac{c-x}{c-b} & b < x < c \\ 0 & x \geq c \end{cases} \quad (3.22)$$

Matematiksel gösterimde bulunan a ve c değerleri üçgenin sağ ve sol taban değerini gösterirken, b değeri üçgenin tepe noktasını göstermektedir. Üçgen üyelik fonksiyonuna ait grafik Şekil 3.7. 'de gösterilmiştir.

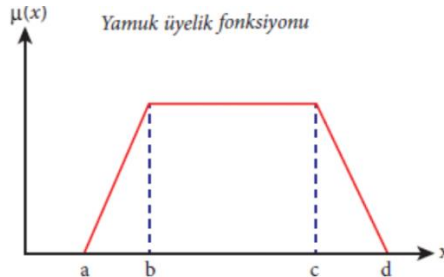


Şekil 3.7. Üçgen Üyelik Fonksiyonu

$\tilde{A} = (a, b, c, d)$ parametreleri bulunan yamuk üyelik fonksiyonu şu şekilde tanımlanır:

$$\mu_A(x) = \begin{cases} \frac{x-a}{b-a} & a \leq x \leq b \\ 1 & b \leq x \leq c \\ \frac{d-x}{d-c} & c < x \leq d \\ 0 & x > d \text{ veya } x < a \end{cases} \quad (3.23)$$

Matematiksel gösterimde bulunan a ve d değerleri yamuk üyelik fonksiyonlarının alt ve üst sınırlarını gösterirken, b ve c aralığı üyelik fonksiyonunun en büyük olduğu yeri göstermektedir. Yamuk üyelik fonksiyonuna ait grafik Şekil 3.8. 'de gösterilmiştir.



Şekil 3.8. Yamuk Üyelik Fonksiyonu

Bulanık Kural Tabanı

Bulanık çıkarım sistemi, "Eğer... ise..." şeklindeki kural tabanından oluşmaktadır. Bu çalışmada kullanılan Mamdani tipi çıkarım sisteminde kural örnekleri aşağıdaki gibidir:

- Kural 1: Eğer "Giriş1" düşük ve "Giriş2" yüksek ise "Çıkış" orta
- Kural 2: Eğer "Giriş1" orta ve "Giriş2" orta ise "Çıkış" yüksek

Her kuralın matematiksel gösterimi aşağıdaki gibidir.

$$R_i : \text{Eğer } x_1 \in A_i^1 \text{ ve } x_2 \in A_i^2 \text{ ise } y \in B_i$$

Burada A_i^1, A_i^2 girişlerin üyelik fonksiyonları, B_i ise çıkışa ait üyelik fonksiyonudur. Kural tabanı oluşturulurken uzman bilgisine veya geçmiş verilere dayalı olarak mantıksal ilişkiler belirlenir. Mamdani sisteminde bu kuralların sonucunda çıkış fonksiyonu bulanıklaştırılır ve daha sonra durulaştırılır (Abduljabar, 2011; Özkan, 2017).

Çıkarım Mekanizması

Mamdani tipi çıkarım mekanizması, en yaygın kullanılan yöntemlerden biridir. Her kural için giriş değerlerinin minimum üyelik derecesi alınır:

$$\mu_{B_i}(y) = \min(\mu_{A_i^1}(x_1), \mu_{A_i^2}(x_2)) \quad (3.24)$$

Tüm kurallardan gelen sonuçlar birleştirilerek toplam çıkış bulanık kümesi elde edilir:

$$\mu_B(y) = \max(\mu_{B_i}(y)) \quad (3.25)$$

Bu yöntemin avantajı, sezgisel olarak anlaşılabilir olması ve insan uzman bilgisi ile kolay uyum sağlamasıdır. Mamdani tipi sistemler, özellikle kontrol sistemleri ve sosyal uygulamalarda tercih edilmektedir (Mahmood, 2010; Abduljabar, 2011).

Durulaştırma

Bulanık çıkarım sisteminden elde edilen sonuç, bir bulanık kümedir. Bu sonucu tek bir sayısal değere çevirmek için durulaştırma işlemi uygulanır. En yaygın kullanılan yöntem "ağırlıklı ortalama" veya "merkez" yöntemidir :

$$y^* = \frac{\int y \cdot \mu_B(y) dy}{\int \mu_B(y) dy} \quad (3.26)$$

Bu yöntem, tüm çıkış değerlerini dikkate alarak çıktının ağırlık merkezini hesaplar ve daha dengeli sonuçlar üretir (Abduljabar, 2011; Özkan, 2017).

3.2.3. Matematiksel Programlama

Matematiksel programlama, karmaşık karar verme problemlerinde optimum çözümü elde etmek amacıyla kullanılan bir modelleme yaklaşımıdır (Hillier ve Lieberman, 2015). Genellikle kaynakların en iyi şekilde tahsis edilmesi gibi uygulamalarda kullanılır ve mühendislik, ekonomi, finans, lojistik ve yönetim bilimleri gibi birçok farklı alanda yaygın şekilde uygulanır. Optimizasyon modelleri, farklı kriterlere göre çeşitli şekillerde sınıflandırılabilir. Bu genellikle modelin kısıt yapısına, karar değişkenlerinin türüne, amaç fonksiyonunun biçimine ve belirsizlik durumuna göre yapılır. Kısıt yapısına göre modeller ikiye ayrılır: kısıt içeren (kısıtlı) ve kısıt içermeyen (kısıtsız) problemler. Amaç fonksiyonu ve kısıtların matematiksel yapısına göre ise doğrusal programlama, doğrusal olmayan programlama, geometrik programlama ve kuadratik programlama gibi alt sınıflar olarak belirtilmektedir. Karar değişkenlerinin türüne göre, modeller tam sayılı programlama ya da gerçek değerli programlama olarak sınıflandırılabilir. Belirsizlik durumuna göre ise deterministik modeller ile stokastik modeller ayrımı yapılır. Optimizasyonun amaç sayısına göre; yalnızca tek bir hedefin optimize edildiği tek amaçlı programlama ve birden fazla hedefin aynı anda değerlendirildiği çok amaçlı programlama gibi sınıflandırılabilir (Ghaoui, 1997; Ben-Tal ve Nemirovski, 1999).

Bu çalışmada geliştirilen model, kısıtlayıcı stokastik parametrelerle desteklenen çok amaçlı karma tamsayılı doğrusal programlama yapısındadır. Çok amaçlı yapıyı çözmek için hem önceliklendirilmemiş hedef programlama hem de ağırlıklı hedef programlama yaklaşımları uygulanmıştır.

Çalışma kapsamında 5 farklı amaç fonksiyonu dikkate alınmaktadır. Belirlenen amaçlar ve kısıtlar dikkate alınarak önceliklendirmeli ve ağırlıklı çok amaçlı modelleme yaklaşımları ile Google Colab ortamında Python da optimum çözümler bulunmuştur. Modeller oluşturulurken dikkate alınan varsayımlar aşağıda belirtilmiştir.

Model Varsayımları

1. Araç kapasitesi ve yakıt tipi dikkate alınmamıştır.
2. Taşıma sırasındaki tazelik durumu dikkate alınmıştır.
3. Her ülkede belli bir noktada ürün teslim edilmektedir. Teslim noktasındaki depo kapasitesi sabittir.

4. Taşıma aracı sefer sayısı ile ilgili bir kısıt olmadığı varsayılmıştır. Taşımalarda 3. Parti lojistik hizmeti alındığı için kg başına kaç km taşındığı dikkate alınmıştır.
5. Taşıma fiyatları, talepler ve emisyonlar sabit alınmaktadır.
6. Bahçeden satın alınan ürün miktarı ihtiyaç kadardır (Tüm bahçeyi almak zorunluluğu yoktur).

Notasyon

Kümeler ve İndeksler

$i \in I$: Bahçeler

$j \in J$: Ülkeler

$k \in K$: Taşıma Modları

$p \in P$: Ürünler

$r \in R$: Havayolu Parça Blokları

Karar Değişkenleri

x_{ijkp} : Bahçe i 'den alınmış olan ülke j 'ye mod k ile gönderilen p ürün miktarı (kg)

w_{rjp} : Havayolu blok r , ülke j , ürün p akışı (kg)

$z_{jkp} \in \{0,1\}$: $\begin{cases} 1 & \text{Eğer ülke } j \text{ ürün } p \text{ için mod } k \text{ seçilirse} \\ 0 & \text{Aksi takdirde} \end{cases}$

$u_{ip} \in \{0,1\}$: $\begin{cases} 1 & \text{Eğer bahçe } i \text{ ürün } p \text{ kullanılmışsa} \\ 0 & \text{Aksi takdirde} \end{cases}$

$y_{rjp} \in \{0,1\}$: $\begin{cases} 1 & \text{Eğer havayolu blok } r, \text{ ülke } j, \text{ ürün } p \text{ seçilmişse} \\ 0 & \text{Aksi takdirde} \end{cases}$

Parametreler

d_{jp} : Ülke j , ürün p talebi (kg)

s_{ip} : Bahçe i , ürün p kapasitesi (kg)

q_{ip} : Bahçe i , ürün p için kalite ağırlığı

δ_p : Ürün p için günlük bozulma katsayısı (%/gün)

v_k : Mod k 'nin günlük ortalama hızı (km/gün)

b_k : Taşıma modu için bekleme süresi (gün)

t_{jk} : Ülke j 'ye mod k ile taşıma süresi (gün)

$\widetilde{t}_{jk}$: Ülke j'ye mod k ile etkin taşıma süresi (gün)
 c_{jk} : Ülke j, mod k taşıma maliyeti (\$ / ton-km)
 L_r : Havayolu blok r alt sınırı (kg)
 U_r : Havayolu blok r üst sınırı (kg)
 c_r : Havayolu blok r maliyet katsayısı (\$/(kg-km))
 e_k : Mod k karbon emisyon katsayısı (kg CO₂/kg- km)
 F_p : Ürün p için minimum tazelik oranı (%)
 T_p : Ürün p için maksimum taşıma süresi (gün)
 $dist_{jk}$: Ülke j de ki ürün teslim noktasının mod k' ya göre mesafesi (km)
 M : Yeterince büyük bir sayı
 S_q^+ : Optimum kaliteden pozitif sapma miktarı
 S_q^- : Optimum kaliteden negatif sapma miktarı
 S_c^+ : Optimum taşıma maliyetinden pozitif sapma miktarı
 S_c^- : Optimum taşıma maliyetinden negatif sapma miktarı
 S_e^+ : Optimum emisyonlardan pozitif sapma miktarı
 S_e^- : Optimum emisyonlardan negatif sapma miktarı
 S_t^+ : Optimum taşıma süresinden pozitif sapma miktarı
 S_t^- : Optimum taşıma süresinden negatif sapma miktarı

Tek Amaçlı Matematiksel Modeller

Çalışmada uygulama yapılan firmanın ihtiyaçları doğrultusunda kaliteli ürün miktarı maksimizasyonu, taşıma maliyeti minimizasyonu, teslim süresi minimizasyonu, karbon emisyonu minimizasyonu ve elde kalan ürün minimizasyonu olmak üzere 5 farklı amaç fonksiyonu belirlenmiştir.

Amaç 1. Kaliteli Ürün Miktarı Maksimizasyonu: Bu amaç fonksiyonu, bahçe ve ürün bazlı kalite katsayıları kullanılarak ülkelere gönderilen toplam kaliteli ürün miktarını maksimize etmeyi hedeflemektedir. Böylece model, daha yüksek kaliteye sahip bahçelerden yapılarak tedarik zincirinde ürün kalitesinin yüksek olmasını sağlar. Bunu sağlayan formül denklem (3.27) 'de verilmiştir.

$$Max\ Kalite \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} \sum_{k \in K} \sum_{p \in P} q_{ip} x_{ijkp} \quad (3.27)$$

Kurulan matematiksel modelde amaç fonksiyonu gerçekleştirilirken birtakım kısıtlar dikkate alınmaktadır. Bu modelde her ülkenin farklı ürünlerden talebi vardır ve bu talep karşılanmak zorundadır. Talebin karşılanmasını sağlayan kısıt denklem (3.28)'de verilmiştir.

$$\sum_{i \in I} \sum_{k \in K} x_{ijkp} = d_{jp}, \forall j, p \quad (3.28)$$

Ülkelere gönderilecek ürün miktarı bahçe kapasitelerini aşamaz ve bu kapasiteler o bahçeden ürün alındıysa dikkate alınır. Bu kısıt denklem (3.29)' a yansıtılmıştır.

$$\sum_{j \in J} \sum_{k \in K} x_{ijkp} \leq s_{ip} u_{ip} \quad \forall i, p \quad (3.29)$$

Taşınan ürünlerin zaman içindeki bozulma oranını, etkin taşıma süresini dikkate alan ve hedef tazelik oranını sağlamak zorunda olan tazelik kısıtı denklem (3.30)'da verilmiştir.

$$\sum_{i,k} \max\{0, (1 - \delta_p \widetilde{t}_{jk})\} x_{ijkp} \geq F_p^{min} d_{jp} \quad \forall j, p \quad (3.30)$$

Amaç 2. Taşıma Maliyeti Minimizasyonu: Modeldeki taşıma maliyeti minimizasyonu amacı ürünlerin bahçelerden talep edilen ülkelere en düşük toplam taşıma maliyetiyle ulaştırılmasıdır. Bu amaç, her taşıma modunun mesafe başına birim maliyeti ve havayolunda farklı yük aralıklarına göre değişen fiyatlandırma yapısını dikkate alır. Böylece hangi bahçeden hangi ürünü hangi modla ve hangi kapasite aralığında göndermenin en ekonomik olacağını belirlemektedir. Toplam lojistik maliyetini azaltmaya çalışırken gerçekçi taşıma maliyet yapısını modele entegre etmektedir. Bu amacı yansıtan denklem (3.31)'de verilmiştir.

$$Min \text{ Maliyet } \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} \sum_{k \in K} \sum_{p \in P} \frac{c_{jk} \cdot \text{dist}_{jk}}{1000} x_{ijkp} + \sum_{r \in R} c_r \text{dist}_{jk} w_{rjp} \quad (3.31)$$

Modelde mod akış bağlantısının sağlanması için denklem (3.32) verilmiştir. Burada $z_{jkp} = 1$ ise o ürün ve ülke için mod k kullanılabilir, $z_{jkp}=0$ ise o moda akış yapılamaz.

$$\sum_{i \in I} x_{ijkp} \leq d_{jp} M z_{jkp}, \forall j, p, k \quad (3.32)$$

Havayolu taşımacılığında yük arttıkça birim maliyetin düşmesi durumunu gösteren denklem (3.33) - (3.35) modele eklenmiştir. Burada her blok için belirlenen taşıma miktarı alt (L_r) ve üst (U_r) sınırlar içinde kalır. Bu miktar taşınan miktara eşittir ve havayolu taşımacılığı varsa tek blok üzerinden yapılır.

$$\sum_{i \in I} x_{ij2p} = \sum_{r \in R} w_{rjp} \quad (3.33)$$

$$\sum_{r \in R} y_{rjp} \leq 1, \quad \forall j, p \quad (3.34)$$

$$L_r y_{rjp} \leq w_{rjp} \leq U_r y_{rjp} \quad \forall j, p, r \quad (3.35)$$

Amaç 3. Taşıma Süresi Minimizasyonu: Bu amaç fonksiyonu taşıma süresini en aza indirmeyi hedefler. Ürünlerin teslimatında hangi taşıma modlarının seçileceğini belirlerken toplam taşıma (t_{jk}) ve bekleme sürelerini (b_k) mümkün olduğunca kısaltmayı amaçlar. Özellikle bozulabilir ürünlerin tazeliğini korumak için daha hızlı taşıma modlarının tercih edilmesini sağlamaktadır ve denklem (3.36) ile gösterilmiştir.

$$\text{Min Süre} = \sum_{i,j,k,p} \widetilde{t}_{jk} z_{jkp} \quad \widetilde{t}_{jk} = t_{jk} + b_k \quad (3.36)$$

Ürün bazında tanımlı ürünün raf ömrüne bağlı olarak belirlenmiş maksimum taşıma süreleri mevcuttur. Ürünün taşıma sürelerinin bu maksimum süreyi aşmamasını sağlayan kısıt (3.37) ile gösterilmiştir.

$$\sum_{i,k} \widetilde{t}_{jk} \leq T_p^{\max} M (1 - z_{jkp}) \quad , \forall j, p \quad (3.37)$$

Amaç 4. Karbon Emisyonu Minimizasyonu: Bu fonksiyon, her taşıma modu ve mesafe için kg başına karbondioksit salımını dikkate almaktadır. Böylece, lojistik ağ tasarımı yapılırken toplam karbon emisyonu azaltılmaya çalışılır ve daha çevreci taşıma modlarının tercih edilmesi teşvik edilir. Özellikle sürdürülebilirlik ve yeşil tedarik zinciri hedefleri açısından modelin çevresel etkisini minimize eder. Bu amaç denklem (3.38) ile yansıtılmıştır. Literatürde her mod karbon emisyon miktarları ton başına hesaplandığından birim uyumu için denklem 1000'e bölünmüştür. Bu amaç fonksiyonu için özel kısıt bulunmamaktadır ancak mod seçimi, kapasite ve tazelik kısıtları dolaylı etkiler yaratır.

$$\text{Min Emisyon} = \sum_{i,j,k,p} \frac{e_k \text{ dist}_{jk}}{1000} x_{ijkp} \quad (3.38)$$

Amaç 5. Elde Kalan Ürün Minimizasyonu: Bu amaç fonksiyonu bahçelerde kullanılmadan kalan kapasiteyi en aza indirmeyi hedeflemektedir. Toplam kullanılabilir kapasite ile gerçekte gönderilen miktar arasındaki farkı minimize eder. Yani model, bahçelerde üretilip kullanılmadan kalan veya satılamayan ürün miktarını azaltmaya çalışır. Böylece fazla üretim, depolama ve atık maliyetleri önlenir; kaynak kullanımı daha verimli hale gelir. Amaç fonksiyonu denklem (3.39) ile gösterilmiştir. Kısıt (3.28), (3.29) ve (3.32) ile belirlenen kapasite, talep ve akış kısıtlarıyla birlikte çalışır.

$$\text{Min Elde Kalan} = \sum_{i \in I} S_{ip} u_{ip} - \sum_{j \in J} \sum_{k \in K} x_{ijkp} \quad (3.39)$$

Çok Amaçlı Matematiksel Modeller

Çok amaçlı matematiksel modeller, birden fazla hedefin aynı anda optimize edilmesini amaçlayan modellere verilen isimdir. Bu modeller, karar vericilere çeşitli senaryolar arasında denge kurma ve kaynakları daha etkin kullanma imkanı tanımaktadır. Özellikle tedarik zinciri yönetimi ve üretim sistemlerinde yaygın olarak kullanılır. Bu tür modellerin çözümünde kullanılan yöntemler, karar vericinin tercihlerine ne zaman ve nasıl dahil edildiğine göre sınıflandırılabilir (Sarıkaya ve ark., 2014).

Önceden belirlenmiş tercihlerle yapılan yöntemler karar vericinin hedefler arasındaki önceliklerini önceden belirttiği yöntemlerdir. Bu grupta yer alan ağırlıklandırma yöntemi, tüm amaçların belirli katsayılarla birleştirilerek tek amaçlı bir modele indirgenmesini sağlar (Lieberman, 1991). Sonradan yapılan tercihlere dayalı yöntemler, çok sayıda Pareto-optimal çözüm üretir ve karar verici bu çözümler arasından seçim yapar. Epsilon-kısıt yöntemi, bir hedefi optimize ederken diğerlerine kabul edilebilir kısıtlar uygulanması esasına dayanır. Etkileşimli yöntemler, karar vericinin sürece adım adım katılımını sağlar ve her adımdaki tercihi göre çözüm alanı daraltılır. Bulanık yöntemler, karar vericinin hedeflerini kesin biçimde ifade edemediği durumlarda kullanılır. Bu modellerde amaç fonksiyonlarına ait “tatmin düzeyleri” tanımlanarak optimizasyon gerçekleştirilir (Sarıkaya ve ark., 2014). Evrimsel algoritmalar (örneğin Genetik Algoritmalar), büyük ve karmaşık çok amaçlı problemlerde Pareto-optimal çözümler üretmek amacıyla kullanılır ve klasik yöntemlere göre daha esnek bir yapı sunar (Görgün ve ark., 2015).

Bu çalışmada bahsedilen çok amaçlı matematiksel model yöntemlerinden hedef programlama yöntemi kullanılmıştır.

Hedef Programlama

Çok amaçlı karar verme problemlerini çözmek amacıyla geliştirilmiş etkili bir tekniktir. Bu yöntemde, her bir amaç fonksiyonu için bir hedef değer tanımlanır ve modelin amacı, bu hedeflerden olan sapmaları minimize etmektir (Ignizio, 1985). Hedef programlama üç ana alt türe ayrılır: klasik hedef programlama, tüm sapmaların toplamını minimize etmeyi amaçlarken; öncelikli hedef programlama, hedefleri önem sırasına göre hiyerarşik olarak ele alır; ağırlıklı hedef programlama ise sapmaları kullanıcı tarafından belirlenen göreceli önem derecelerine göre optimize eder (Romero, 2014). Ayrıca, belirsizlik içeren durumlar için geliştirilen bulanık hedef programlama yöntemi, karar vericinin tercihlerini daha esnek biçimde ifade edebilmesine olanak tanır (Sarıkaya ve ark., 2014).

Çalışma kapsamında beş farklı amaç dikkate alınmaktadır. Bu amaçların tek amaçlı optimum değerlerine bağlı olarak önceliklendirmesiz ve ağırlıklı hedef programlama yaklaşımı ile etkin çözümler elde edilmiştir.

Önceliklendirmesiz Hedef Programlama

Çalışmada kullanılan hedef programlama modeli, ilk olarak önceliklendirme yapılmamış klasik bir HP yaklaşımıyla çözülmüştür. Öncelikle her bir amaç fonksiyonu için ayrı tek amaçlı doğrusal karma tam sayılı programlar çözülerek optimum değerler belirlenmiştir. Daha sonra bu değerler, hedef seviyeler olarak modele dâhil edilmiş ve her amaç için pozitif ve negatif sapma değişkenleri tanımlanmıştır. Amaç fonksiyonu, tüm hedeflerin hedeflerin farklı ölçeklerini karşılaştırılabilir hâle getirmek için çapraz ölçeklendirme kısıtları eklenmiştir ve sapmaların toplamını minimize edecek şekilde oluşturulmuştur. Böylece hedefler arasında herhangi bir öncelik sıralaması yapılmamış, her biri eşit ağırlıkla dikkate alınarak çok amaçlı karar verme süreci oluşturulmuştur.

Maliyet, emisyon, kalite, tazelik ve elde kalan ürün miktarları hedeflerinin aynı anda dikkate alınabilmesi amacıyla önceliklendirilmemiş hedef programlama modelinde öncelikle her bir amaç için tek amaçlı modeller çözülerek sırasıyla optimum kalite Q_{opt} , maliyet C_{opt} , emisyon E_{opt} , taşıma süresi T_{opt} ve elde kalan ürün miktarı S_{opt} değerleri elde edilmiştir. Bu ideal değerlerden sapmaları gösteren S^+/S^- değişkenleri modele eklenmiştir. Böylece, her bir amaca ilişkin sapma miktarlarının normalize edilerek toplamının minimize edilmesi amaçlanmıştır.

Maliyet, emisyon, kalite, tazelik ve elde kalan miktar hedeflerinin eşit önemde dikkate alındığı bu önceliklendirilmemiş hedef programlama modelinin amaç fonksiyonu, sapmaların minimize edilmesi şeklinde denklem (3.40)'da tanımlanmıştır. Tek amaçlı modelde yer alan talep, kapasite, tazelik ve süre kısıtlarına ek olarak denklem (3.46)–(3.49)'de verilen kısıtlar eklenerek farklı büyüklükteki hedeflerin karşılaştırılabilir hale gelmesi sağlanmıştır. Denklem (3.40)–(3.48) de eklenerek tüm hedefleri birlikte dengeleyen ve karar vericiye etkin bir çözüm sunan nihai model elde edilmiştir. Negatif olmama kısıtları denklem (3.50) ve (3.51)'de verilmiştir.

$$\min Z = s_q^- + s_c^+ + s_e^+ + s_t^+ + s_s^+ \quad (3.40)$$

$$\sum_{i \in I} \sum_{j \in J} \sum_{k \in K} \sum_{p \in P} q_{ip} x_{ijkp} + s_q^- - s_q^+ = Q_{opt} \quad (3.41)$$

$$(\sum_{i \in I} \sum_{j \in J} \sum_{k \in K} \sum_{p \in P} \frac{c_{jk} \cdot \text{dist}_{jk}}{1000} x_{ijkp} + \sum_{r \in R} c_r \text{dist}_{jk} w_{rjp}) + s_c^- - s_c^+ = C_{opt} \quad (3.42)$$

$$(\sum_{i,j,k,p} \frac{e_k \cdot \text{dist}_{jk}}{1000} x_{ijkp}) + s_e^- - s_e^+ = E_{opt} \quad (3.43)$$

$$(\sum_{i,j,k,p} \tilde{t}_{jk} z_{jkp}) + s_t^- - s_t^+ = T_{opt} \quad (3.44)$$

$$(\sum_{i \in I} s_{ip} u_{ip} - \sum_{j \in J} \sum_{k \in K} x_{ijkp}) + s_s^- - s_s^+ = S_{opt} \quad (3.45)$$

$$C_{opt} s_q^- = Q_{opt} s_c^+ \quad (3.46)$$

$$E_{opt} s_q^- = Q_{opt} s_e^+ \quad (3.47)$$

$$T_{opt} s_q^- = Q_{opt} s_t^+ \quad (3.48)$$

$$S_{opt} s_q^- = Q_{opt} s_s^+ \quad (3.49)$$

$$s_q^-, s_q^+, s_c^-, s_c^+, s_e^-, s_e^+, s_t^-, s_t^+, s_s^-, s_s^+ \geq 0 \quad (3.50)$$

$$x_{ijkp} \geq 0, w_{rjp} \geq 0 \quad (3.51)$$

Ağırlıklı Hedef Programlama

Amaç fonksiyonlarının önceliklendirmesiz hedef programlama ile modellenmesi sonucunda etkin çözümler elde edilmiştir. Fakat tedarik zinciri yapılarında her müşterinin her amaç için farklı beklentileri olabilmektedir. Bu nedenle bu beklentiler dikkate alınarak her amacın farklı önem ağırlığına sahip olması gerektiği sonucuna varılmıştır. Bu nedenle maliyet, emisyon, süre, elde kalan ürün miktarı ve kalite hedefleri ağırlıklandırılmış, önceliklendirilmemiş hedef programlama yaklaşımı ile birlikte ele alınmıştır. Önce her amaç için tek-amaçlı modeller çözülerek ideal değerler elde edilmiştir. Ardından her hedef için sapma değişkenleri tanımlanmış ve hedef kısıtları kurulmuştur. Amaç fonksiyonu, farklı ölçeklerdeki hedefleri karşılaştırılabilir kılmak üzere sapmaların ağırlıklı toplamını minimize etmektedir. Ağırlıklar $(w_q, w_c, w_t, w_e, w_s)$ karar verici

tercihini yansıtmaktadır ve $\sum w = 1$ olacak şekilde seçilmektedir. Sapmaların ağırlıklı toplamının minimize edildiği ağırlıklı amaç fonksiyonu denklem (3.52) ile gösterilmiştir.

$$\min Z = w_q s_q^- + w_c s_c^+ + w_e s_e^+ + w_t s_t^+ + w_s s_s^+ \quad (3.52)$$

Matematiksel modelde önceliklendirmesiz ve ağırlık hedef programlama ile çözümlerde ürünlerin bozulma oranı ürün bazlı değerlendirilmiştir. Kurulacak olan senaryolarla taşıma modlarının ürünlerin bozulmaları üzerindeki etkisinin modele nasıl yansıdığı gösterilmek istenmiştir. Karayolu taşımacılığında titreşim ve sarsıntı nedeniyle mekanik zedelenme ve yüzey hasarı artar (Tao ve ark.,2021; Hou ve ark.,2024) Denizyolunda uzun süreli taşıma ve dış hava koşullarına bağlı olarak sıcaklık dalgalanmaları ve yüksek nem bozulma riskini yükseltir (Mercier ve ark.,2019;. Jedermann ve ark.,2014) Havayolunda en kısa sürede teslimat sağlar ve bu nedenle bozulmayı minimize eder. Bu nedenle senaryolarda ürünlerin bozulma oranları sadece ürüne göre değil taşıma modu k' ya göre de dikkate alınarak revize edilmiştir. Bu değişiklikler sonucu elde edilen sonuçlar Senaryo 1. ve Senaryo 2.' De gösterilmiştir.



4. BULGULAR

Çalışmada elde edilen bulgular bahçe kalite skorlarının belirlenmesi, matematiksel model yaklaşımı ve duyarlılık analizi başlıkları altında incelenmiştir.

4.1. Bahçe Kalite Skorlarının Belirlenmesi

4.1.1. Görüntü İşleme ile Bahçe Kalite Skorlarının Belirlenmesi

Bu çalışmada geliştirilen görüntü işleme modeli iki aşamalı bir kodlama yapısı üzerine kurulmuştur. İlk aşamada portakal ve benzeri narenciye ürünlerinin görüntülerinden hastalık sınıflandırması yapılmaktadır. İkinci aşamada ise her bir bahçeye ait görüntüler topluca değerlendirilerek kalite skorları üretilmektedir. Bu aşamalar Şekil 4.1. 'de gösterilmiştir.



Şekil 4.1. Derin Öğrenme Tabanlı Görüntü Sınıflandırma ve Bahçe Kalite Skoru Üretim Süreci

İlk kısımda, ön-eğitilmiş evrimsel sinir ağı (CNN) mimarilerini karşılaştırarak en yüksek sınıflandırma başarısını sağlayan modeli belirlemek amacıyla geliştirilmiştir. Çalışmada üç farklı mimari değerlendirilmiştir: MobileNetV2, ResNet50 ve DenseNet121.

Model geliştirme sürecinde üç farklı ön-eğitilmiş evrimsel sinir ağı (CNN) mimarisi denenmiş ve doğrulama kümesi üzerinde performansları karşılaştırılmıştır. Elde edilen makro F1 ve doğrulama kaybı değerleri Çizelge 4.1.'de özetlenmektedir.

Tabloya göre ResNet50 mimarisi, doğrulama kümesinde en yüksek makro F1 skoru (0,9811) ve düşük doğrulama kaybı (0,2959) elde ederek diğer mimarilerden daha iyi bir genelleme başarısı göstermiştir. MobileNetV2 ve DenseNet121 de yüksek doğruluk sağlamış olmakla birlikte, ResNet50 özellikle sınıflar arası dengesizliğe karşı daha kararlı sonuçlar vermiştir. Bu nedenle sonraki tüm analizlerde ve bahçe kalite skoru hesaplamalarında nihai sınıflandırma modeli olarak ResNet50 tercih edilmiştir.

Çizelge 4.1. Mimarilerin Karşılaştırılması

Mimari	Makro F1	Doğrulama Kaybı
MobileNetV2	0.9717	0.3102
ResNet50	0.9811	0.2959
DenseNet121	0.9717	0.2894

Model eğitim verilerinden elde edilen sonuçlardan sonra en iyi mimari ile test verisi performansları portakala ait 4 sınıf için uygulanmıştır. Test kümesi sınıf bazlı performans ölçütleri Çizelge 4.2. 'de verilmiştir.

Çizelge 4.2. Test Kümesi Sınıf Bazlı Performans Ölçütleri

Sınıf	Kesinlik	Duyarlılık	F1-Skoru
Kara Lekeli	0.95	0.86	0.90
Yaralı	0.88	0.69	0.77
Sağlıklı	0.81	1.00	0.90
Yeşil	1.00	1.00	1.00

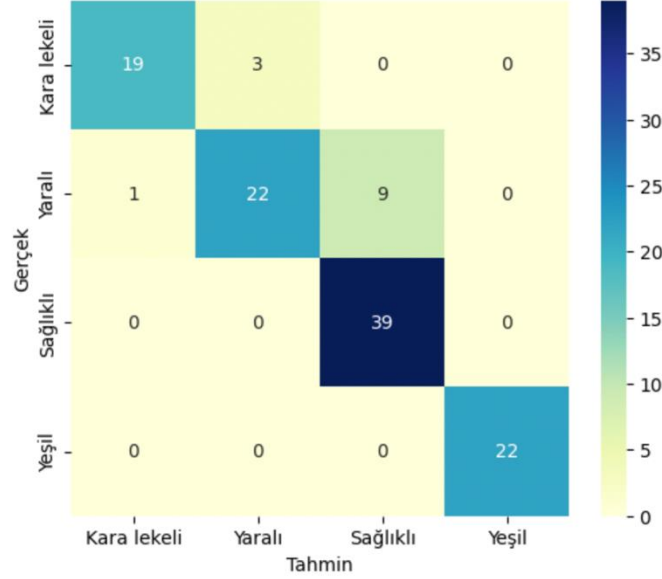
Kara Lekeli sınıfı için Kesinlik = 0.95 değeri, modelin kara lekeli olarak tahmin ettiği görüntülerin %95'inin gerçekten bu sınıfa ait olduğunu göstermektedir. Duyarlılık = 0.86 değeri ise gerçek kara lekeli görüntülerinin %86'sının doğru şekilde yakalandığını, %14'ünün başka sınıflara kaydığını ifade etmektedir. F1-skora göre bu sınıfta model oldukça başarılıdır.

Yaralı sınıfında Kesinlik = 0.88 ile modelin yaralı sınıfı için tahminlerinin çoğu doğru olsa da, Duyarlılık = 0.69 değeri bu sınıfta gerçek görüntülerin yaklaşık %31'inin başka sınıflara özellikle sağlıklı sınıfına kaydığını göstermektedir. F1 skorunun 0.77 olması, bu sınıfın diğerlerine göre daha zor ayrıldığını ve modelin en çok hata yaptığı sınıf olduğunu ortaya koymaktadır.

Sağlıklı portakal görüntüleri için Duyarlılık = 1.00 ile model tüm gerçek sağlıklı portakal görüntülerini eksiksiz bulmuştur. Ancak Kesinlik = 0.81, sağlıklı tahminlerinin %19'unun aslında farklı sınıflara özellikle yaralı sınıfına ait olduğunu göstermektedir.

Yeşil portakal sınıfı hem kesinlik hem de duyarlılık= 1.00 olup çok yüksek bir başarı göstermektedir. Modelin genel doğruluk oranı %88,7 ve makro F1 skoru 0,8933'tür; bu değerler sınıflar arasında dengeli bir başarı elde edildiğini göstermektedir.

Modelin test kümesi üzerinden ürettiği karışıklık matrisi Şekil 4.2. ile gösterilmiştir. Satırlar gerçek sınıfları, sütunlar ise modelin tahmin ettiği sınıfları göstermektedir.



Şekil 4.2. Test Kümesi Karışıklık Matrisi

Şekil 4.2. incelendiğinde kara lekeli sınıfında 22 gerçek kara lekeli görüntüsünden 19'u doğru tahmin edilmiş, 3'ü ise yaralı sınıfına yanlış atanmıştır. Modelin kara lekeli portakal tespiti oldukça başarılıdır. Yaralı sınıfı 32 gerçek yaralı görüntüsünün 22'si doğru belirlenmiş, 9'u sağlıklı, 1'i ise kara lekeli olarak sınıflandırılmıştır. Bu durum, modelin özellikle yaralı belirtilerini bazen sağlıklı görüntülerle karıştırdığını göstermektedir. Sağlıklı sınıfında 39 gerçek sağlıklı görüntüsünün tamamı doğru saptanmıştır. Ancak yaralı sınıfındaki bazı görüntüler yanlış biçimde sağlıklı olarak etiketlenmiştir. Yeşil sınıfında 22 görüntünün tamamı doğru tahmin edilmiştir.

İkinci kısımda ilk olarak bahçe kapasiteleri dikkate alınarak ortalama evren büyüklüğü hesaplanmıştır. Bunun sonucunda örneklem sayısı hesaplamak için Denklem (3.1)-(3.2) kullanılarak %95 güven düzey, %10 hata düzeyi ve $p=0,5$ ile her bahçeden alınması gereken görüntü sayısı yaklaşık olarak 96 olarak bulunmuştur.

Her bir bahçeye ait görüntüler topluca analiz edilerek sınıf dağılımları çıkarılmış ve bu dağılımlar üzerinden kalite ve ağırlıklı kalite skoru olmak üzere iki farklı kalite göstergesi hesaplanmıştır. Kalite skoru (KS) sağlıklı ürünlerin durumunu gösterirken, ağırlıklı kalite skoru (AKS) hastalıkların önem düzeyini de dikkate alan bir kalite göstergesidir.

Ağırlık katsayıları sektör uzmanlarının görüşleri ile geçmiş tecrübeler ve müşteri dönüşlerine göre belirlenmiştir. Sağlıklı meyveler kaliteyi düşürmediği için bu sınıfa herhangi bir ceza

uygulanmamış ve ağırlık değeri 0 olarak belirlenmiştir. Yüzeyde lekelenmeye neden olan kara lekeli, ürünün görsel kalitesini bozarak pazarlanabilirliğini kısmen etkilemekte; bu nedenle orta düzey bir kalite kaybı yaratacak şekilde ağırlık değeri 2 seçilmiştir. Narenciyede ciddi kalite düşüşüne neden olan yaralı sınıfı, en kritik hastalık olarak değerlendirilmiş ve kaliteyi en fazla düşürmesi için ağırlık değeri 3 olarak atanmıştır. Üründe bozulma ve değer kaybına yol açan ancak yaralı kadar ağır ekonomik kayıp yaratmayan yeşil için ise daha düşük fakat göz ardı edilmeyecek bir etkiyi yansıtacak biçimde ağırlık değeri 1 verilmiştir.

Bu ağırlıklandırma sayesinde model, yalnızca hastalıklı ürün oranına bakmak yerine, her hastalığın etkisini kalite skoruna yansıtmaktadır. Böylece özellikle ihracat planlamasında kaliteyi daha gerçekçi ve karar destek sürecine uygun bir şekilde temsil eden sayısal bir ölçüt elde edilmiştir.

Çizelge 4.3. Bahçe Bazında Sınıf Dağılımları, KS ve AKS Değerleri

Bahçe	Kara Lekeli	Yaralı	Sağlıklı	Yeşil	Toplam	KS	AKS
6	0	6	76	13	95	80.00	91.84
3	8	3	67	18	96	69.79	88.80
8	10	9	63	13	95	66.32	84.21
5	19	3	60	13	95	63.16	84.21
7	19	8	62	7	96	64.58	82.03
4	13	14	56	13	96	58.33	78.91
2	20	15	52	9	96	54.17	75.52
1	19	20	47	10	96	48.96	71.88

Bahçe 6 AKS = 91.84 değeri ile en yüksek kaliteyi göstermektedir. Bu bahçe, ihracat ve tedarik planlamasında öncelikli olarak değerlendirilebilir. Bahçe 3 ve Bahçe 8 , yüksek taze ürün oranı %66–70 ve AKS değerleri %84–89 ile kaliteli üretim alanlarıdır. Bahçe 1 ve Bahçe 2 en düşük kaliteye sahip bahçelerdir. Sağlıklı ürün oranları % 48–54, AKS değerleri ise %72–76 aralığındadır. Bu durum bu bahçelerde hastalık yükünün (özellikle yaralı ve kara lekeli) daha yüksek olduğunu göstermektedir. AKS değerleri, hastalık tiplerine göre kaliteye etkisini hesaba kattığından KS’ den daha ayırt edici bir kalite göstergesi sunmaktadır. Örneğin Bahçe 5 ve Bahçe 8 ’de benzer taze oranları olmasına rağmen, kara lekeli ve yaralı dağılımındaki fark AKS değerlerine yansımaktadır.

Bu sonuçlar, bahçeler arasında belirgin kalite farkları bulunduğunu göstermektedir. AKS değerleri özellikle lojistik optimizasyon modeline aktarılabilecek bahçe–ürün kalite katsayılarının q_{ip} belirlenmesinde kritik rol oynamaktadır. Böylece tedarik zinciri tasarımında yalnızca miktar ve maliyet değil, ürünün sağlık durumu ve potansiyel değer kaybı da nicel olarak hesaba katılmıştır.

4.1.2. Bulanık Mantık İle Bahçe Kalite Skorlarının Belirlenmesi

Uygulamada dikkate alınan nar, limon, şeftali ve limon meyvelerinin kalite skorlarının hesaplanması için görüntü işleme ile sınıflandırma yapacak yeterli veri sağlanamadığından Mamdani tip bulanık çıkarım sistemi kullanılmıştır. Model, ürün kalitesini üç temel girdi değişkeni (renk, yüzey durumu ve şekil) üzerinden değerlendirmektedir. Girdi değişkenleri, bulanık kümeler aracılığıyla sayısal aralıklara dönüştürülmüş, çıkış değişkeni ise 0–100 aralığında kalite skoru olarak modellenmiştir. Bulanık mantık modeli, Python programlama dili kullanılarak Google Colab ortamında geliştirilmiştir. Google Colab, Jupyter Notebook tabanlı bir çevrim içi çalışma ortamıdır ve Python kodlarının yazılması, çalıştırılması, görselleştirilmesi gibi işlemleri bulut üzerinde yapmaya olanak tanır. Kodlamada scikit-fuzzy kütüphanesi kullanılmıştır. Bu kütüphane, bulanık çıkarım sistemlerinin Python ortamında kolayca modellenmesini sağlar.

Bulanık mantık modeli kodunda, hem yamuk hem de üçgen üyelik fonksiyonları tanımlanmıştır. Yamuksal fonksiyonlar daha geniş aralıkları temsil etmek için, üçgensel fonksiyonlar ise orta değerlerin ağırlıklandırılması için tercih edilmiştir. Renk için "kötü", "orta" ve "iyi"; yüzey için "çok", "orta" ve "az"; şekil için ise "bozuk", "orta" ve "iyi" etiketleri kullanılmıştır. Çıkış değişkeni kalite için "düşük", "orta" ve "yüksek" kümeleri oluşturulmuştur.

Bulanık çıkarım mekanizması dört adımda gerçekleştirilmiştir: (i) giriş değerlerinin bulanıklaştırılması, (ii) kural tabanının uygulanması, (iii) sonuç kümelerinin maksimum operatörü ile birleştirilmesi (agregasyon), (iv) durulaştırma. Durulaştırma aşamasında, ağırlıklı ortalama yöntemi kullanılarak tek bir kalite skoru elde edilmiştir. Böylece model, her bir bahçe için 0 ile 1 arasında kesin bir kalite değeri üretmektedir.

Ürünlere özgü kural tabanları uzman görüşleri doğrultusunda tanımlanmıştır. Örneğin nar için, “renk=kötü, yüzey=çok, şekil=bozuk ise kalite=düşük” veya “renk=iyi, yüzey=az, şekil=iyi ise kalite=yüksek” gibi kurallar oluşturulmuştur. Her ürün (nar, şeftali, limon, kayısı) için ayrı kural tabanları kodda yer almakta ve karar mekanizması bu kurallar üzerinden çalışmaktadır. Çizelge 4.4. ile değişkenler için uzman görüşüyle tanımlanan üyelik fonksiyon değerleri gösterilmiştir.

Çizelge 4.4. Üyelik Fonksiyon Değerleri

Değişken	Küme	Parametreler
Renk	Kötü	Trap (0.00, 0.00, 0.25, 0.40)
	Orta	Tria (0.30, 0.50, 0.70)
	İyi	Trap (0.60, 0.75, 1.00, 1.00)
Yüzey	Çok	Trap (0.25, 0.40, 1.00, 1.00)
	Orta	Tria (0.15, 0.30, 0.50)
	Az	Trap (0.00, 0.00, 0.10, 0.20)
Şekil	Bozuk	Trap (0.00, 0.00, 0.35, 0.50)
	Orta	Tria (0.45, 0.60, 0.75)
	İyi	Trap (0.70, 0.85, 1.00, 1.00)
Kalite	Düşük	Trap (0.00, 0.00, 0.25, 0.45)
	Orta	Tria (0.40, 0.55, 0.70)
	Yüksek	Trap (0.65, 0.80, 1.00, 1.00)

Genel olarak bakıldığında, her meyvenin pazar standartlarının farklı kalite beklentilerine sahip olduğunu ortaya koymaktadır. Nar ve limonda renk, şeftali ve kayısıda ise yüzey kusursuzluğu kaliteyi belirleyen kritik göstergeler olarak öne çıkmıştır. Bu farklılıklar, bulanık mantık tabanlı modelin ürünlere özgü kalite dinamiklerini başarılı şekilde yansıttığını göstermektedir.

Kod ayrıca, bulanık çıkarım sürecinin görselleştirilmesine olanak tanımaktadır. Grafiklerde kalite değişkenine ait düşük, orta ve yüksek üyelik fonksiyonları gösterilmekte; agregasyon sonucu gri alanla işaretlenmekte ve hesaplanan kesin kalite skoru dikey kesikli çizgi ile vurgulanmaktadır. Bu görseller, modelin karar verme sürecinin şeffaf ve anlaşılır şekilde sunulmasını sağlamaktadır.

Sonuçlar tablolaştırılmış ve her bahçe için renk, yüzey, şekil değerleri ile birlikte hesaplanan kalite skorları raporlanmaktadır. Bu yaklaşım sayesinde karar vericiler, farklı bahçelerin kalite durumlarını sayısal olarak karşılaştırabilmekte ve kalite yönetiminde daha bilinçli tercihler yapabilmektedir. Buradan elde edilen bahçe kalite skorları matematiksel modelde q_{ip} ağırlıkları için kullanılacaktır.

Aşağıda ürün bazında kural tabanı ve bahçelere ait kalite skorlarının olduğu çizelgeler gösterilmiştir. Sonuçlar bu çizelgelere göre yorumlanmıştır. Her bir ürün için üç girdi değişkeni toplamda 27 olası kural kombinasyonu oluşturmaktadır. Bu kural tabanları (EK.A)'da verilmiştir.

Nar için oluşturulan kural tabanı, özellikle renk ve şekil faktörlerini ön plana çıkarmaktadır. Renk kötü olduğunda, yüzey veya şekil iyi olsa dahi kalite skorları düşük kalmıştır. Bu durum, narın pazarlanabilirliğinde rengin tüketici algısı açısından kritik bir rol oynadığını göstermektedir. Öte yandan yüzey bozukluğu az ve şekil düzgün olduğunda yüksek kalite skorları elde edilmiştir.

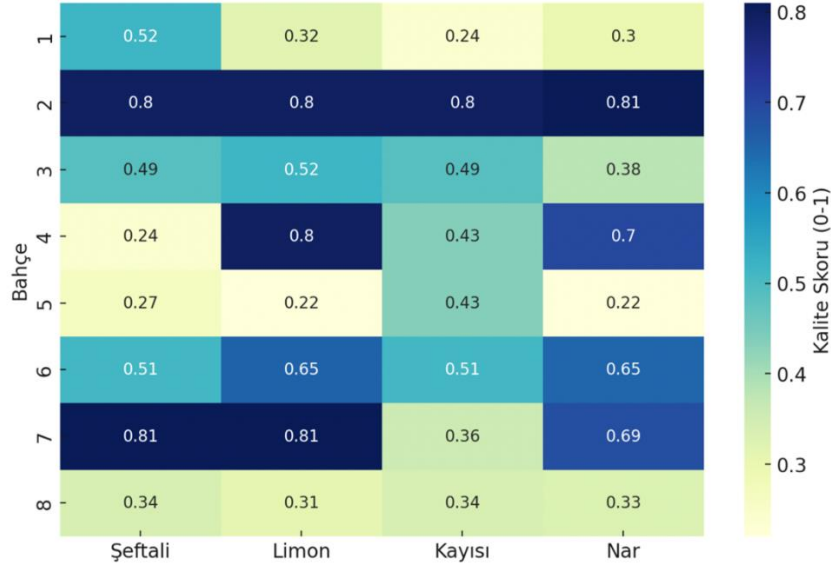
Dolayısıyla nar için olumlu koşullar kaliteyi hızla yükseltirken, olumsuz koşullar kaliteyi belirgin biçimde düşürmektedir.

Limon kurallarında renk ve şekil kriterleri daha baskın biçimde rol oynamaktadır. Renk kötü olduğunda yüzey ve şekil parametreleri kaliteyi kurtaramamış, skorlar düşük çıkmıştır. Parlak ve homojen sarı renk, pazarda limonun en önemli kalite göstergesi olarak ortaya çıkmıştır. Buna ek olarak, şeklin düzgünlüğü de yüksek kalite skorlarının elde edilmesine katkı sağlamıştır. Sonuçlar, limon için rengin kritik bir belirleyici olduğunu, şeklin ise ikinci sırada önemli bir parametre olduğunu göstermektedir.

Şeftali için geliştirilen kurallar, ürünün hassas yapısı nedeniyle yüzey bozukluklarına daha yüksek ağırlık tanımaktadır. Yüzey çok bozuk olduğunda, renk ve şekil iyi olsa dahi kalite düşük bulunmuştur. Bu sonuç, şeftalinin dış görünümündeki kusurların pazar kabulünü doğrudan etkilediğini göstermektedir. Buna karşılık yüzey bozukluğu az ve şekil iyi olduğunda yüksek kalite skorları elde edilmiştir. Dolayısıyla şeftali için yüzey parametresi belirleyici faktör, renk ve şekil ise ikincil göstergeler olarak öne çıkmaktadır.

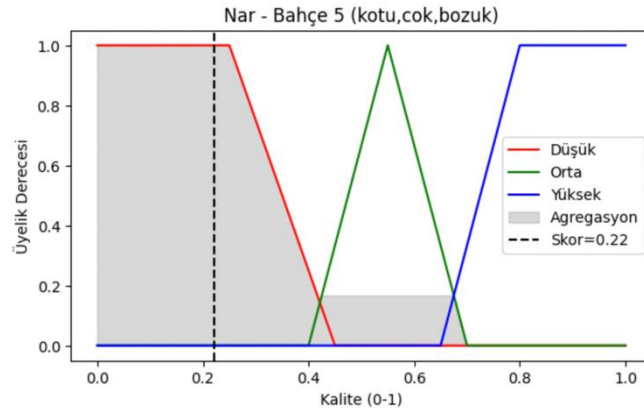
Kayısı kuralları, şeftaliye benzer biçimde yüzey ve şekil faktörlerine güçlü bir vurgu yapmaktadır. Yüzey çok bozuk olduğunda kalite düşük çıkmış, renk bu etkiyi telafi edememiştir. Az bozuk yüzey ve düzgün şekil kombinasyonunda ise yüksek kalite skorları elde edilmiştir. Kayısı için renk nispeten daha az kritik iken, yüzey bütünlüğü ve şekil düzgünlüğü kaliteyi belirleyen temel faktörler olmuştur.

Şekil 4.3.'de, dört ürün (Şeftali, Limon, Kayısı ve Nar) için sekiz farklı bahçeden elde edilen kalite skorları ısı haritası ile gösterilmektedir. Renk yoğunluğu, kalite seviyesini görsel olarak ifade etmektedir. Buna göre, Bahçe 2 ve Bahçe 7'nin genel olarak tüm ürünlerde yüksek kalite skoruna sahip olduğu, buna karşın Bahçe 5'in özellikle düşük kalite değerleri ile öne çıktığı görülmektedir. Bu durum, bahçe seçiminde kalite kriterlerinin dikkate alınmasının önemini göstermektedir. Ayrıca, normalize edilmiş 0–1 aralığındaki skorlar, farklı ürünler arasında karşılaştırmaya olanak sağlamaktadır.



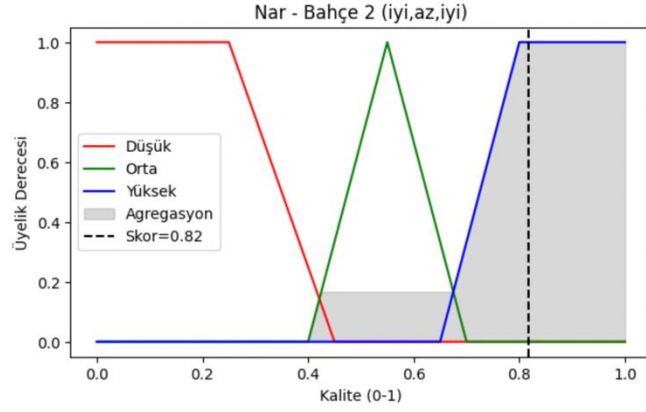
Şekil 4.3. Bahçe ve Ürün Bazında Kalite Skorlarının Isı Haritası

Şekil 4.4.'te nar ürününde bahçe 5 için üyelik fonksiyon grafiği gösterilmektedir. Renk “kötü”, yüzey “çok bozuk” ve şekil bozuk” olduğundan kural tabanı düşük kaliteyi baskın hale getirmiştir. Agregasyon alanı büyük ölçüde düşük kalite bölgesinde yoğunlaşmış, durulaştırma sonucu kalite skoru 0.22 bulunmuştur. Bu skor, nar ürününde rengin ve yüzey kusurlarının pazarlanabilir kaliteyi doğrudan düşürdüğünü göstermektedir.



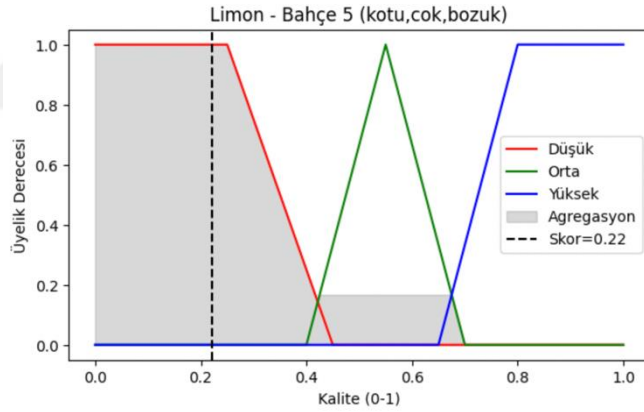
Şekil 4.4. Nar- Bahçe 5 için Üyelik Fonksiyon Grafiği

Şekil 4.5 'te nar ürününde bahçe 2 için bulanık çıkarım sonucu gösterilmektedir. Renk “iyi”, yüzey kusuru “az” ve şekil “iyi” olduğu için yüksek kalite üyelik fonksiyonu baskın hale gelmiştir. Agregasyon alanı büyük ölçüde yüksek kalite bölgesinde yoğunlaşmış, durulaştırma sonucu kalite skoru 0.82 bulunmuştur. Bu skor, bahçeden elde edilen narların pazar açısından yüksek kaliteli kabul edildiğini göstermektedir.



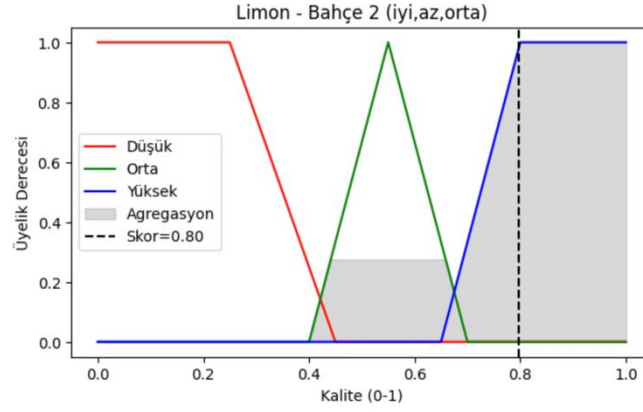
Şekil 4.5. Nar-Bahçe 2 için Üyelik Fonksiyon Grafiği

Şekil 4.6. 'da Limon bahçe 5 için renk “kötü”, yüzey “çok bozuk” ve şekil “bozuk” olduğundan düşük kalite üyelik fonksiyonu baskın çıkmıştır. Agregasyon alanı büyük ölçüde düşük kalite bölgesinde yoğunlaşmış, durulaştırma sonucu kalite skoru 0.22 olarak hesaplanmıştır. Bu sonuç, limon ürününde özellikle renk faktörünün kalite üzerinde belirleyici bir etkiye sahip olduğunu, yüzey ve şekil parametrelerinin kötü değerlere sahip olması halinde kaliteyi kötü etkilediğini göstermektedir.



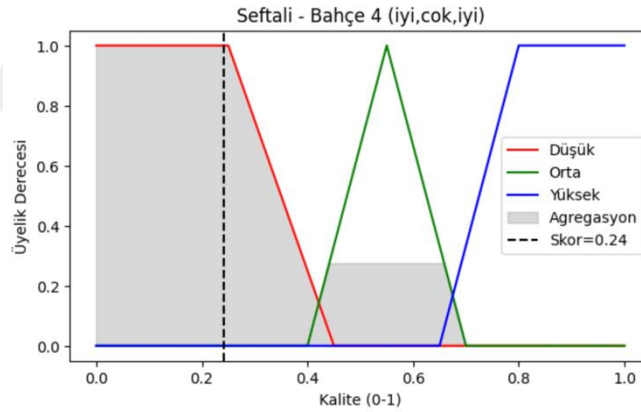
Şekil 4.6. Limon- Bahçe için 5 Üyelik Fonksiyon Grafiği

Şekil 4.7.' de Limon – Bahçe 2 için bulanık çıkarım sonucu gösterilmektedir. Renk “iyi”, yüzey kusuru “az” ve şekil “orta” olarak değerlendirildiğinde yüksek kalite üyelik fonksiyonu baskın hale gelmiştir. Agregasyon alanı büyük ölçüde yüksek kalite bölgesinde yoğunlaşmış, durulaştırma sonucu kalite skoru 0.80 bulunmuştur. Bu değer, limon ürününde özellikle rengin kritik belirleyici olduğunu ve yüzey kusurlarının az, şeklin ise kabul edilebilir düzeyde olduğu durumlarda yüksek kalite skorlarının elde edildiğini göstermektedir.



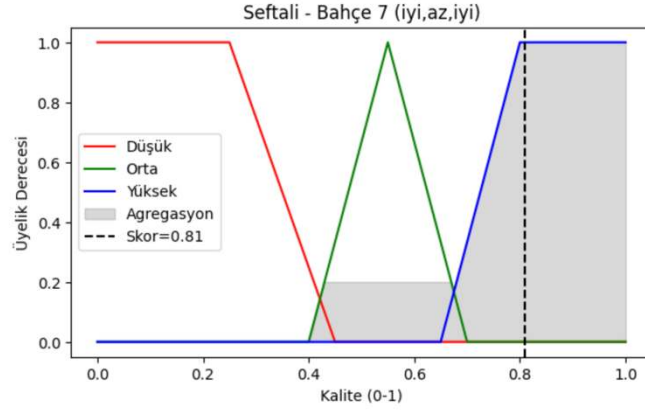
Şekil 4.7. Limon- Bahçe 2 için Üyelik Fonksiyon Grafiği

Şeftali – Bahçe 4 için bulanık çıkarım sonucu Şekil 4.8.’de sunulmaktadır. Renk ve şekil kriterleri “iyi” olmasına rağmen yüzey kusurlarının “çok” bozuk olması nedeniyle düşük kalite üyelik fonksiyonu baskın hale gelmiştir. Agregasyon alanı büyük ölçüde düşük kalite bölgesinde yoğunlaşmış, durulaştırma sonucu kalite skoru 0.24 bulunmuştur. Bu bulgu, şeftali ürününde yüzey kusurlarının kaliteyi belirleyen en kritik faktörlerden biri olduğunu göstermektedir; renk ve şekil iyi olsa dahi yüzeydeki bozukluk kaliteyi ciddi şekilde azaltmaktadır.



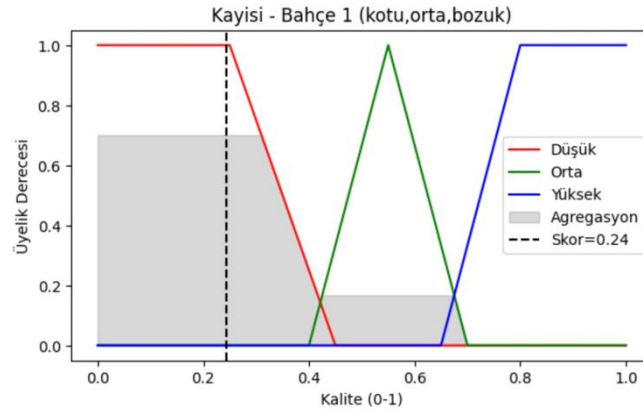
Şekil 4.8. Şeftali- Bahçe 4 için Üyelik Fonksiyon Grafiği

Şekil 4.9. 'da Şeftali – Bahçe 7 için bulanık çıkarım sonucu sunulmaktadır. Renk “iyi”, yüzey kusuru “az” ve şekil “iyi” olduğu için yüksek kalite üyelik fonksiyonu baskın hale gelmiştir. Agregasyon alanı büyük ölçüde yüksek kalite bölgesinde yoğunlaşmış, durulaştırma sonucu kalite skoru 0.81 olarak elde edilmiştir. Bu bulgu, şeftali ürününde yüzey kusurları düşük ve renk ile şekil olumlu olduğunda yüksek kalite seviyelerinin elde edilebildiğini göstermektedir.



Şekil 4.9. Şeftali- Bahçe 7 için Üyelik Fonksiyon Grafiği

Kayısı – Bahçe 1 için bulanık çıkarım sonucu Şekil 4.10.’da sunulmaktadır. Renk “kötü” ve şekil “bozuk” olduğundan düşük kalite üyelik fonksiyonu baskın çıkmıştır. Agregasyon alanı düşük kalite bölgesinde yoğunlaşmış, durulaştırma sonucu kalite skoru 0.24 olarak hesaplanmıştır. Bu sonuç, kayısı ürünüde özellikle renk ve şekil faktörlerinin kalite üzerinde belirleyici olduğunu, bu parametrelerin olumsuz değerlere sahip olması halinde yüzey kusurunun orta düzeyde kalmasının kaliteyi yükseltmeye yetmediğini göstermektedir.



Şekil 4.10. Kayısı- Bahçe 1 için Üyelik Fonksiyon Grafiği

Şekil 4.11.’de Kayısı – Bahçe 2 için bulanık çıkarım sonucu gösterilmektedir. Renk “iyi”, yüzey kusuru “az” ve şekil “orta” olduğundan yüksek kalite üyelik fonksiyonu baskın çıkmıştır. Agregasyon alanı büyük ölçüde yüksek kalite bölgesinde yoğunlaşmış, durulaştırma sonucu kalite skoru 0.80 olarak hesaplanmıştır. Bu sonuç, kayısı ürünüde yüzey kusurlarının az olması ve rengin iyi olması durumunda şeklin orta seviyede kalmasına rağmen ürünün yüksek kaliteli kabul edilebileceğini göstermektedir.

alınırken, havayolu maliyeti taşınacak kg ‘ göre parçalı maliyet olarak alınmıştır. İlgili veriler materyal kısmında Çizelge 3.8 ile verilmiştir. Denklem (4.2) ile gösterilen taşıma maliyeti minimizasyonunda maliyetlerle uzaklık ($dist_{jk}$) ve taşınan ürün miktarları (x_{ijkp}, w_{rjp}) her taşıma modu için hesaplanarak toplamının minimizasyonunu ifade etmektedir. Metod bölümünde verilen ilgili kısıtlar altında çözülmüştür.

$$Min \text{ Maliyet } \sum_{i \in 8} \sum_{j \in 11} \sum_{k \in 3} \sum_{p \in 5} \frac{c_{jk} \cdot dist_{jk}}{1000} x_{ijkp} + \sum_{r \in R} c_r dist_{jk} w_{rjp} \quad (4.2)$$

Maliyet minimizasyonu amacıyla tedarik zinciri ağı denizyolu taşımacılığına güçlü biçimde yönelmiştir; toplam akışın yaklaşık %70’i denizyolu üzerinden gerçekleştirilmiştir. Bu strateji toplam taşımacılık maliyetini 1 333 991 \$ seviyesine çekmiş ve aynı zamanda karbon emisyonunu 664 bin kg CO₂’ ye kadar düşürmüştür. Ancak teslimat süresi 528 gün civarında kalmış; yani zaman odaklı bir iyileşme sağlanamamıştır. Kalite değeri, kalite maksimizasyonu senaryosuna kıyasla önemli ölçüde azalmıştır.

Amaç 3. Karbon Emisyonu Minimizasyonu: Üçüncü amaç fonksiyonu firmadan ülkelere ihracatta taşıma yapılırken meydana gelen karbon emisyonunun minimize edilmesidir. Her taşıma modu için ayrı emisyon miktarları bulunmaktadır ve Çizelge 3.9 ‘da gösterilmiştir. Bu emisyon değerlerini dikkate alarak ülkelerin mesafesine ve taşınan miktara bağlı olarak değişen karbon emisyon minimizasyonu denkler (4.3)’ de çözülmüştür. Çözüm sonucunda taşımalarla bağlı olarak oluşan minimum karbon emisyon değeri 479 573 kg-CO₂ olarak bulunmuştur.

$$Min \text{ Emisyon} = \sum_{i,j,k,p} \frac{e_k \cdot dist_{jk}}{1000} x_{ijkp} \quad (4.3)$$

Amaç 4. Taşıma Süresi Minimizasyonu: Dördüncü amaç fonksiyonu Denklem (4.4) müşteriye ürünün en kısa sürede ulaşabilmesini sağlayabilmek için taşıma süresi minimizasyonudur. Burada amaç en hızlı taşımayı yaptırarak kalite açısından da fayda sağlamaktadır. Model, süreyi minimize etmek için tüm taşımaları havayoluna yönlendirmiştir. Bu sayede toplam süre 49 gün seviyesinde bulunmuştur. Bu durum maliyetlerin ve karbon emisyonunun ciddi ölçüde artmasına sebep olmuştur.

$$Min \text{ Süre} = \sum_{i,j,k,p} \widetilde{t}_{jk} z_{jkp} \quad \widetilde{t}_{jk} = t_{jk} + b_k \quad (4.4)$$

Amaç 5 . Elde Kalan Ürün Miktarı Minimizasyonu: Beşinci amaç fonksiyonu olan elde kalan ürün miktarı minimizasyonu ile ağda gereksiz kapasite kullanımını ve satılamayan üretimi minimize

ederek kaynak verimliliğini en üst düzeye çıkarmak hedeflenmektedir. Yani birden fazla bahçe arasında seçim yapmak gerektiğinde talebe en yakın bahçe seçilerek elde kalan ürün miktarı minimize edilmektedir.

$$\text{Min Elde Kalan} = \sum_{i \in I} S_{ip} u_{ip} - \sum_{j \in J} \sum_{k \in K} x_{ijkp} \quad \forall, p \quad (4.5)$$

Fazla arzın minimize edildiği senaryoda, açılan bahçeler ve sevkiyat akışları talep miktarına uyum göstermiş ve fazla üretim 72 997 bin kg seviyesinde bulunmuştur.

4.2.2. Çok Amaçlı Matematiksel Modelleme Yaklaşımı

Çok amaçlı matematiksel modellerim çözümü için önceliklendirmesiz ve ağırlıklı hedef programlama ile çözümler elde edilmiştir. Daha sonra 2 senaryo için ağırlıklı hedef programlama ile çözüm bulunmuştur.

Önceliklendirmesiz Hedef Programlama İle Çözüm

Bu çalışmada geliştirilen çok amaçlı tedarik zinciri optimizasyon modeli ilk olarak önceliklendirilmemiş hedef programlama yaklaşımı ile çözülmüştür. Bu yaklaşımda maliyet, karbon emisyonu, kalite, tazelik ve elde kalan ürün miktarı hedefleri eşit önemde değerlendirilmiş; tüm sapmalar normalize edilerek tek bir amaç fonksiyonunda toplanmıştır. Farklı ölçeklere sahip hedefler, tek amaçlı çözümlerden elde edilen en iyi değerler üzerinden çapraz ölçeklendirme kısıtları kullanılarak karşılaştırılabilir hâle getirilmiştir. Böylece karar vericiye tüm performans ölçütleri arasında dengeli bir çözüm sunulması amaçlanmıştır. Elde edilen değerler ve denklemler Denklem (4.6)-(4.9) ile verilmiştir. Önceliklendirmesiz hedef programla ile çözümün amaç fonksiyonu $Z=8,52$ 'dir. Bu değer, tüm hedeflerden normalize sapmaların toplamını ifade eder.

$$1\,333\,991\,S_q^- = 965\,469\,S_c^+ \quad (4.6)$$

$$479\,572\,S_q^- = 965.469\,S_e^+ \quad (4.7)$$

$$49\,S_q^- = 965.469\,S_t^+ \quad (4.8)$$

$$72\,997\,S_q^- = 965.469\,S_s^+ \quad (4.9)$$

Model çözümü sonunda normalleştirilmiş amaç fonksiyonunun değeri 8,52 olarak bulunmuştur. Bu değer, tüm hedefler için sapmaların birlikte minimize edilerek farklı boyutlardaki performans göstergeleri arasında bir denge sağlandığını göstermektedir.

Önceliklendirilmemiş çözümde, tek amaçlı en iyi değerlere kıyasla tüm performans ölçütlerinde bir miktar sapma olduğu görülmektedir. Bu beklenen bir durumdur; çünkü model hiçbir hedefi önceliklendirmemekte, tüm hedefler için dengeli bir iyileştirme sağlamayı amaçlamaktadır. Özellikle maliyet ve emisyon değerleri tek amaçlı optimumlara göre yükselmiş, buna karşılık kalite hedefi optimumun altında kalsa da diğer hedefler ile birlikte dengelenmiştir.

Çizelge 4.5. Tek Amaçlı ve Önceliklendirmesiz Hedef Programlama Çözümü Karşılaştırması

Hedef	Tek Amaçlı	NGP	Sapma Oranı
Kalite (kg)	965 469	727 472	-24.65 %
Maliyet (\$)	1 333 991	3 430 482	+157.2 %
Emisyon(kg.CO2)	479 572	1 296 907	+170.4 %
Süre (gün)	49	134	+170.5 %
Elde Kalan (kg)	72 997	197 467	+170.5 %

Çizelge 4.5 ile gösterilen tabloda tek amaçlı çözümlerle karşılaştırıldığında ÖHP modeli, kaliteyi tek başına en üst düzeye çıkarmaya kıyasla yaklaşık %27 daha düşük bir toplam kalite değeri sağlamıştır. Buna karşın tazelik ve kalite kısıtlarını karşılamak için çoğu üründe havayolu taşımacılığı seçilmiş bu da maliyetin %157 , karbon emisyonlarının ise %170 oranında artmasına neden olmuştur. Benzer şekilde toplam teslim süresi de %170 artmıştır. Ayrıca, kapasite fazlası miktarı tek amaçlı çözüme göre yaklaşık üç kat artarak 197 bin kilografa çıkmıştır, bu durum bazı bahçelerin açılmasına rağmen tam kapasite kullanılmadığını göstermektedir. Bu sonuçlar, önceliklendirmesiz hedef programlamanın özellikle kısa raf ömürlü ürünlerde tazelik ve kaliteyi korumak için yüksek maliyetli ve emisyon yoğun havayolu taşımacılığına kaydığını ortaya koymaktadır.

Bu çalışmada geliştirilen çok amaçlı hedef programlama modelinin karar değişkeni (x_{ijkp}) sonuçları, Kayısı, Limon ve Nar ürünleri için ülke ve bahçe bazında hangi taşıma modlarının seçildiği Şekil 4.12. ile gösterilmektedir. Şekilde açık mavi havayolu, mavi denizyolu ve açık yeşil karayolunu göstermektedir. Sonuçlara göre kayısı, tüm pazarlara yalnızca havayolu ile gönderilmiştir ve kısa raf ömrü nedeniyle bu ürün için daha ekonomik modlar seçilememiştir. Limon ihracatında Avrupa ülkelerine (Litvanya, Almanya, Polonya, Hollanda, İtalya, İngiltere) ağırlıklı olarak karayolu tercih edilirken, daha uzak pazarlarda (Kanada, Amerika Birleşik Devletleri) maliyet avantajı nedeniyle denizyolu öne çıkmıştır. Nar için Avrupa pazarlarında genellikle havayolu kullanılmış, ancak Kanada ve Rusya Federasyonu gibi uzun mesafeli pazarlarda denizyolu tercih edilerek maliyet ve tazelik arasında denge sağlanmıştır. Bahçe bazında incelendiğinde, yüksek kalite ve kapasiteye sahip Bahçe 8'in özellikle Kanada ve Amerika'ya limon ve nar sevkiyatında yoğun şekilde kullanıldığı, Bahçe 5'in Almanya, Litvanya ve İspanya'ya limon ve kayısı tedarikinde öne çıktığı, Bahçe 2'nin Polonya ve Kanada'ya nar ve kayısı sevkiyatında rol aldığı görülmektedir. Bu sonuçlar, modelin ürünlerin raf ömrü, maliyet ve mesafe faktörlerine duyarlı şekilde taşıma modu ve kaynak seçimlerini optimize

ettiğini; özellikle kısa ömürlü kayısı için tazelik amacıyla havayolu zorunluluğunu ve limon/nar gibi daha dayanıklı ürünlerde mesafe arttıkça denizyolunun maliyet avantajını devreye aldığını ortaya koymaktadır.

Rusya Federasyonu	B8 17322	B7 12339	B3 57391
Kanada	B2 7432	B8 83119	B2 2652
İtalya	B5 1666	B8 24240	B1 9000
İngiltere	B1 1560		B1 44119
Litvanya	B5 504	B7 1298	B2 10212
Almanya	B5 5808	B5 42471	B3 8846
Polonya	B2 5000	B3 10953	B3 15622
İspanya		B5 6000	B3 12000
Hollanda	B8 2000	B5 70732	B2 17889
Amerika Birleşik Devletleri		B7 72270	
İsveç		B7 19557	B3 8000
	Kayısı	Limon	Nar

Şekil 4.12. NGP Kayısı, Limon ve Nar için Karar Değişkeni (x_{ijkp}) Sonuçları

Portakal ve şeftali ürünleri için elde edilen sonuçlar Şekil 4.13 ile gösterilmiştir. Portakal ihracatı Avrupa pazarlarında büyük ölçüde havayolu ile yapılırken, kısa mesafeli İtalya'ya karayolu ve uzun mesafeli Amerika Birleşik Devletleri'ne denizyolu tercih edilmiştir. Şeftali ihracatı ise raf ömrünün kısalığı nedeniyle çoğunlukla havayolu ile gerçekleştirilmiş ama mesafesi daha yönetilebilir olan Rusya ve Polonya'ya karayolu, Amerika'ya ise maliyet avantajı için denizyolu kullanılmıştır. Portakalda yüksek kalite ve kapasitesiyle Bahçe 8, şeftalide ise Bahçe 2 ön plana çıkmıştır. Bu sonuçlar, modelin ürün raf ömrü, mesafe ve maliyet faktörlerini dikkate alarak taşıma modlarını ve kaynak bahçeleri rasyonel biçimde seçtiğini ortaya koymaktadır.

Rusya Federasyonu	B8 42582	B2 49134
Kanada	B8 46000	B2 17000
İtalya	B8 42000	B2 10000
İngiltere	B8 18000	B2 1097
Litvanya	B8 3636	B2 17046
Almanya	B8 6600	B2 20000
Polonya	B8 14000	B2 39946
İspanya	B8 15000	B2 7000
Hollanda	B8 8500	B2 50000
Amerika Birleşik Devletleri	B8 56000	B2 40000
İsveç	B8 4503	B2 12000

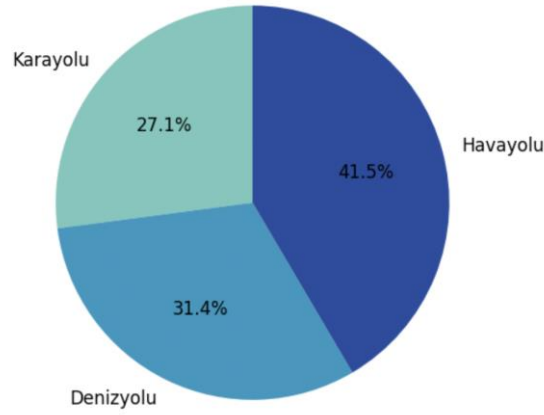
Portakal Şeftali

Şekil 4.13. NGP Portakal ve Şeftali için Karar Değişkeni (x_{ijkp}) Sonuçları

Şekil 4.12. model çözümü sonucunda her ülke–ürün kombinasyonu için seçilen taşıma modlarını göstermektedir. Sonuçlar, modelin özellikle bozulabilirlik düzeyi yüksek olan şeftali ve kayısı gibi ürünlerde havayolunu yoğun biçimde tercih ettiğini ortaya koymaktadır. Bu durum, bu ürünler için tanımlanan düşük raf ömrü ve yüksek tazelik eşiği kısıtlarının çözümü hız odaklı modlara yönlendirdiğini göstermektedir. Havayolu taşımacılığı, özellikle Avrupa ülkeleri (Litvanya, Polonya, Almanya) ve uzak pazarlar (ABD, Kanada) için baskın olarak seçilmiştir. Buna karşılık, karayolu taşımacılığı daha çok limon ve nar gibi nispeten daha dayanıklı ürünlerde ve özellikle Almanya ile Hollanda gibi kara yoluyla erişimi mümkün olan pazarlarda tercih edilmiştir. Denizyolu taşımacılığı ise maliyet avantajı sağlayan fakat zaman kısıtlarının daha esnek olduğu ürünlerde (örneğin limon, nar ve portakal) ve uzak mesafeli pazarlar (Kanada, ABD, Rusya Federasyonu) için kullanılmıştır. Bu sonuçlar, geliştirilen çok amaçlı hedef programlama modelinin ürün bozulabilirliği, taşıma süresi ve maliyet arasındaki dengeyi karar verme sürecine yansıttığını göstermekte ve özellikle raf ömrü kısa ürünler için hızlı ama maliyetli taşımaların, dayanıklı ürünlerde ise daha ekonomik taşımaların seçildiğini açıkça ortaya koymaktadır.

Şekil 4.14. 'de model çözümü sonucunda tüm ülke–ürün akışlarının hangi taşıma modlarıyla gerçekleştirildiği yüzdesel olarak sunulmaktadır. Sonuçlara göre havayolu taşımacılığı toplam taşınan miktarın %41,5 'unu oluşturarak en baskın mod olmuştur. Bu durum, özellikle raf ömrü kısa ve tazelik eşiği yüksek olan şeftali ve kayısı gibi ürünler için hızlı teslimat gereksiniminden kaynaklanmaktadır. Denizyolu taşımacılığı %31.4 oranında tercih edilmiştir ve özellikle daha

dayanıklı ürünlerde (limon, nar, portakal) ve uzak pazarlara (Kanada, ABD, Rusya Federasyonu) yapılan sevkiyatlarda maliyet avantajı sağladığı görülmektedir. Karayolu taşımacılığı ise %27,1 oranında kalmış ve çoğunlukla kara bağlantısının mümkün olduğu Avrupa pazarlarında (örneğin Almanya ve Hollanda) limon ve nar gibi dayanıklı ürünlerin taşınmasında kullanılmıştır.



Şekil 4.14. NGP İle Toplam Taşınan Miktarın Taşıma Modlarına Göre Dağılımı

Amaç fonksiyonu tüm hedefler için dengeli bir çözüm üretmiştir; hiçbir hedef tek başına minimum veya maksimum olmamakla birlikte tüm performans göstergeleri kabul edilebilir seviyelerdedir. Kısa raf ömrüne sahip ürünler (şeftali, kayısı) için havayolu zorunlu hale gelmiş, bu da maliyet ve emisyon değerlerini yükseltmiştir. Uzak pazarlar (Kanada, ABD) için limon ve portakal gibi daha dayanıklı ürünlerde denizyolu kullanımı maliyet avantajı sağlamıştır. Bahçe seçimleri, ürün bazlı kalite katsayıları ve kapasiteleriyle tutarlı, yüksek kaliteye sahip bahçeler daha çok tercih edilmiştir. Bu sonuçlar, önceliklendirilmemiş hedef programlama yaklaşımının karar vericiye tüm performans ölçütleri arasında dengeli bir çözüm sunduğunu göstermektedir. Ancak özellikle maliyet ve emisyon değerlerinin yüksek kalması, bir sonraki adımda ağırlıklı hedef programlama yaklaşımıyla belirli hedeflere öncelik verilmesinin önemini ortaya koymaktadır.

Ağırlıklı Hedef Programlama İle Çözüm

Tedarik zinciri optimizasyonu için kurulan bu modelde tek amaçlı çözümler, önceliklendirmesiz hedef programlama ile çözümden sonra ağırlıklı hedef programlama ile çözüm uygulanmıştır. 5 farklı amacın aynı anda eşitlenmeye çalışılması çözüm açısından mümkün olsa da firma beklentileri açısından yeterli bulunmamıştır. Bu nedenle amaçlara farklı ağırlıklar verilerek çözüm aranmıştır. Ağırlıklı amaç fonksiyonu Denklem (4.10) ile gösterilmiştir. Bu modelin amaç fonksiyonu değeri $Z=0.61$ dir.

$$\min Z = 0.4 s_q^- + 0.2 s_c^+ + 0.2 s_e^+ + 0.15 s_t^+ + 0.05 s_s^+ \quad (4.10)$$

Çalışmada kalite hedefine diğer hedeflere göre daha yüksek ağırlık verilmesinin temel nedeni, bozulabilir ürünlerin uluslararası pazarlarda kabul edilebilirlik ve müşteri memnuniyetinde belirleyici faktörün kalite olmasıdır. Meyveler, taşıma sürecinde sıcaklık, nem ve hasar kaynaklı hızla değer kaybedebilir. Kalite kaybı yalnızca doğrudan fire oranlarını artırmakla kalmaz, aynı zamanda ihracatçının pazar payı ve marka değerini de olumsuz etkiler. Özellikle Avrupa ve Kuzey Amerika gibi hedef pazarlarda kalite standartlarına uyumsuzluk ürün reddine, geri çağırımlara ve ek lojistik maliyetlere neden olabilmektedir. Bu nedenle karar verici için kalite, maliyet veya emisyon hedeflerinden daha kritik bir öncelik taşımaktadır; yüksek maliyetli ama kaliteli bir sevkiyat, düşük maliyetli fakat reddedilen bir sevkiyattan çok daha değerlidir. Bu yaklaşım, modelin karar vericinin stratejik önceliklerini gerçekçi şekilde yansıtmasını sağlamaktadır.

Bozulabilir nitelikteki ürünlerde pazar reddi ve marka algısı riskleri nedeniyle kalite hedefi önceliklendirilmiş ($w=0.40$); maliyet ve emisyon sürdürülebilir rekabet gücünü birlikte temsil ettiğinden eşit ağırlıklandırılmış ($w=0.20-0.20$); teslim süresi tazelik ve hizmet seviyesi açısından önemli görülmüş ($w=0.15$) ve elde kalan miktar operasyonel verimsizlikleri sınırlamak adına düşük fakat sıfır olmayan bir ağırlıkla ($w=0.05$) modele dahil edilmiştir.

Ağırlıklı hedef programlama modeli ile elde edilen sonuçlar, tek amaçlı optimizasyon çözümleri ile karşılaştırılması Çizelge 4.6. ile gösterilmiştir. Kalite odaklı tek amaçlı çözümde ulaşılan 965 469 değeri, ağırlıklı hedef programlama modelinde yalnızca %4,96 oranında azalarak 917 591 kg olarak bulunmuştur. Buna karşılık, kaliteyi yüksek tutma çabası maliyetin %21,67, karbon emisyonunun ise %31,97 artmasına yol açmıştır. Tedarik zinciri tasarımında tazelik kısıtlarını sağlamak amacıyla özellikle kısa raf ömürlü kayısı ve şeftali için havayolu taşımacılığı tercih edilmiş ve bu durum maliyet ve emisyon artışlarının temel nedeni olmuştur. Transit sürede tek amaçlı en iyiden %313,93 oranında sapma gerçekleşmiş, bu ise kalite ve maliyet dengesini sağlamak amacıyla karayolu ve denizyolu taşımacılığına yönelimin artmasından kaynaklanmıştır. Ayrıca kapasite fazlası miktarı %23,96 oranında yükselmiştir. Genel olarak ağırlıklı hedef programlama modeli, kalite hedefini büyük ölçüde koruyarak maliyet, emisyon ve süre arasında gerçekçi bir denge kurmuştur.

Çizelge 4.6. Tek Amaçlı ve Ağırlıklı Hedef Programlama Çözümü Karşılaştırması

Hedef	Tek Amaç	WGP	Sapma Oranı (%)
Kalite (kg)	965 469	917 591	-4.96 %
Maliyet (\$)	1 333 991	1 623 174	+21.67 %
Emisyon (kg CO2)	479 572	632 983	+31.97 %
Transit Süre (gün)	49	205	+313.93 %
Kapasite Fazlası (kg)	72 398	89 754	+23.96 %

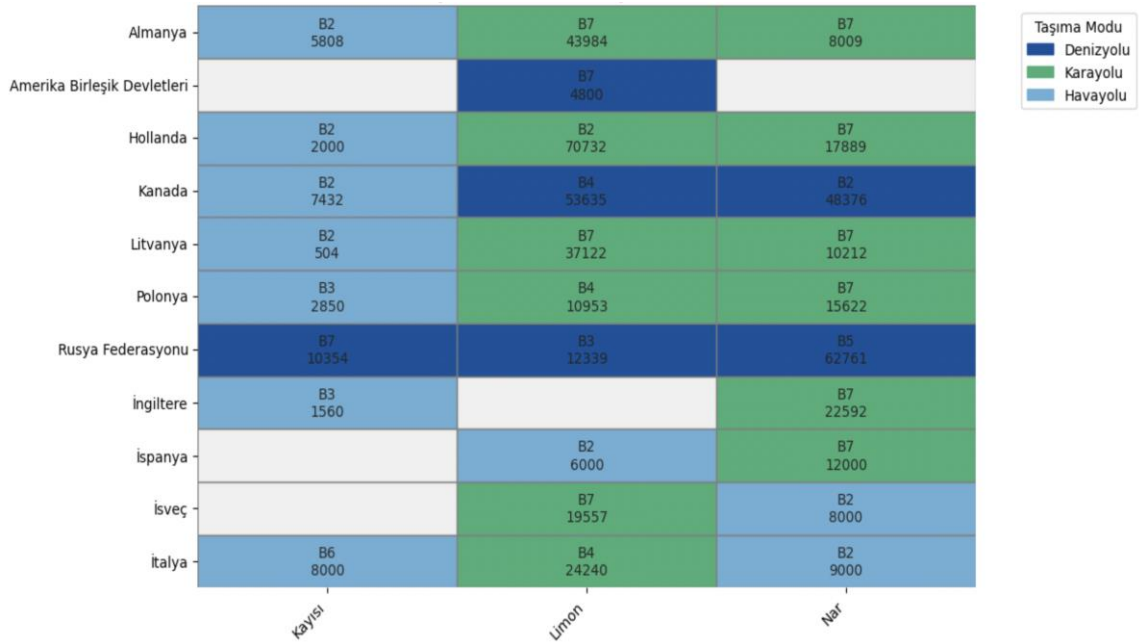
Model çıktıları Şekil 4.15 incelendiğinde, kayısı, limon ve nar ürünlerinin tedarik zinciri kararlarında hem ürünün raf ömrü hem de hedef pazarın uzaklığının belirleyici olduğu görülmektedir. Kayısı, yüksek bozulma riski nedeniyle neredeyse tüm pazarlara havayolu ile gönderilmiştir. Avrupa

pazarlarında (Almanya, Hollanda, Litvanya, Polonya, İngiltere) çoğunlukla B2 bahçesinden havayolu taşımacılığı yapılmış, uzak mesafeli Kanada ve ABD pazarlarına da B2'den hızlı gönderim sağlanmıştır. İtalya için ise nispeten yüksek kaliteli B6 bahçesinden havayolu gönderimi gerçekleştirilmiştir.

Limon sevkiyatlarında kalite ve maliyet dengesi belirgin biçimde görülmektedir. Avrupa ülkelerine (Almanya, Hollanda, Litvanya, Polonya) yüksek kaliteli ve kapasitesi güçlü B7 bahçesinden yoğun karayolu taşımacılığı yapılmıştır. Hollanda ve Kanada gibi pazarlara ise orta kaliteli ancak yüksek kapasiteli B2 ve B4 bahçelerinden denizyolu kullanılarak maliyet avantajı sağlanmıştır. Uzak pazar olan ABD'ye B7'den denizyolu ile gönderim yapılmıştır.

Nar ürününde ise kalite ve kapasiteye dayalı daha karma bir yapı oluşmuştur. Rusya Federasyonu'na büyük hacimli gönderimler yüksek kapasiteli B5 bahçesinden denizyolu ile gerçekleştirilmiş, aynı zamanda B7 bahçesi İngiltere ve Polonya gibi Avrupa pazarlarına karayolu ile nar sevk etmiştir. ABD ve Kanada'ya ise maliyet avantajı nedeniyle çoğunlukla denizyolu tercih edilmiştir.

Bu sonuçlar, modelin kısa raf ömürlü kayısı için yüksek kaliteli bahçeleri ve havayolunu zorunlu kıldığını, limonda yüksek kalite ve karayolu stratejisini ön plana çıkardığını; nar için ise yüksek kapasiteli bahçeleri ve daha ekonomik modları kullanarak maliyet-emisyon dengesine odaklandığını göstermektedir. Böylece model, ürün bazında tazelik-maliyet-mesafe faktörlerini birlikte dengeleyen esnek bir dağıtım ağı tasarımı sağlamıştır.



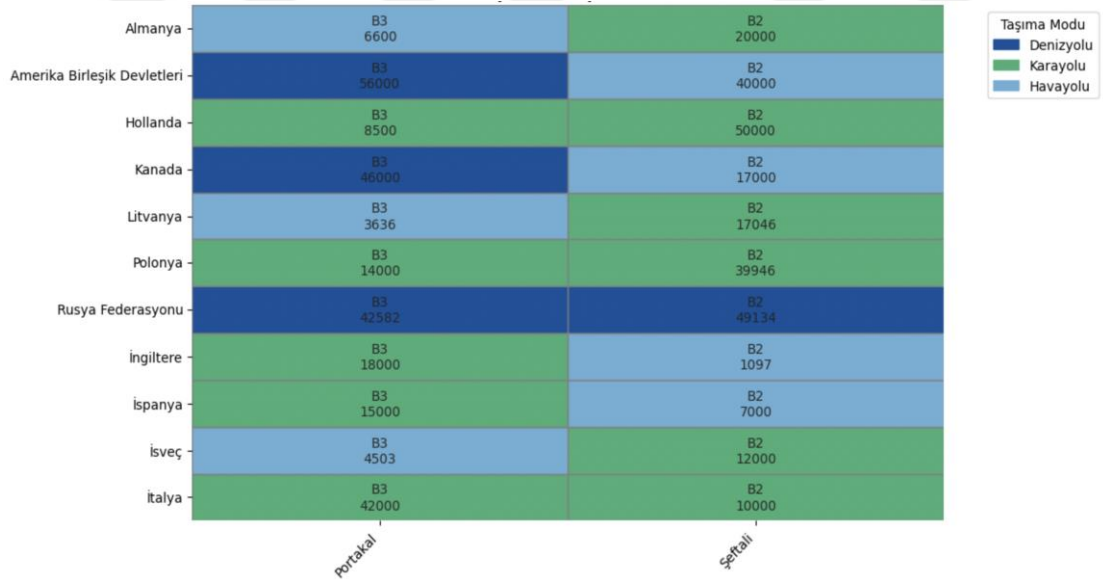
Şekil 4.15. WGP Kayısı, Limon ve Nar için Karar Değişkeni (x_{ijkp}) Sonuçları

Modelin portakal ve şeftali dağıtım kararları incelendiğinde (Şekil 4.16.), ürünlerin raf ömrü ve pazar uzaklığının taşıma modu seçiminde belirleyici olduğu görülmektedir. Portakal, daha uzun

raf ömrüne sahip olduğundan büyük oranda denizyolu ve karayolu ile taşınmıştır. Özellikle yüksek kalite skoruna sahip B3 bahçesi portakal için ana tedarik noktası olarak öne çıkmış; Almanya, Hollanda, Polonya, Rusya Federasyonu, ABD ve Kanada gibi pek çok pazara bu bahçeden gönderim yapılmıştır. ABD ve Kanada gibi uzak pazarlara çoğunlukla denizyolu ile büyük hacimli gönderimler gerçekleştirilmiş (örneğin ABD'ye 56.000 kg, Kanada'ya 46.000 kg), Avrupa pazarlarında ise maliyet–zaman dengesi için hem karayolu hem havayolu tercih edilmiştir. Litvanya, İtalya ve İspanya gibi pazarlara B3'ten karayolu sevkiyatı yapılırken, raf ömrü ve kalite gereksinimleri doğrultusunda bazı Avrupa ülkelerine sınırlı havayolu desteği sağlanmıştır.

Şeftali ise kısa raf ömrü nedeniyle büyük ölçüde havayolu taşımacılığı ile gönderilmiştir. Avrupa pazarlarına (Almanya, Polonya, Litvanya, İtalya) çoğunlukla yüksek kaliteli ve kapasitesi yeterli B2 bahçesinden hızlı sevkiyatlar gerçekleştirilmiştir. ABD ve Kanada gibi uzak pazarlara da B2'den havayolu ile gönderim yapılmış; bu sayede ürünün tazeliği korunurken maliyet artışı göze alınmıştır. Buna karşın yakın pazarlarda bazı gönderimler karayolu ile yapılmış, böylece maliyet azaltılmıştır.

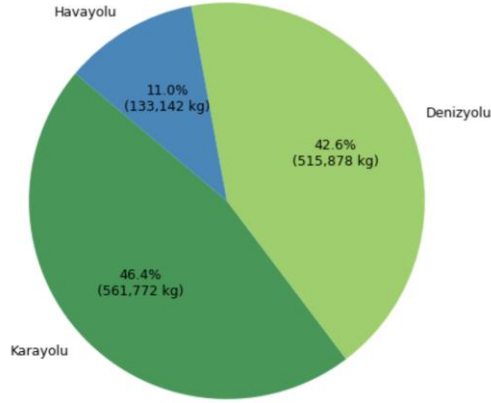
Bu sonuçlar, modelin portakal gibi dayanıklı ürünlerde maliyet ve emisyon avantajı için deniz ve karayolu kombinasyonlarını öne çıkardığını, şeftali gibi çok hassas ürünlerde ise tazelik hedefini korumak için havayolunu zorunlu kullandığını göstermektedir. Böylece ürün özelliklerine göre farklı mod kombinasyonlarıyla maliyet ve tazelik dengesini optimize eden bir dağıtım ağı elde edilmiştir.



Şekil 4.16. WGP Portakal ve Şeftali için Karar Değişkeni (x_{ijkp}) Sonuçları

Model sonuçlarına göre Şekil 4.17.'de gösterildiği gibi toplam sevkiyat miktarı yaklaşık %46,4 karayolu (561.772 kg), %42,6 denizyolu (515.878 kg) ve %11,0 havayolu (133.142 kg) ile gerçekleştirilmiştir. Sonuçlar, modelin maliyet ve emisyonu düşürmek için karayolu ve denizyolu taşımacılığını mümkün olan en geniş ölçüde kullandığını, ancak tazelik gerektiren kısa raf ömürlü

ürünlerde havayolu kullanımını zorunlu kıldığını göstermektedir. Bu yaklaşım, çok amaçlı optimizasyonun maliyet-emisyon hedefleri ile kalite-tazelik gereksinimlerini dengeli bir şekilde olduğunu doğrulamaktadır.



Şekil 4.17. WGP İle Toplam Taşınan Miktarın Taşıma Modlarına Göre Dağılımı

Senaryo Analizi

Kurulacak olan senaryolarla taşıma modlarının ürünlerin bozulmaları üzerindeki etkisinin modele nasıl yansıdığı gösterilmek istenmiştir. Bu nedenle senaryolarda ürünlerin bozulma oranları sadece ürüne göre değil taşıma modu k' ya göre de dikkate alınarak revize edilmiştir. Bu değişiklikler sonucu elde edilen sonuçlar Senaryo 1. ve Senaryo 2.' De gösterilmiştir.

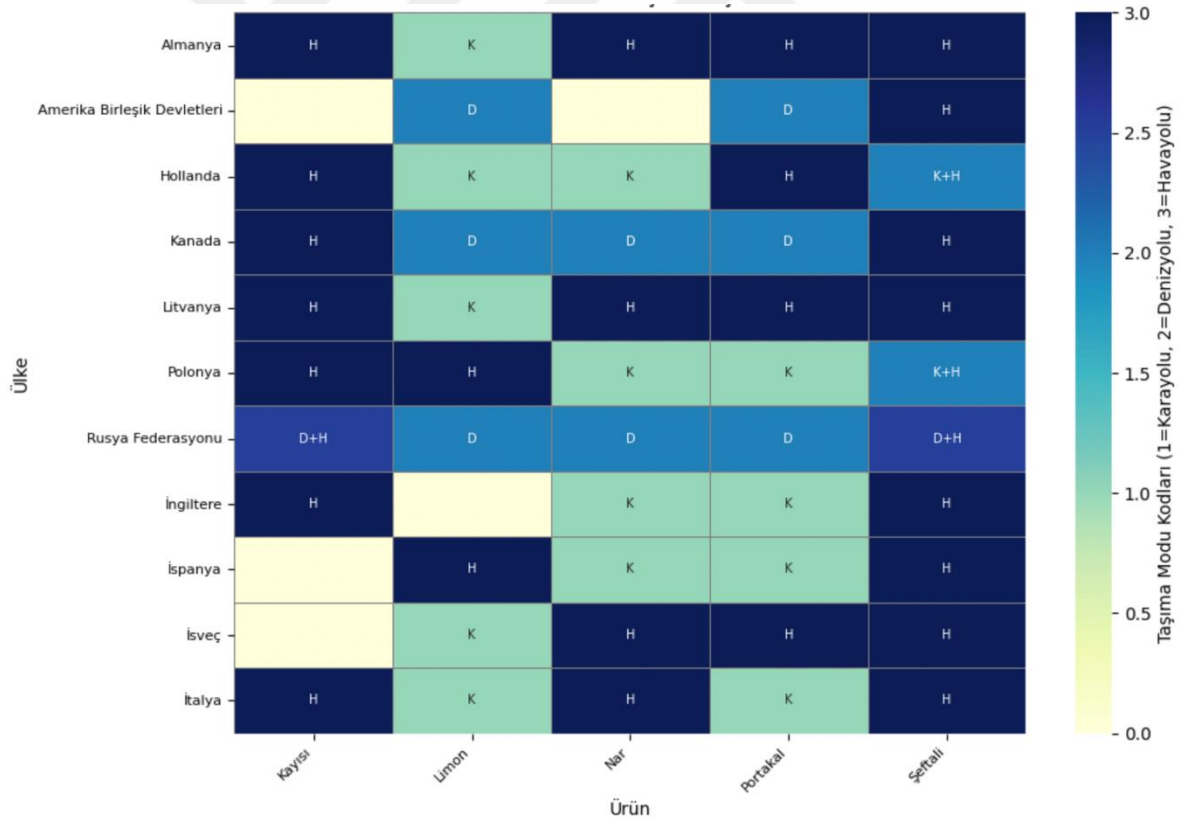
Senaryo 1: Karayolu taşıma modunun bozulmaya olan etkisi daha yüksek varsayılarak oluşturulmuştur. Burada Çizelge 3.10' da verilen ürün bazında bozulma katsayıları (δ_p) her taşıma modu için farklı ağırlıklarla çarpılarak taşıma moduna göre belirlenmiştir. En yüksek ağırlık 0.45 ile karayolu taşımacılığına verilmiştir. Havanın etkisi en az olduğu için iki senaryoda da ağırlığı sabit alınmıştır. Ağırlıklar; $\delta_{p1} = 0.45 * \delta_p$, $\delta_{p2} = 0.35 * \delta_p$, $\delta_{p3} = 0.20 * \delta_p$ şeklinde belirlenmiştir. Elde edilen yeni bozulma katsayıları ile model tekrar çözülmüştür.

Senaryo 1. İle elde edilen çözümde, kaliteyi tek-amaç optimumuna çok yakın tutarken (-%4,95), maliyet ve emisyonu sırasıyla yalnızca %27 ve %34 oranında artırarak kabul edilebilir seviyelerde tutmuştur. Bu strateji, maliyet-emisyon ile kalite arasında dengeli bir çözüm sağlamış; ancak zaman hedefi düşük ağırlıklandırıldığı için ortalama teslim süresi yaklaşık 4 katına çıkmıştır. Böylece, kaliteyi önceliklendiren ancak ekonomik ve çevresel maliyetleri de sağlayan bir çözüm elde edilirken, teslim süreleri uzamıştır.

Çizelge 4.7. Tek Amaçlı Çözümler ve Senaryo 1 Karşılaştırması

Amaçlar	Tek-amaç	Senaryo 1	Sapma
Kalite (kg)	965 470	917 591	-%4,95
Maliyet (\$)	1 760 140	2 238 131	+%27,1
Emisyon (kg CO ₂)	636 205	853 770	+%34,2
Transit Süre (gün)	50,4	186,8	+%270
Elde Kalan (kg)	70 671	89 755	+%27,0

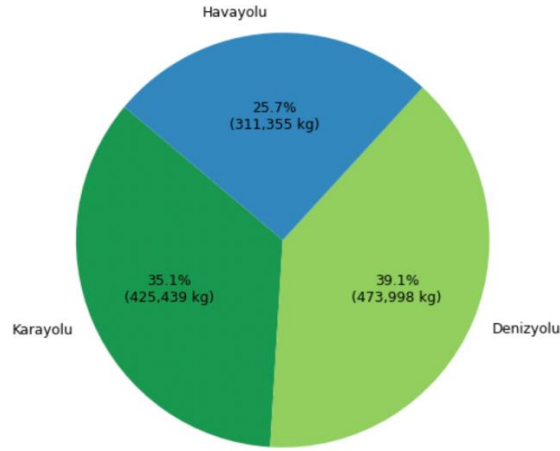
Karayolu taşımacılığının bozulmaya olan etkisinin daha yüksek kabul edildiği senaryo 1'in çözümünde ülke ürün bazlı seçilen taşıma modları Şekil 4.14 ile gösterilmiştir. Kodlamada 1 = Karayolu (K), 2 = Denizyolu (D) ve 3 = Havayolu (H) olarak tanımlanmıştır. Kısa raf ömrüne sahip kayısı ve şeftalinin çoğunlukla havayoluyla taşındığını göstermektedir. Limon ve nar gibi daha dayanıklı ürünler ise Avrupa pazarlarına karayoluyla, uzak pazarlara ise çoğunlukla denizyoluyla gönderilmiştir. Bazı ülke-ürün kombinasyonlarında (ör. Rusya Federasyonu, Hollanda) birden fazla modun aynı anda seçilmesi, modelin maliyet ve tazelik dengesini kurmak için talebi modlara bölüştürdüğünü göstermektedir.



Şekil 4.18. Senaryo 1 ile Ülke- Ürün Bazında Seçilen Taşıma Modları

Toplam taşınan miktarın %39'u denizyolu, %35'i karayolu ve %26'sı havayolu ile gerçekleştirilmiştir. Böylece model, uzak ülkelere düşük maliyetli denizyolu taşımacılığını öncelikli

seçerken, kısa raf ömrüne sahip ürünlerin tazeliklerini koruyabilmek için havayolunu önemli bir mod olarak kullanmıştır.



Şekil 4.19. Senaryo 1 ile Toplam Taşınan Miktarın Taşıma Modlarına Göre Dağılımı

Senaryo 2: Denizyolu taşıma modunun bozulmaya olan etkisi daha yüksek varsayılarak oluşturulmuştur. En yüksek ağırlık 0.45 ile denizyolu taşımacılığına verilmiştir. Ağırlıklar; $\delta_{p1}=0.35* \delta_p$, $\delta_{p2}=0.45* \delta_p$, $\delta_{p3}=0.20* \delta_p$ şeklinde belirlenmiştir. Elde edilen yeni bozulma katsayıları ile model tekrar çözülmüştür.

Tek amaçlı kalite maksimizasyonu ile kıyaslandığında Senaryo 2’de kalite miktarı yalnızca %1,76 azalmış, ancak bu kaliteyi koruma çabası maliyetleri %24,8, karbon emisyonlarını %35 ve toplam transit süresini %303 artırmıştır. Ayrıca talep karşılanamayan veya elde kalan ürün miktarında %29,9’luk bir artış görülmüştür. Bu durum, kaliteyi önceliklendiren çok amaçlı planlamanın tazelik ve ürün değeri açısından avantaj sağlasa da ekonomik ve çevresel maliyetleri yükselttiğini göstermektedir.

Çizelge 4.8. Tek Amaçlı Çözümler ve Senaryo 2 Karşılaştırması

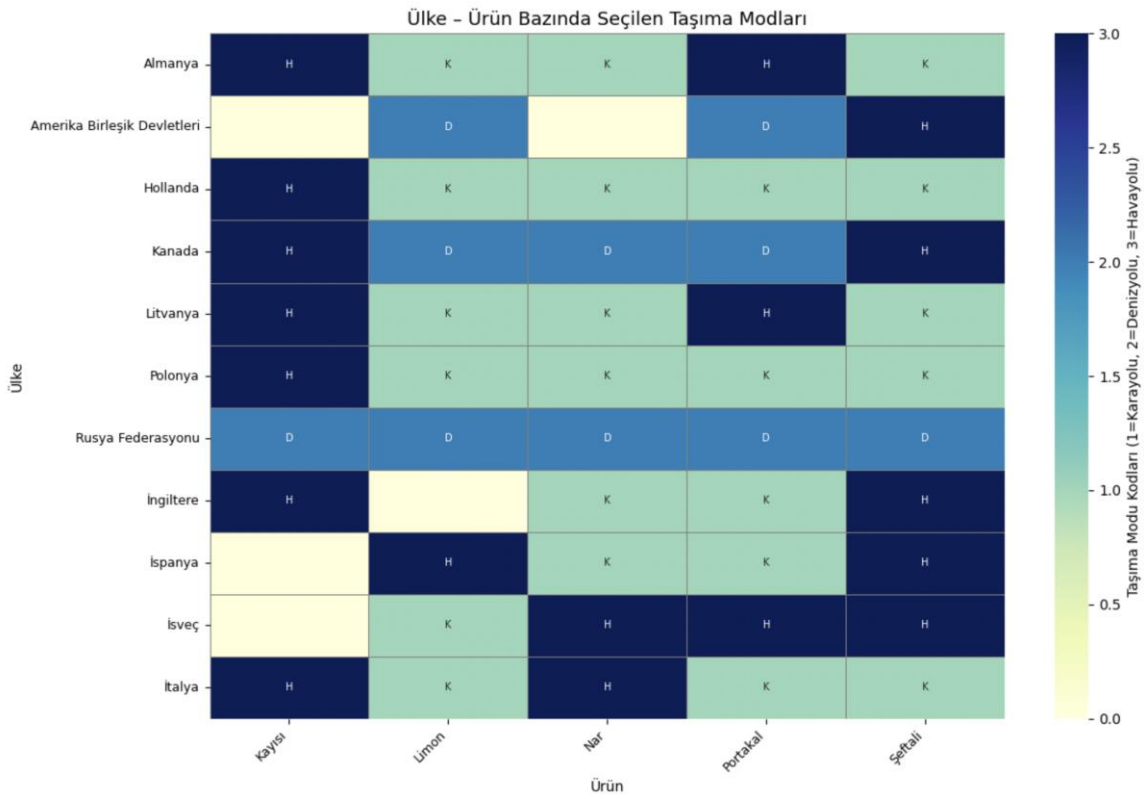
Kriter	Tek Amaçlı	Senaryo 2	Sapma (%)
Kalite (kg)	965 469	948 443	-1,76 %
Maliyet (\$)	1 340 269	1 672 494	+24,79 %
Karbon Emisyonu (kg CO ₂)	481 477	650 224	+35,00 %
Süre (gün)	50,04	201	+303,0 %
Elde Kalan(kg)	85 664,70	111 247	+29,89 %

Şekil 4.16 incelendiğinde, havayolunun özellikle kayısı ve portakal gibi daha hızlı bozulabilen ürünlerde baskın olarak tercih edildiği görülmektedir. Buna karşılık, denizyolu

taşımacılığı uzun raf ömrüne sahip ürünlerde (örneğin nar ve limon) ve Kuzey Amerika pazarlarına (ABD, Kanada) yönelik gönderimlerde öne çıkmıştır.

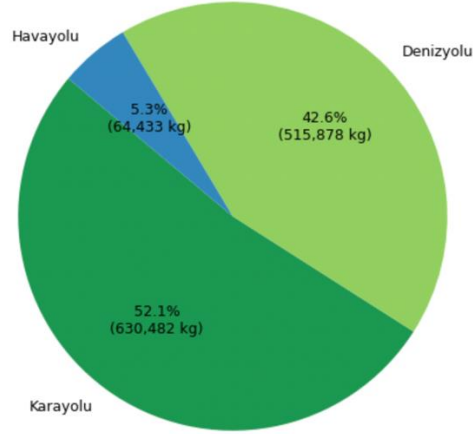
Karayolu ise ağırlıklı olarak Avrupa ülkelerine (Almanya, Polonya, Litvanya, İspanya, İtalya) yapılan sevkiyatlarda kullanılmıştır. Bu dağılım, lojistik kararlarının ürün tazeliği, mesafe, taşıma süresi ve maliyet arasındaki dengeler doğrultusunda şekillendiğini göstermektedir.

Genel olarak, Avrupa pazarlarında karayolu–havayolu kombinasyonu, denizaşırı pazarlarda denizyolu ağırlığı, raf ömrü kısa ürünlerde havayolu tercihi belirgin bir strateji olarak ortaya çıkmıştır.



Şekil 4.20. Senaryo 2 ile Ülke- Ürün Bazında Seçilen Taşıma Modları

Senaryo 2.'de denizyolunun bozulmaya etkisinin daha yüksek varsayıldığı durumda taşımaların yarıdan fazlası karayolu ile yapılırken (%52,1), uzun mesafeli yüksek hacimli sevkiyatlarda denizyolu önemli bir paya (%42,6) sahip olmuştur. Havayolu ise yalnızca tazelik kritik olan ürünlerde tercih edilmiş ve toplam taşımada %5,3 payla sınırlı kalmıştır.



Şekil 4.21. Senaryo 2 ile Toplam Taşınan Miktarın Taşıma Modlarına Göre Dağılımı

4.3. Duyarlılık Analizi

Duyarlılık analizi, önerilen ağırlıklı hedef programlama modelinin karar verici tarafından belirlenen ağırlık katsayılarındaki değişimlere karşı ne derece duyarlı olduğunu incelemek amacıyla gerçekleştirilmiştir. Farklı ağırlık kombinasyonları denenerek modelin; seçilen bahçeler, taşıma modları ve toplam maliyet, emisyon, kalite, teslim süresi ve fazla arz gibi çıktılar üzerindeki etkileri gözlenmiştir. Böylece modelin doğruluğu değerlendirilmiş ve karar vericilerin farklı öncelik senaryoları altında hangi sonuçlarla karşılaşabileceği ortaya konmuştur.

Literatürde önerildiği gibi (Romero, 2004; Tamiz ve ark., 1998) ağırlık katsayıları $\pm\%20$ oranında değiştirilerek ve her hedefin baskın olduğu senaryolar oluşturularak modelin duyarlılığı analiz edilmiştir. Seçilen hedefin ağırlığı $\pm\%20$ değiştirildiğinde, diğer amaçların ağırlıkları toplamın 1,0 olarak korunması için orantılı şekilde yeniden ölçeklendirilmiştir. Kalan ağırlıklar aynı katsayıyla çarpılarak normalize edilmiştir (Triantaphyllou, 2000).

Bu çalışma kapsamında ağırlıklı hedef programlama modelinde kullanılan amaç ağırlıkları (maliyet, emisyon, kalite, zaman) $\pm\%20$ oranında değiştirilerek modelin çıktıları üzerinde nasıl bir etki yarattığı analiz edilmiştir. Elde kalan ürün miktarı minimizasyonu ağırlığı çok düşük olduğundan sabit tutulmuştur. Elde edilen sonuçlar Çizelge 4.9 ile gösterilmiştir.

Kalite ağırlığının $\%20$ artırılması durumunda toplam kalite miktarı yaklaşık $\%3,4$ oranında artarken, maliyet, emisyon ve süre değerleri sabit kalmıştır. Bu durum, modelin kalite açısından zaten optimum bölgede çalıştığını ve kaliteyi artırmanın yalnızca daha seçici bir bahçeye yöneldiğini, dolayısıyla elde kalan miktarın arttığını göstermektedir.

Maliyet ve emisyon ağırlıklarındaki değişimler benzer yönde etkiler yaratmıştır. Her iki hedefin ağırlığının $\%20$ artırılması, daha düşük maliyetli ve düşük emisyonlu taşıma modlarının (özellikle denizyolu) tercih edilmesine neden olmuş, böylece maliyet ve emisyon sırasıyla yaklaşık $\%4-5$ oranında azalmış; ancak teslimat süresi artmıştır. Bu ağırlıkların azaltılması durumunda

karayolu ve havayolu taşımacılığı daha fazla kullanılarak süre kısalmış, fakat maliyet ve emisyon değerleri yükselmiştir.

Süre ağırlığı ise sistemdeki en güçlü değişkenidir. Süreye verilen önemin %20 artırılması, ortalama taşıma süresini yaklaşık %5 oranında azaltmış; buna karşılık maliyet %8, emisyon %7 oranında yükselmiştir. Süre ağırlığının azaltılması ise tam tersi yönde etkiler göstermiştir. Daha uzun teslimat süreleri karşılığında maliyet ve emisyonlarda %9 civarında bir azalma sağlanmıştır.

Genel olarak, analiz sonuçları modelin en duyarlı olduğu değişkenin süre, en az duyarlı olduğu değişkenin ise kalite olduğunu göstermektedir. Zaman hedefi gevşetildiğinde sistem denizyolu taşımacılığına kayarak ekonomik ve çevresel kazanımlar sağlamaktadır. Buna karşın kalite önceliği arttığında maliyet ve emisyon üzerinde belirgin bir değişim yaşanmamaktadır. Bu nedenle, karar vericiler için en kritik nokta, teslimat süresi kısıtlarının ne kadar esnetilebileceğidir. Zamanın esnetilmesi, sürdürülebilirlik hedefleri açısından hem maliyet hem emisyon optimizasyonuna önemli katkı sunmaktadır.

Çizelge 4.9. Duyarlılık Analizi Sonuçları

Senaryo	Kalite(kg)	Maliyet(\$)	Emisyon(kgCO ₂)	Süre(gün)	Elde Kalan(kg)
Kalite (-20%)	917 591	1 623 175	632 984	205	89 755
Ağırlıklı HP	917 591	1 623 175	632 984	205	89 755
Kalite (+20%)	948 444	1 623 175	632 984	205	111 248
Maliyet (-20%)	917 591	1 652 075	643 102	202	89 755
Ağırlıklı HP	917 591	1 623 175	632 984	205	89 755
Maliyet (+20%)	917 591	1 554 759	604 909	213	89 755
Emisyon (-20%)	917 591	1 652 075	643 102	202	89 755
Ağırlıklı HP	917 591	1 623 175	632 984	205	89 755
Emisyon (+20%)	918 316	1 554 759	604 909	213	91 483
Süre (-20%)	917 591	1 475 428	577 033	222	89 755
Ağırlıklı HP	917 591	1 623 175	632 984	205	89 755
Süre (+20%)	917 591	1 750 876	678 101	194	89 755



5. SONUÇLAR ve ÖNERİLER

Bu çalışmada, Türkiye’den Avrupa ve Kuzey Amerika pazarlarına yönelik narenciye ve diğer taze meyvelerin sürdürülebilir tedarik zinciri yönetimi için çok amaçlı bir karar destek modeli geliştirilmiştir. Model, bahçe seçiminden ürün kalitesinin değerlendirilmesine, taşıma modu ve güzergâh planlamasından maliyet–emisyon–tazelik dengesine kadar bütünsel bir yaklaşım sunmaktadır. Çalışmanın çıktıları, hem akademik olarak çok amaçlı optimizasyon literatürüne katkı sağlamış hem de ihracatçı işletmeler için uygulanabilir bir karar destek aracı geliştirmiştir.

Görsel veri seti üzerinde eğitilen derin öğrenme tabanlı modeller (MobileNetV2, ResNet50, DenseNet121) ile bahçe bazlı meyve kalitesi tahmin edilmiştir. En yüksek doğruluk oranı ResNet50 mimarisi ile elde edilmiştir. Model çıktılarından elde edilen hastalık oranları ve sağlıklı meyve yüzdesi kullanılarak bahçe kalite skorları hesaplanmıştır. Veri yetersizliği olan ürünler için Mamdani tipi bulanık mantık sistem uygulanarak ; renk, yüzey durumu ve şekil gibi girdi değişkenlerine dayalı olarak 0–1 aralığında kalite skorları oluşturulmuştur. Böylece bahçe bazlı kalite skorları elde edilmiştir.

Geliştirilen matematiksel model, hedef programlama çerçevesinde hem önceliklendirmesiz hem de ağırlıklı senaryolar altında çözülmüştür. Tek amaçlı çözümler, her bir hedefi bağımsız olarak optimize etmiş ve maliyet, emisyon, kalite ve teslimat süresi arasındaki çatışmaları açıkça göstermiştir. Örneğin maliyet minimizasyonu senaryosunda ürünlerin yarısından fazlası denizyolu kullanımı çıkmış, toplam emisyonlar azalmış ancak teslimat süresi çok artmıştır. Önceliklendirilmemiş hedef programlama modeli, maliyet, emisyon, kalite, tazelik ve fazla arz hedeflerini eşit önemde ele almış ve sapmaları normalize eden amaç fonksiyonu genel olarak dengeli bir çözüm sunmuştur ama maliyet ve emisyon değerleri yüksek bulunmuştur. Ağırlıklı hedef programlama modeli, kalite ve tazelik gibi ihracat başarısını doğrudan etkileyen hedeflere daha fazla ağırlık verdiğinde maliyet ve emisyon değerlerinde artış gözlenmiş, ancak ürünlerin pazara daha taze ve yüksek kaliteli ulaşması sağlanmıştır.

Karşılaştırmalı analizler, kalite odaklı ağırlıklandırmanın maliyet ve emisyonu belirgin şekilde artırdığını, marka sürdürülebilirliği ve müşteri memnuniyeti açısından kritik bir avantaj sunduğunu ortaya koymuştur. Tek amaçlı ve çok amaçlı çözümlerden elde edilen toplam kalite skoru, maliyet (\$), emisyon (kg CO₂), transit süre (gün) ve elde kalan ürün miktarı (kg) tablolar halinde sunulmuş ve senaryolar arası farklar görselleştirilmiştir.

Model, taşıma modlarının ülke ve ürün bazında değişimini detaylı biçimde ortaya koymuştur. Avrupa pazarlarına (ör. Almanya, Hollanda) ağırlıklı olarak denizyolu, kısa sürede teslimat gereken ürünler için ise havayolu tercih edilmiştir. Kuzey Amerika pazarı için çoğunlukla deniz hava kombine çözümler ortaya çıkmıştır. Şeftali ve kayısı gibi raf ömrü kısa ürünlerde havayolu taşımacılığı kaçınılmaz hale gelmiştir.

Ağırlıkların $\pm\%20$ oranında değiştirilmesiyle yapılan duyarlılık analizi, önerilen modelin genel yapısının kararlı olduğunu göstermiştir. Temel çözümde taşıma modlarının büyük ölçüde korunduğu, yalnızca önceliği artırılan hedefe bağlı olarak sınırlı yapısal değişiklikler yaşandığı gözlenmiştir. Bu durum, modelin farklı karar verici tercihlerini destekleyecek esnekliğe sahip olduğunu kanıtlamaktadır.

Geliştirilen model ve Python tabanlı karar destek aracı, ihracatçıların farklı pazar ve ürün kombinasyonları için senaryo tabanlı analizler yapabilmesine olanak sağlamaktadır.

- Hangi bahçelerin açılacağı,
- Hangi ürünlerin hangi modla hangi ülkeye taşınacağı,
- Maliyet, emisyon ve kalite arasındaki değişimlerin etkisi

gibi kritik kararları hızlı bir şekilde değerlendirebilmektedir. Bu yönüyle çalışma sektörel bazda uygulanabilir bir sürdürülebilir tedarik zinciri planlama aracı sunmuştur.

Çalışmanın bilimsel katkıları arasında, görüntü işleme ve bulanık mantığı kullanılarak bahçe kalite değerlendirme yaklaşımının geliştirilmesi, kalite–maliyet–emisyon–süre–kapasite fazlası hedeflerini eşzamanlı optimize eden çok amaçlı bir hedef programlama modelinin oluşturulması ve taşıma modlarına özgü parçalı doğrusal maliyet yapısının gerçekçi biçimde modele entegre edilmesi yer almaktadır.

Gelecekteki çalışmalarda yapılabilecek öneriler aşağıdaki gibidir:

- Emisyon hedefleri daha detaylı karbon ayak izi verileriyle (ör. enerji tüketimi, konteyner tipi) geliştirilebilir.
- Raf ömrü kısa ürünlerde (ör. şeftali, kayısı) yüksek taşıma maliyetlerine neden olan havayolu ihtiyacını azaltmak için soğuk zincir kapasitesine yatırım yapılmalıdır.
- Gelecekteki çalışmalarda talep ve fiyat değişkenliği stokastik veya bulanık yaklaşımlarla modele entegre edilebilir.
- Model yalnızca taşıma aşamasını değil; depolama, paketleme ve dağıtım süreçlerini de kapsayacak biçimde genişletilebilir.
- Farklı ülkelerin karbon düzenlemeleri ve gıda güvenliği standartları politika kısıtları olarak eklenebilir.

KAYNAKLAR

- Ahumada, O., & Villalobos, J. R. (2009). Application of planning models in the agri-food supply chain: A review. *European journal of Operational research*, 196(1), 1-20.
- Akyol, M., & Uçar, E. (2021). Carbon footprint forecasting using time series data mining methods: the case of Turkey. *Environmental Science and Pollution Research*, 28, 38552-38562.
- Allaoui, H., Guo, Y., Choudhary, A., & Bloemhof, J. (2018). Sustainable agro-food supply chain design using two-stage hybrid multi-objective decision-making approach. *Computers & Operations Research*, 89, 369–384.
- Amorim, P., & Almada-Lobo, B. (2014). The impact of food perishability issues in the vehicle routing problem. *Computers & Industrial Engineering*, 67, 223-233.
- Assari, A., Mahesh, T., & Assari, E. (2012). Role of public participation in sustainability of historical city: usage of TOPSIS method. *Indian Journal of Science and Technology*, 5(3), 2289-2294.
- Bailón-Moreno, R., Olivares-Arias, V., Vicaria, J. M., & Chiadmi-García, L. (2018). Shelf-life kinetic model for freeze-dried oranges using sensory analysis and luminance determination. *Journal of food science and technology*, 55(10), 4013-4019.
- Balaji, M., & Arshinder, K. (2016). Modeling the causes of food wastage in Indian perishable food supply chain. *Resources, Conservation and Recycling*, 114, 153-167.
- Baloch, A. K., Okatan, A., Kanasro, N. A., Baloch, M. A., & Jamali, A. A. (2023). The quality analysis of food and vegetable from image processing. *VAWKUM Transactions on Computer Sciences*, 11(2), 01-17.
- Bank, M., Mazdeh, M., & Heydari, M. (2020). Applying meta-heuristic algorithms for an integrated production-distribution problem in a two level supply chain. *Uncertain Supply Chain Management*, 8(1), 77-92.
- Ben-Tal, A., & Nemirovski, A. (1999). Robust solutions of uncertain linear programs. *Operations research letters*, 25(1), 1-13.
- Blasco, J., Munera, S., Aleixos, N., Cubero, S., & Molto, E. (2017). Machine vision-based measurement systems for fruit and vegetable quality control in postharvest. *Measurement, modeling and automation in advanced food processing*, 71-91.
- Bortolini, M., Faccio, M., Ferrari, E., Gamberi, M., & Pilati, F. (2016). Fresh food sustainable distribution: Cost, delivery time and carbon footprint three-objective optimization. *Journal of Food Engineering*, 174, 56–67.
- Bortolini, M., Galizia, F. G., Mora, C., Botti, L., & Rosano, M. (2018). Bi-objective design of fresh food supply chain networks with reusable and disposable packaging containers. *Journal of Cleaner Production*, 184, 375–388.
- Böhringer, C. (2003). The Kyoto protocol: a review and perspectives. *Oxford Review of Economic Policy*, 19(3), 451-466.

- Chan, F. T., Wang, Z. X., Goswami, A., Singhanian, A., & Tiwari, M. K. (2020). Multi-objective particle swarm optimisation based integrated production inventory routing planning for efficient perishable food logistics operations. *International Journal of Production Research*, 58(17), 5155-5174.
- Chen, H. K., Hsueh, C. F., & Chang, M. S. (2009). Production scheduling and vehicle routing with time windows for perishable food products. *Computers & operations research*, 36(7), 2311-2319.
- Cochran, W. G. (1977). *Sampling techniques*. John Wiley & Sons.
- Costa, A. M., dos Santos, L. M. R., Alem, D. J., & Santos, R. H. (2014). Sustainable vegetable crop supply problem with perishable stocks. *Annals of Operations Research*, 219, 265-283.
- Cubero, S., Lee, W. S., Aleixos, N., Albert, F., & Blasco, J. (2016). Automated systems based on machine vision for inspecting citrus fruits from the field to postharvest—a review. *Food and Bioprocess Technology*, 9(10), 1623-1639.
- Da Silva, J. C., Silva, M. C., Luz, E. J., Delabrida, S., & Oliveira, R. A. (2023). Using mobile edge AI to detect and map diseases in citrus orchards. *Sensors*, 23(4), 2165.
- De Keizer, M., Haijema, R., Bloemhof, J. M., & Van Der Vorst, J. G. (2015). Hybrid optimization and simulation to design a logistics network for distributing perishable products. *Computers & Industrial Engineering*, 88, 26-38.
- Department for Environment, Food & Rural Affairs. (2023). *Greenhouse gas reporting: Conversion factors 2023*. UK Government. <https://www.gov.uk/government/publications/greenhouse-gas-reporting-conversion-factors-2023>
- Dulebenets, M. A., Ozguven, E. E., Moses, R., & Ulak, M. B. (2016). Intermodal freight network design for transport of perishable products. *Open Journal of Optimization*, 5(4), 120-139.
- El Ghaoui, L. (1997). Decision Problems with Uncertainty: A Convex Optimization Approach. *IFAC Proceedings Volumes*, 30(27), 55-61.
- Emon, S. H., Islam, I. K., Nahin, T. J., Ahmed, A. M., Orchi, N. T., Alam, M. A., & Dipto, S. M. (2024, March). SmartCitrus: An efficient deep learning approach for real-time detection and classification of citrus leaf diseases. In *2024 International Conference on Advances in Computing, Communication, Electrical, and Smart Systems (iCACCESS)* (pp. 1-6). IEEE.
- Enzmann, J., & Ringel, M. (2020). Reducing road transport emissions in Europe: Investigating a demand side driven approach. *Sustainability*, 12(18), 7594.
- FAO. World Food and Agriculture—Statistical Yearbook; FAO: Rome, Italy, 2020.
- Foroughi, A., Jimenez, J. M., & Lloret, J. (2023, October). A New Image Processing System to Diagnose the Orange Fruit Disease. In *2023 10th International Conference on Internet of Things: Systems, Management and Security (IOTSMS)* (pp. 39-46). IEEE.

- Görgün, H., Sevil, M., & Ercan, M. Baz istasyonlarının matematiksel olarak güç tüketim fonksiyonunun belirlenmesi ve enerji tüketiminin kestirilmesi. *Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Fen Bilimleri Dergisi*, 31(1), 73-81.
- Hillier, F. S., & Lieberman, G. J. (2015). *Introduction to operations research*. McGraw-Hill,.
- Hou, D., Wang, C., Yang, Y., Jing, S., Zhu, B., Xu, H., & Kou, L. (2024). Effects of transport vibration on storage quality and expression of genes related to cell wall metabolism of winter jujube (*Zizyphus jujuba* Mill. cv. Dalidongzao). *Postharvest Biology and Technology*, 209, 112729.
- Hsiao, Y. H., Chen, M. C., & Chin, C. L. (2017). Distribution planning for perishable foods in cold chains with quality concerns: Formulation and solution procedure. *Trends in food science & technology*, 61, 80-93.
- Hwang, C.L.; Yoon, K. (1981). Multiple Attribute Decision Making: Methods and Applications. New York: Springer-Verlag.
- Ignizio, J. P. (1985). *Introduction to linear goal programming*. Beverly Hills, CA: Sage.
- Jedermann, R., Nicometo, M., Uysal, I., & Lang, W. (2014). Reducing food losses by intelligent food logistics. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 372(2017), 20130302.
- Jouzani, J., & Govindan, K. (2021). On the sustainable perishable food supply chain network design: A dairy products case to achieve sustainable development goals. *Journal of Cleaner Production*, 278, 123060.
- Kallrath, J. (Ed.). (2004). Modeling languages in mathematical optimization (Vol. 88). Springer Science & Business Media.
- Kotrlik, J. W. K. J. W., & Higgins, C. C. H. C. C. (2001). Organizational research: Determining appropriate sample size in survey research appropriate sample size in survey research. *Information technology, learning, and performance journal*, 19(1), 43.
- LeCun, Y., Bengio, Y., & Hinton, G. (2015). Deep learning. *nature*, 521(7553), 436-444.
- Leleñ, P., & Wasiak, M. (2019). The model of selecting multimodal technologies for the transport of perishable products. *Archives of Transport*, 50.
- Lemma, Y., Kitaw, D., & Gatew, G. (2014). Loss in perishable food supply chain: an optimization approach literature review. *International Journal of Scientific & Engineering Research*, 5(5), 302-311.
- Lieberman, E. R. (1991). Soviet multi-objective mathematical programming methods: An overview. *Management science*, 37(9), 1147-1165.
- Malathy, S., Karthiga, R. R., Swetha, K., & Preethi, G. (2021, January). Disease detection in fruits using image processing. In *2021 6th International Conference on Inventive Computation Technologies (ICICT)* (pp. 747-752). IEEE.

- Mercier, S., Mondor, M., McCarthy, U., Villeneuve, S., Alvarez, G., & Uysal, I. (2019). Optimized cold chain to save food. *Saving food*, 203-226.
- Mogale, D. G., Kumar, M., Kumar, S. K., & Tiwari, M. K. (2018). Grain silo location-allocation problem with dwell time for optimization of food grain supply chain network. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 111, 40-69.
- Mohammed, A., & Wang, Q. (2017). Developing a meat supply chain network design using a multi-objective possibilistic programming approach. *British food journal*, 119(3), 690-706.
- Munhoz, J. R., & Morabito, R. (2014). Optimization approaches to support decision making in the production planning of a citrus company: A Brazilian case study. *Computers and Electronics in Agriculture*, 107, 45-57.
- Musavi, M., & Bozorgi-Amiri, A. (2017). A multi-objective sustainable hub location-scheduling problem for perishable food supply chain. *Computers & Industrial Engineering*, 113, 766–
- Nealer, R., Matthews, H. S., & Hendrickson, C. (2012). Assessing the energy and greenhouse gas emissions mitigation effectiveness of potential US modal freight policies. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 46(3), 588-601.
- Nguyen, T. D., Venkatadri, U., Nguyen-Quang, T., Diallo, C., & Adams, M. (2019). Optimization model for fresh fruit supply chains: case-study of dragon fruit in Vietnam. *AgriEngineering*, 2(1), 1-26.
- O'shea, K., & Nash, R. (2015). An introduction to convolutional neural networks. *arXiv preprint arXiv:1511.08458*.
- Osvald, A., & Stirn, L. Z. (2008). A vehicle routing algorithm for the distribution of fresh vegetables and similar perishable food. *Journal of food engineering*, 85(2), 285-295.
- Pan, S. J., & Yang, Q. (2009). A survey on transfer learning. *IEEE Transactions on knowledge and data engineering*, 22(10), 1345-1359.
- Prakash, S., Soni, G., Rathore, A. P. S., & Singh, S. (2017). Risk analysis and mitigation for perishable food supply chain: a case of dairy industry. *Benchmarking: An International Journal*, 24(1), 2-23.
- Putra, K. T., Hariadi, T. K., Riyadi, S., & Chamim, A. N. N. (2018, July). Feature Extraction for Quality Modeling of Malang Oranges on an Automatic Fruit Sorting System. In *2018 2nd International Conference on Imaging, Signal Processing and Communication (ICISPC)* (pp. 74-78). IEEE.
- Rahimi, M., Baboli, A., & Rekik, Y. (2017). Multi-objective inventory routing problem: A stochastic model to consider profit, service level and green criteria. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 101, 59-83.
- Romero, C. (2004). A general structure of achievement function for a goal programming model. *European Journal of Operational Research*, 153(3), 675-686.

- Romero, C. (2004). A general structure of achievement function for a goal programming model. *European Journal of Operational Research*, 153(3), 675-686.
- Romero, C. (2014). *Handbook of critical issues in goal programming*. Elsevier.
- Rong, A., Akkerman, R., & Grunow, M. (2011). An optimization approach for managing fresh food quality throughout the supply chain. *International Journal of Production Economics*, 131(1), 421–429
- Saaty, T.L., (1980). The analytic hierarchy process. New York: McGraw Hill. International, Translated to Russian, Portuguese, and Chinese, Revised editions, Paperback (1996, 2000), Pittsburgh: RWS Publications.
- Sarıkaya, H. A., Çalışkan, E., & Türkbey, O. (2014). Bütünleşik tedarik zinciri ağında tesis yeri seçimi için bulanık çok amaçlı programlama modeli. *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 20(5), 150-161.
- Silva, M. C., da Silva, J. C. F., & Oliveira, R. A. R. (2021, April). IDiSSC: Edge-computing-based Intelligent Diagnosis Support System for Citrus Inspection. In *ICEIS (1)* (pp. 685-692).
- Singh, R., Sharma, N., & Gupta, R. (2023, August). Rice leaf disease detection using MobileNet Transfer Learning model. In *2023 Second International Conference on Trends in Electrical, Electronics, and Computer Engineering (TEECCON)* (pp. 131-136). IEEE.
- Soltani Firouz, M., & Sardari, H. (2022). Defect detection in fruit and vegetables by using machine vision systems and image processing. *Food Engineering Reviews*, 14(3), 353-379.
- Song, C., Wang, C.-H., & Yang, Y. (2020). *Automatic Detection and Image Recognition of Precision Agriculture for Citrus Diseases*. 2020 IEEE Eurasia Conference on IOT, Communication and Engineering (ECICE), 187–190.
- Soysal, M., Bloemhof-Ruwaard, J. M., & van der Vorst, J. G. A. J. (2014). Modelling food logistics networks with emission considerations: The case of an international beef supply chain. *International Journal of Production Economics*, 152, 57–70.
- Srivastava, S., Vani, B., & Sadistap, S. (2020). Machine-vision based handheld embedded system to extract quality parameters of citrus cultivars. *Journal of Food Measurement and Characterization*, 14(5), 2746-2759.
- Tamiz, M., Jones, D. F., & El-Darzi, E. (1995). A review of goal programming and its applications. *Annals of operations Research*, 58(1), 39-53.
- Tamiz, M., Jones, D., & Romero, C. (1998). Goal programming for decision making: An overview of the current state-of-the-art. *European Journal of operational research*, 111(3), 569-581.
- Tao, F., Chen, W., & Jia, Z. (2021). Effect of simulated transport vibration on the quality of shiitake mushroom (*Lentinus edodes*) during storage. *Food Science & Nutrition*, 9(2), 1152-1159.
- Targ, S., Almeida, D., & Lyman, K. (2016). Resnet in resnet: Generalizing residual architectures. *arXiv preprint arXiv:1603.08029*.

- Tassou, S. A., De-Lille, G., & Ge, Y. T. (2009). Food transport refrigeration—Approaches to reduce energy consumption and environmental impacts of road transport. *Applied Thermal Engineering*, 29(8-9), 1467-1477.
- Tirkolaei, E. B., & Aydin, N. S. (2022). Integrated design of sustainable supply chain and transportation network using a fuzzy bi-level decision support system for perishable products. *Expert Systems with Applications*, 195, 116628
- Triantaphyllou, E. (2000). Multi-criteria decision making methods. In *Multi-criteria decision making methods: A comparative study* (pp. 5-21). Springer, Boston, MA.
- Vaidya, G., Chaudhary, N., Nasare, S., Warutkar, S., Kawathekar, S., & Dhengre, S. (2023, April). Disease detection of citrus plants using image processing techniques. In *2023 11th International Conference on Emerging Trends in Engineering & Technology-Signal and Information Processing (ICETET-SIP)* (pp. 1-6). IEEE.
- Validi, S., Bhattacharya, A., & Byrne, P. J. (2014). A case analysis of a sustainable food supply chain distribution system—A multi-objective approach. *International Journal of Production Economics*, 152(2), 71–87
- Violi, A., Laganá, D., & Paradiso, R. (2020). The inventory routing problem under uncertainty with perishable products: an application in the agri-food supply chain. *Soft computing*, 24(18), 13725-13740.
- Wang, X., Wang, M., Ruan, J., & Zhan, H. (2016). The multi-objective optimization for perishable food distribution route considering temporal-spatial distance. *Procedia Computer Science*, 96, 1211-1220.
- Xiang, Q., Wang, X., Li, R., Zhang, G., Lai, J., & Hu, Q. (2019, October). Fruit image classification based on Mobilenetv2 with transfer learning technique. In *Proceedings of the 3rd international conference on computer science and application engineering* (pp. 1-7).
- Yakavenka, V., Mallidis, I., Vlachos, D., Iakovou, E., & Eleni, Z. (2020). Development of a multi-objective model for the design of sustainable supply chains: The case of perishable food products. *Annals of Operations Research*, 294(1), 593-621.
- Yang, S., Xiao, Y., Zheng, Y., & Liu, Y. (2017). The green supply chain design and marketing strategy for perishable food based on temperature control. *Sustainability*, 9(9), 1511.
- Yapraklı, S., & Bayramoğlu, T. (2017). Türkiye’de enerji kullanımı ve iklim değişikliği: 1990-2030 dönemine ilişkin tanımsal bir uygulama. *Gazi Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi*, 19(2), 430-453.
- Zanoni, S., Mazzoldi, L., & Ferretti, I. (2019). Eco-efficient cold chain networks design. *International Journal of Sustainable Engineering*, 12(5), 349-364.
- Zhao, Y., Li, L., Gao, S., Wang, S., Li, X., & Xiong, X. (2023). Postharvest storage properties and quality kinetic models of cherry tomatoes treated by high-voltage electrostatic fields. *Lwt*, 176, 114497.

ÖZGEÇMİŞ

Şeyda TAŞKINIRMAK, Lisans eğitimini Çukurova Üniversitesi Endüstri Mühendisliği bölümünde 2016 yılında tamamladıktan sonra, Çukurova Üniversitesi Endüstri Mühendisliği bölümünde Yüksek Lisans derecesini 2019 yılında aldı. 2019 yılında Çukurova Üniversitesi Endüstri Mühendisliği Doktora eğitimine başlayarak çalışmalarını devam ettirmiştir. 2018 yılının mart ayından beri Adana Alparslan Türkeş Bilim ve Teknoloji Üniversitesinde araştırma görevlisi olarak görev yapmaktadır.







EKLER



EK A. Bulanık Mantık Yönteminde Kullanılan Kural Tabanları

Çizelge 1. Nar Kural Tabanı

No	Renk	Yüzey	Şekil	Sonuç
1	Kötü	Çok Kusurlu	Bozuk	Düşük Kalite
2	Kötü	Çok Kusurlu	Orta	Düşük Kalite
3	Kötü	Çok Kusurlu	İyi	Düşük Kalite
4	Kötü	Orta Kusurlu	Bozuk	Düşük Kalite
5	Kötü	Orta Kusurlu	Orta	Düşük Kalite
6	Kötü	Orta Kusurlu	İyi	Düşük Kalite
7	Kötü	Az Kusurlu	Bozuk	Düşük Kalite
8	Kötü	Az Kusurlu	Orta	Düşük Kalite
9	Kötü	Az Kusurlu	İyi	Düşük Kalite
10	Orta	Çok Kusurlu	Bozuk	Düşük Kalite
11	Orta	Çok Kusurlu	Orta	Düşük Kalite
12	Orta	Çok Kusurlu	İyi	Orta Kalite
13	Orta	Orta Kusurlu	Bozuk	Düşük Kalite
14	Orta	Orta Kusurlu	Orta	Orta Kalite
15	Orta	Orta Kusurlu	İyi	Orta Kalite
16	Orta	Az Kusurlu	Bozuk	Orta Kalite
17	Orta	Az Kusurlu	Orta	Orta Kalite
18	Orta	Az Kusurlu	İyi	Yüksek Kalite
19	İyi	Çok Kusurlu	Bozuk	Orta Kalite
20	İyi	Çok Kusurlu	Orta	Orta Kalite
21	İyi	Çok Kusurlu	İyi	Orta Kalite
22	İyi	Orta Kusurlu	Bozuk	Orta Kalite
23	İyi	Orta Kusurlu	Orta	Orta Kalite
24	İyi	Orta Kusurlu	İyi	Yüksek Kalite
25	İyi	Az Kusurlu	Bozuk	Orta Kalite
26	İyi	Az Kusurlu	Orta	Yüksek Kalite
27	İyi	Az Kusurlu	İyi	Yüksek Kalite

Çizelge 2. Şeftali Kural Tabanı

No	Renk	Yüzey	Şekil	Sonuç
1	Kötü	Çok Kusurlu	Bozuk	Düşük Kalite
2	Kötü	Çok Kusurlu	Orta	Düşük Kalite
3	Kötü	Çok Kusurlu	İyi	Düşük Kalite
4	Kötü	Orta Kusurlu	Bozuk	Düşük Kalite
5	Kötü	Orta Kusurlu	Orta	Düşük Kalite
6	Kötü	Orta Kusurlu	İyi	Orta Kalite
7	Kötü	Az Kusurlu	Bozuk	Düşük Kalite
8	Kötü	Az Kusurlu	Orta	Düşük Kalite
9	Kötü	Az Kusurlu	İyi	Düşük Kalite
10	Orta	Çok Kusurlu	Bozuk	Düşük Kalite
11	Orta	Çok Kusurlu	Orta	Düşük Kalite
12	Orta	Çok Kusurlu	İyi	Orta Kalite
13	Orta	Orta Kusurlu	Bozuk	Düşük Kalite
14	Orta	Orta Kusurlu	Orta	Orta Kalite
15	Orta	Orta Kusurlu	İyi	Orta Kalite
16	Orta	Az Kusurlu	Bozuk	Orta Kalite
17	Orta	Az Kusurlu	Orta	Orta Kalite
18	Orta	Az Kusurlu	İyi	Yüksek Kalite
19	İyi	Çok Kusurlu	Bozuk	Düşük Kalite
20	İyi	Çok Kusurlu	Orta	Düşük Kalite
21	İyi	Çok Kusurlu	İyi	Düşük Kalite
22	İyi	Orta Kusurlu	Bozuk	Orta Kalite
23	İyi	Orta Kusurlu	Orta	Orta Kalite
24	İyi	Orta Kusurlu	İyi	Yüksek Kalite
25	İyi	Az Kusurlu	Bozuk	Orta Kalite
26	İyi	Az Kusurlu	Orta	Yüksek Kalite
27	İyi	Az Kusurlu	İyi	Yüksek Kalite

Çizelge 3. Limon Kural Tabanı

No	Renk	Yüzey	Şekil	Sonuç
1	Kötü	Çok Kusurlu	Bozuk	Düşük Kalite
2	Kötü	Çok Kusurlu	Orta	Düşük Kalite
3	Kötü	Çok Kusurlu	İyi	Düşük Kalite
4	Kötü	Orta Kusurlu	Bozuk	Düşük Kalite
5	Kötü	Orta Kusurlu	Orta	Düşük Kalite
6	Kötü	Orta Kusurlu	İyi	Düşük Kalite
7	Kötü	Az Kusurlu	Bozuk	Düşük Kalite
8	Kötü	Az Kusurlu	Orta	Düşük Kalite
9	Kötü	Az Kusurlu	İyi	Düşük Kalite
10	Orta	Çok Kusurlu	Bozuk	Düşük Kalite
11	Orta	Çok Kusurlu	Orta	Düşük Kalite
12	Orta	Çok Kusurlu	İyi	Orta Kalite
13	Orta	Orta Kusurlu	Bozuk	Düşük Kalite
14	Orta	Orta Kusurlu	Orta	Orta Kalite
15	Orta	Orta Kusurlu	İyi	Orta Kalite
16	Orta	Az Kusurlu	Bozuk	Orta Kalite
17	Orta	Az Kusurlu	Orta	Orta Kalite
18	Orta	Az Kusurlu	İyi	Yüksek Kalite
19	İyi	Çok Kusurlu	Bozuk	Orta Kalite
20	İyi	Çok Kusurlu	Orta	Orta Kalite
21	İyi	Çok Kusurlu	İyi	Orta Kalite
22	İyi	Orta Kusurlu	Bozuk	Orta Kalite
23	İyi	Orta Kusurlu	Orta	Orta Kalite
24	İyi	Orta Kusurlu	İyi	Yüksek Kalite
25	İyi	Az Kusurlu	Bozuk	Orta Kalite
26	İyi	Az Kusurlu	Orta	Yüksek Kalite
27	İyi	Az Kusurlu	İyi	Yüksek Kalite

Çizelge 4. Kayısı Kural Tabanı

No	Renk	Yüzey	Şekil	Sonuç
1	Kötü	Çok Kusurlu	Bozuk	Düşük Kalite
2	Kötü	Çok Kusurlu	Orta	Düşük Kalite
3	Kötü	Çok Kusurlu	İyi	Düşük Kalite
4	Kötü	Orta Kusurlu	Bozuk	Düşük Kalite
5	Kötü	Orta Kusurlu	Orta	Düşük Kalite
6	Kötü	Orta Kusurlu	İyi	Orta Kalite
7	Kötü	Az Kusurlu	Bozuk	Düşük Kalite
8	Kötü	Az Kusurlu	Orta	Düşük Kalite
9	Kötü	Az Kusurlu	İyi	Düşük Kalite
10	Orta	Çok Kusurlu	Bozuk	Düşük Kalite
11	Orta	Çok Kusurlu	Orta	Düşük Kalite
12	Orta	Çok Kusurlu	İyi	Orta Kalite
13	Orta	Orta Kusurlu	Bozuk	Düşük Kalite
14	Orta	Orta Kusurlu	Orta	Orta Kalite
15	Orta	Orta Kusurlu	İyi	Orta Kalite
16	Orta	Az Kusurlu	Bozuk	Orta Kalite
17	Orta	Az Kusurlu	Orta	Orta Kalite
18	Orta	Az Kusurlu	İyi	Yüksek Kalite
19	İyi	Çok Kusurlu	Bozuk	Düşük Kalite
20	İyi	Çok Kusurlu	Orta	Düşük Kalite
21	İyi	Çok Kusurlu	İyi	Düşük Kalite
22	İyi	Orta Kusurlu	Bozuk	Orta Kalite
23	İyi	Orta Kusurlu	Orta	Orta Kalite
24	İyi	Orta Kusurlu	İyi	Yüksek Kalite
25	İyi	Az Kusurlu	Bozuk	Orta Kalite
26	İyi	Az Kusurlu	Orta	Yüksek Kalite
27	İyi	Az Kusurlu	İyi	Yüksek Kalite