

SUSTAINABLE PACKAGING SELECTION IN AIR CARGO COLD CHAIN: AN INTEGRATED ENTROPY-TOPSIS APPROACH

Öyküm YILMAZ

ABSTRACT

While offering a speed advantage in the global supply chain, air cargo transportation faces significant sustainability pressure due to high carbon emissions and operational costs. This study aims to address the gap in the literature by presenting a numerical decision framework for packaging selection in air cargo operations, focusing not merely on cost but also on payload optimization and ICAO decarbonization goals. Based on fuel consumption and flight duration data over a representative 5000 km route, the study analyzes both the environmental and economic efficiencies of active, passive PCM, and vacuum panel packaging systems. Within the methodological framework, a hybrid structure is constructed using the Entropy method to establish objective criteria weights and the TOPSIS method for the prioritization of alternatives. The findings reveal that the "Volumetric Weight" and "Carbon Footprint" variables alone account for 83.2% of the decision-making mechanism in the aviation sector. The research results demonstrate that Passive PCM systems achieve a striking reduction of 85.4% in carbon emissions and 70.8% in operational costs compared to traditional active containers. Identified as the most sustainable alternative with a TOPSIS score of 0.985, these systems appear to be the most rational solution for Green Logistics strategies. The implementation of this model, when aligned with Turkey's vision of becoming an intercontinental logistics hub and the market expansion goals of national flag carriers, will provide a strategic competitive advantage in the adaptation process to the EU Green Deal.

Keywords: Air Cargo, Cold Chain, Sustainability, Entropy, TOPSIS, Green Logistics

Öyküm YILMAZ

Kurum: İzmir Katip Çelebi Üniversitesi

e.mail: oykumyilmaz@outlook.com

ORCID:0009-0001-7962-5542

Makale Atıf Bilgisi:	Yılmaz, Ö. (2026). "Hava Kargo Soğuk Zincirinde Sürdürülebilir Ambalaj Seçimi: Bütünleşik Entropi-Topsis Yaklaşımı". Ulaştırma ve Altyapı, Yıl:3, Sayı: 4, s.(86,99)
Makale Türü:	Araştırma
Geliş Tarihi:	06.04.2026
Kabul Tarihi:	29.05.2026
Yayın Tarihi:	24.06.2026
Yayın Sezonu:	Ocak-Haziran

HAVA KARGO SOĞUK ZİNCİRİNDE SÜRDÜRÜLEBİLİR AMBALAJ SEÇİMİ: BÜTÜNLEŞİK ENTROPİ-TOPSIS YAKLAŞIMI

ÖZET

Hava kargo taşımacılığı, küresel tedarik zincirinde hız avantajı sağlarken, yüksek karbon emisyonları ve operasyonel maliyetler sebebiyle ciddi bir sürdürülebilirlik etkisi altındadır. Bu çalışma, hava kargo operasyonlarında ambalaj seçimini sadece maliyet odaklı değil, faydalı yük optimizasyonu ve ICAO dekarbonizasyon hedeflerini de temel alan sayısal bir karar çerçevesi sunarak literatürdeki eksikliği gidermeye çalışmaktadır. Çalışma, yakıt tüketimi ve uçuş süresi verilerine dayalı 5000 km'lik bir hat üzerinde; aktif, pasif PCM ve vakum panelli ambalajların hem çevresel hem de ekonomik verimliliklerini analiz etmektedir. Metodolojik çerçevede kriter ağırlıkları Entropi yöntemiyle nesnel olarak belirlenmiş; alternatifler ise TOPSIS yöntemi aracılığıyla sıralanarak bütünlük bir karar modeli oluşturulmuştur. Elde edilen bulgular, 'Hacimsel Ağırlık' ve 'Karbon Ayak İzi' değişkenlerinin, havacılık sektöründeki karar mekanizmasının %83,2'sini büyük ölçüde etkilediğini ortaya koymaktadır. Araştırma bulguları, Pasif PCM sistemlerinin geleneksel aktif konteynerlere nazaran karbon emisyonlarında %85,4, operasyonel maliyetlerde ise %70,8 gibi önemli bir düşüş sağladığını kanıtlamaktadır. 0,985'lik TOPSIS skoruyla en sürdürülebilir alternatif olarak öne çıkan bu sistemlerin, Yeşil Lojistik uygulamaları adına en rasyonel çözüm olduğu görülmektedir. Bu modelin uygulanması; Türkiye'nin kıtalararası lojistik üs olma vizyonu ve ulusal şirketlerin pazar payını genişletme hedefleriyle birleştiğinde, AB Yeşil Mutabakatı'na uyum sürecinde ülkemize stratejik bir rekabet üstünlüğü kazandıracaktır. Çalışmanın geri kalanı şu şekilde düzenlenmiştir: İkinci bölümde ilgili literatür incelenmekte; üçüncü bölümde Entropi ve TOPSIS yöntemlerine ilişkin metodolojik çerçeve açıklanmakta; dördüncü bölümde uygulama bulguları sunulmakta; beşinci bölümde ise tartışma ve sonuçlara yer verilmektedir.

Anahtar Kelimeler: Hava Kargo, Soğuk Zincir, Sürdürülebilirlik, Entropi, TOPSIS, Yeşil Lojistik

1. Giriş

Küresel ekonomi içerisinde hava kargo taşımacılığı, sunduğu hız, güvenlik ve operasyonel verimlilik sayesinde uluslararası ticaretin ve tedarik zincirlerinin en kritik parçalarından biri haline gelmiştir (Clarke, 1970). Özellikle değer/ağırlık oranı yüksek ürünlerin sevkiyatında stratejik bir üstünlük sağlayan hava yolu ulaşımı, küresel ticaretin değer bazında yaklaşık %35'ini sırtlayarak modern ekonominin temelini korumaktadır (Debbage & Debbage, 2021). Havacılık endüstrisi, sadece ürünlerin fiziksel yer değişimini sağlamakla kalmayıp, aynı zamanda "tam zamanında" üretim modellerinin sürdürülebilirliği için vazgeçilmez bir altyapı sunmaktadır (Whitmer, 1945). Hava kargo operasyonları içinde teknik hassasiyeti en yüksek olan alan, ürünlerin üretimden tüketime kadar belirli bir sıcaklık aralığında kalmasını zorunlu kılan soğuk zincir lojistiğidir (Zhu, 2023). Bozulabilir gıda maddelerinden biyofarmasötik ürünlere kadar geniş bir yelpazeyi kapsayan bu süreçte, hava taşımacılığı en düşük bozulma riski ve en hızlı teslimat süresini vaat etmektedir (Seprenyi, Tamas, & Cservenak, 2022). Özellikle COVID-19 pandemisi süreci, aşuların ve tıbbi ekipmanların küresel ölçekte dağıtımında hava kargo soğuk zincirinin hayati önemini ve bu sistemdeki en küçük aksaklığın toplumsal sağlık üzerindeki yıkıcı etkilerini kanıtlamıştır (Şen, 2021). Buna karşın, havacılık sektörü ve buna bağlı soğuk zincir faaliyetleri, yüksek enerji tüketimi ve fosil yakıt bağımlılığı nedeniyle ciddi bir çevresel baskı altındadır (Ilangovan, Hamdane, Silva, D ve Pires, 2022). Hava yolu taşımacılığı, birim kargo başına düşen karbon ayak izi açısından karayolu ve denizyoluna göre çok daha yüksek emisyon değerlerine sahiptir (International Air Transport Association, 2023). Bu durum lojistik yöneticilerini "yeşil lojistik" kavramı çerçevesinde, operasyonel performanstan ödün vermeden çevresel etkileri minimize edecek inovatif yaklaşımlar bulmaya itmiştir (Baxter, 2021). Sürdürülebilir soğuk zincir yönetimi, sadece karbon emisyonlarının azaltılmasını değil, aynı zamanda paketleme sistemlerinde kullanılan malzemelerin döngüsel ekonomiye kazandırılmasını da kapsamaktadır (Hien & Thanh, 2022). Soğuk zincir taşımacılığında ürün güvenliğini sağlayan en kritik unsurlardan biri olan ambalaj sistemlerinin seçimi, maliyet, ağırlık, sıcaklık koruma performansı ve çevresel etki gibi birbiriyle çatışan birçok kriteri barındırmaktadır (Hryhorak & Šimák, 2020). Geleneksel seçim yöntemleri genellikle tek bir kriterle (çoğunlukla maliyet) odaklanırken, modern sürdürülebilirlik anlayışı karmaşık ve çok boyutlu bir karar verme sürecini gerekli kılar (Z, ve diğerleri, 2019). Bu noktada Çok Kriterli Karar Verme (MCDM) teknikleri, karar vericilerin öznel ve nesnel kriterleri bir arada değerlendirmesine olanak tanıyan bilimsel bir çerçeve sunar (Nguyen, Wang, Dang, Dang, & Dang, 2022). Özellikle hava kargo sektöründe sürdürülebilir ambalaj seçimi, hem işletmenin karlılığı hem de kurumsal sosyal sorumluluk hedefleri açısından stratejik bir öneme sahiptir. Havacılık sektörü, Uluslararası Sivil Havacılık Örgütü (ICAO) tarafından yürütülen CORSIA programı çerçevesinde, 2050 yılına kadar net sıfır karbon emisyonu hedefine ulaşmayı taahhüt etmiştir. Bu bağlamda, havayolu işletmeleri için ambalaj sistemlerinin seçimi, yalnızca operasyonel bir tercih olmaktan çıkıp, uluslararası regülasyonlara uyumun stratejik parçası haline gelmiştir. Avrupa, Asya ve Afrika kıtaları arasındaki doğal köprü konumuyla Türkiye, modern İpek Yolu olarak adlandırılan 'Orta Koridor'un en stratejik geçiş noktasıdır. İstanbul Havalimanı'nın sağladığı geniş kargo kapasitesi ve Turkish Cargo gibi küresel taşıyıcıların artan operasyonel ağı, Türkiye'yi dünya hava kargo trafiğinde vazgeçilmez bir 'hub' noktası olmasına olanak sağlamıştır. Ancak bu büyümenin sürdürülebilir kılınması, özellikle en büyük ticaret ortağımız olan Avrupa Birliği'nin 'Sınırdaki Karbon Düzenleme Mekanizması' gibi katı çevre regülasyonlarına uyum sağlayabilme yeteneğine bağlıdır. Dolayısıyla bu çalışma, Türk sivil havacılığının operasyonel verimliliğini artırırken, uluslararası karbon vergilendirme risklerini minimize ederek yerli ve milli stratejilerin geliştirilmesine de teknik bir altyapı sunmayı hedeflemektedir.

Ancak bu büyümenin sürdürülebilir kılınması, özellikle en büyük ticaret ortağımız olan Avrupa Birliği'nin 'Sınırdan Karbon Düzenleme Mekanizması' gibi katı çevre regülasyonlarına uyum sağlayabilme yeteneğine bağlıdır. Dolayısıyla bu çalışma, Türk sivil havacılığının operasyonel verimliliğini artırırken, uluslararası karbon vergilendirme risklerini minimize ederek yerli ve milli stratejilerin geliştirilmesine de teknik bir atyapı sunmayı hedeflemektedir.

Bu araştırma, hava kargo soğuk zincir operasyonlarında kullanılan aktif ve pasif konteyner alternatiflerini sürdürülebilirlik perspektifiyle incelemeyi ve en ideal seçimi yapabilmek adına bütünlük bir MCDM modeli kurgulamayı hedeflemektedir. Mevcut literatür incelendiğinde; çalışmaların çoğunlukla operasyonel riskler, sıcaklık kırılmaları veya tek boyutlu maliyet hesaplamaları etrafında gruplandığı görülmektedir. Ancak mevcut literatürde; ambalaj sistemlerinin faydalı yük ve karbon ayak izi üzerindeki etkilerini, ICAO dekarbonizasyon hedefleriyle harmanlayarak inceleyen kapsamlı sayısal modeller az sayıdadır. Bu çalışma, ilgili problemi havacılık endüstrisine özgü kritik kısıtlar (Hacimsel ağırlık, MTOW) altında kurgulayarak, alandaki bu boşluğa önemli bir katkı sunmayı hedeflemektedir.

2. Literatür Taraması

Global ticaretin sınırları aşmasıyla birlikte, hava kargo ve soğuk zincir lojistiği literatürde öncelikli bir çalışma alanı haline gelmiştir. Bu bölümde mevcut literatür; operasyonel dönüşüm, sürdürülebilirlik stratejileri, ambalaj inovasyonları ve çok kriterli karar modelleri ekseninde dört temel sütun üzerinden analiz edilmektedir.

2.1. Hava Kargo ve Soğuk Zincir Operasyonlarının Evrimi ve Stratejik Önemi

Hava taşımacılığı tarihsel olarak yüksek değerli ve aciliyet gerektiren ürünlerin sevkiyatı için bir lüks olarak görülürken, günümüzde modern ekonominin ana damarlarından biri haline gelmiştir (Whitmer, 1945) Literatürdeki çalışmalar, havacılık endüstrisinin küresel GSYİH içindeki payının ve istihdama katkısının lojistik verimlilikle doğrudan bağlantılı olduğunu kanıtlamaktadır (Clarke, 1970). Soğuk zincir lojistiği ise bu sistemin en hassas halkasıdır; çünkü bozulabilir ürünlerin kalitesinin korunması, taşıma sürecindeki her aşamada sıcaklık stabilitesine bağlıdır (Hongsakul & Chuaychoo, 2024).

Araştırmalar, özellikle ilaç ve taze gıda taşımacılığında hava kargonun diğer taşıma modlarına göre hız avantajıyla ön plana çıktığını, ancak havalimanlarındaki "yer operasyonları" aşamasında ciddi verimlilik kayıpları yaşandığını göstermektedir (International Air Transport Association, 2021) Türkiye'nin hava kargo operasyonlarında jeopolitik konumu kritik bir avantaj sağlasa da, operasyonel verimlilik ve dijitalleşme süreçlerinde iyileştirmelere ihtiyaç duyulmaktadır (Bakır & Akan, 2018).

2.2. Soğuk Zincirde Risk Faktörleri ve Teknik Zorluklar

Literatürde soğuk zincir operasyonları "risk odaklı" bir perspektifle ele alınmaktadır. Sıcaklık sapmaları, sadece ürünün fiziksel bozulmasına değil, aynı zamanda taşıyıcının hukuki sorumluluklarının ve sigorta maliyetlerinin artmasına da neden olmaktadır (Bekmezci & Tarhan, 2023). Risklerin yönetimi noktasında yapılan çalışmalarda, özellikle taşıma sırasındaki vibrasyon, nem oranındaki değişimler ve transfer noktalarındaki beklemlerin en kritik hata kaynakları olduğu saptanmıştır (Seprenyi, Tamas, & Cservenak, 2022).

Aşı ve biyofarmasötik ürün lojistiği üzerine yapılan sistematik incelemeler, COVID-19 pandemisi ile birlikte "uçtan uca görünürlük" kavramının önemini vurgulamıştır (Fahrni ML, vd., 2022). Bu noktada, akıllı sensörlerin ve gerçek zamanlı takip sistemlerinin ambalajlara entegrasyonu, literatürde operasyonel şeffaflığı artıran en önemli teknolojik trend olarak tanımlanmaktadır (Shashi, Centobelli, Cerchione, & Ertz, 2021).

2.3. Sürdürülebilirlik, Dekarbonizasyon ve Yeşil Lojistik Paradigmaları

Küresel iklim krizi, havacılık sektörünü karbon emisyonlarını azaltmaya yönelik radikal kararlar almaya zorlamıştır (Debbage & Debbage, 2021). Hava yolu taşımacılığının çevresel etkisi, kullanılan yakıt tipi kadar, uçağın taşıdığı yükün ağırlığı ve ambalajın verimliliğiyle de ilişkilidir (International Air Transport Association, 2023). Yeşil lojistik uygulamalarının firmaların piyasa değerini ve kurumsal itibarını artırdığı yönündeki bulgular, akademik yazında sıklıkla karşımıza çıkmaktadır (Ilangoan, Hamdane, Silva, D, & Pires, 2022).

Sürdürülebilir tedarik zinciri yönetimi literatürü, son yıllarda "döngüsel ambalajlama sistemlerine odaklanmıştır. Tek kullanımlık strafor kutular yerine, çok kullanımlık ve ısı yalıtımı yüksek pasif konteynerlerin veya geri dönüştürülebilir malzemelerin kullanımı, karbon ayak izini %30 oranında azaltma potansiyeline sahiptir (Hien & Thanh, 2022).. Ancak, bu sistemlerin ilk yatırım maliyetlerinin yüksek olması, karar vericilerin ekonomik ve çevresel kriterler arasında bir denge kurmasını gerektirmektedir.

2.4. Karar Verme Modelleri ve Metodolojik Gelişmeler

Ambalaj ve tedarikçi seçimi gibi karmaşık problemlerin çözümünde kullanılan metodolojiler, literatürde tekli yöntemlerden bütünleşik yöntemlere evrilmiştir. Klasik maliyet analizleri, günümüz lojistik ihtiyaçlarını karşılamada yetersiz kalmakta; bu sebeple Çok Kriterli Karar Verme (MCDM) teknikleri bilimsel bir standart haline gelmektedir (Nguyen, Wang, Dang, Dang, & Dang, 2022).

Literatür tarandığında;

- AHP ve GRA: Genellikle lojistik hizmet sağlayıcılarının hiyerarşik değerlendirilmesinde kullanılmaktadır (Sandeep, Kumanan, & Vinodh, 2011).
- TOPSIS ve VIKOR: Alternatifler arasından en ideal olanı seçme noktasında yüksek hassasiyet sunmaktadır (Z, ve diğerleri, 2019)
- Bulanık Mantık (Fuzzy): Karar vericilerin subjektif yargılarındaki belirsizliği modellemek için tercih edilmektedir (Ilangoan, Hamdane, Silva, D, & Pires, 2022) .

Mevcut çalışmaların büyük bir kısmı genel lojistik süreçlere odaklanırken, hava kargo soğuk zincir ambalaj sistemlerini doğrudan "sürdürülebilirlik" parametreleri altında ve sayısal bir modelle inceleyen araştırmaların kısıtlı olduğu görülmektedir (Voort, 2016). Bu çalışma, söz konusu boşluğu doldurarak literatüre metodolojik bir katkı sunmayı amaçlamaktadır.

Tablo 1. Bu Çalışmanın Literatürdeki Yeri ve Özgün Değeri

Yazar	Odaklanılan Sektör	Kullanılan Yöntem	Sürdürülebilirlik Odaklı mı?	Faydalı Yük Etkisi Dahil mi?
Hryhorak (2020)	Havacılık Lojistiği	Kavramsal Çerçeve	Hayır (Maliyet Odaklı)	Hayır
Shashi (2021)	Soğuk Zincir	İstatistiksel Analiz	Kismen	Hayır
Wen et al. (2019)	İlaç Lojistiği	Bütünleşik MCDM	Evet	Hayır
van der Voort (2016)	Hava Kargo	Vaka Analizi (Case Study)	Hayır (Operasyonel)	Evet
Bu Çalışma	Hava Kargo	Entropi - TOPSIS	Evet	Evet

3. Materyal ve Yöntem

Bu çalışma, hava kargo soğuk zincir lojistiğinde sürdürülebilir ambalaj alternatiflerinin seçimi konusuna odaklanmaktadır. Süreç, maliyet, teknik başarımlar ve çevresel etkiler gibi birbirine zıtlaşabilen kriterler arasında hassas bir denge kurulmasını gerektirmektedir. Bu karmaşık yapıyı sistematik bir çerçeveye oturtmak hedefiyle, araştırmada bütünleşik bir Çok Kriterli Karar Verme (ÇKKV) modeli kurgulanarak uygulanmıştır. Karar verici inisiyatifine dayalı olduğu için tutarsızlık ihtimali barındıran AHP yönteminin aksine; bu çalışmada verinin nesnel değişkenliğini referans alan Entropi yöntemi tercih edilmiştir. Özellikle havacılık gibi nicel verilerin (ağırlık, emisyon, ısı koruma) ön planda olduğu sektörlerde, verinin bilgi değerini ölçümleyen Entropi, insan kaynaklı önyargıları minimize etmede daha yetkindir. Bu sayede elde edilen tarafsız ağırlıklar kullanılarak, ideal çözüme geometrik yakınlığı hesaplayan TOPSIS yöntemi ile alternatifler sıralanmıştır.

3.1. Değerlendirme Kriterlerinin Tanımlanması

Hava kargo operasyonlarında soğuk zincir ambalaj seçimi için sürdürülebilirlik odaklı beş temel kriter literatür verileri ışığında belirlenmiştir:

1. Birim Maliyet : Ambalaj sisteminin tedarik, hazırlık ve enerji maliyetlerini kapsamaktadır.

2. Termal Koruma Süresi : Ürünün hedeflenen ısı aralığında korunabildiği maksimum süreyi ifade eder.

3. Hacimsel Ağırlık Verimliliği : Hava kargoda navlun ücretlendirmesine temel teşkil eden ağırlık ve hacim dengesidir.

4. Karbon Ayak İzi : Ambalajın üretimi ve nakliyesi sırasında oluşan toplam emisyon miktarıdır.

5. Döngüsellik Oranı : Malzemenin geri dönüştürülebilirlik potansiyeli ve çevresel atık yönetimine uygunluğudur.

3.2. Alternatiflerin Belirlenmesi

Sektörel uygulamalar ve teknolojik gelişimler doğrultusunda üç farklı sistem analiz kapsamında değerlendirilmiştir:

- **Aktif Sistemler (A1)** : Harici enerji kaynağı ile sıcaklık kontrolü sağlayan konteynerler.
- **Pasif PCM Sistemler (A2)** : Faz değiştiren malzemeler ile koruma sağlayan çözümler.
- **Vakum Yalıtımlı Çözümler (A3)** : Yüksek yalıtım performansına sahip yenilikçi ambalajlar.

3.3. Entropi Ağırlıklandırma Yöntemi

Maliyet (C1), Hacimsel Ağırlık (C3) ve Karbon Ayak İzi (C4) gibi 'düşük değer tercih edildiği' kriterler için, literatürde yaygın kullanılan Min-Max normalizasyonu yerine **karşılıklı dönüşüm** ($1/x_{ij}$) yöntemi tercih edilmiştir. Maliyet yönlü kriterler (C1, C3, C4), Entropi hesaplaması öncesinde $x'_{ij}=1/x_{ij}$ formülü ile fayda yönlü veriye dönüştürülmüştür. Bu dönüşüm ile TOPSIS aşamasında tüm kriterler 'fayda' yönlü olarak işlem görmüş, böylece pozitif ideal çözüme (A^+) olan uzaklık hesaplamalarında yön karmaşası giderilmiştir.

Adım 1: Karar matrisinin ($X_{m \times n}$) normalize edilmesi:

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

Adım 2: Kriterler için Entropi değerinin (e_j) hesaplanması (burada $k = \frac{1}{\ln(m)}$)

$$e_j = -k \sum_{i=1}^m r_{ij} \ln(r_{ij}) \quad (2)$$

Adım 3: Bilgi farklılaşma derecesinin ($d_j = 1 - e_j$) hesaplanması ve nihai ağırlıkların (w_j) belirlenmesi:

$$w_j = \frac{d_j}{\sum_{j=1}^n d_j} \quad (3)$$

3.4. TOPSIS Yöntemi

TOPSIS yöntemi, en iyi alternatifin "Pozitif İdeal Çözüme" (A^+) en yakın ve "Negatif İdeal Çözüme" (A^-) en uzak olduğu geometrik yaklaşımla sıralama yapar.

Adım 1: Ağırlıklı standart karar matrisinin oluşturulması:

$$v_{ij} = w_j \cdot r_{ij} \quad (4)$$

Adım 2: Pozitif (A^+) ve negatif (A^-) ideal çözüm noktalarının belirlenmesi:

$$A^+ = \{(\max v_{ij} | j \in J), (\min v_{ij} | j \in J')\}$$

$$A^- = \{(\min v_{ij} | j \in J), (\max v_{ij} | j \in J')\} \quad (5)$$

Adım 3: Her alternatifin ideal noktalara olan Öklid uzaklıklarının (S_i^+ ve S_i^-) hesaplanması:

$$S_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^n (v_{ij} - v_j^+)^2} \quad , \quad S_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^n (v_{ij} - v_j^-)^2} \quad (6)$$

Adım 4: İdeal çözüme göreli yakınlık katsayısının (C_i) hesaplanması:

$$C_i = \frac{S_i^-}{S_i^+ + S_i^-} \quad (7)$$

C_i değeri 1'e en yakın olan alternatif, sürdürülebilirlik kriterleri altında en uygun çözüm olarak kabul edilir.

4. Uygulama ve Bulgular

Bu bölüm, teorik temelleri önceki kısımda atılan Entropi-TOPSIS modelinin, hava kargo soğuk zincir ambalajlarına uygulanmasını açıklamaktadır. Analiz süreci, ham verilerin doğrulanmasından başlayarak matematiksel bulguların dökümüne uzanan bir sistemattir.

4.1. Uygulama Verileri ve Karar Matrisi (X)

Analizde kullanılan teknik veriler, KLM Cargo'nun operasyonel raporları, (Voort, 2016)) tarafından sunulan teknik veriler ve sektördeki önde gelen konteyner üreticilerinin (örn. Envirotainer, Va-Q-tec) teknik veri sayfalarından derlenmiştir. Çalışmada temel alınan teknik veriler (Voort, 2016) ve KLM raporlarından derlenmiş olmakla birlikte; 2024 yılı güncel üretici katalogları (Envirotainer, Va-Q-tec) ile çapraz doğrulamaya tabi tutulmuş ve teknolojik parametrelerin (ısı koruma süresi, darası) güncelliğini koruduğu doğrulanmıştır. Çalışma boyunca, ortalama uçuş süresi ve yakıt tüketimini baz alan 5000 km'lik kıtalararası temsili bir uçuş senaryosu baz alınmış; maliyet ve emisyon verileri bu mesafe üzerinden normalize edilmiştir.

Tablo 2. Başlangıç Karar Matrisi

Alternatifler	C1	C2	C3	C4	C5
	(USD)	(Saat)	(kg)	(kg CO2)	(%)
A1: Aktif Sistem	1200	120	550	1925	90
A2: Pasif PCM	350	72	80	280	65
A3: Vakum Panel	750	96	120	420	85
Kriter Yönü	Min (Maliyet)	Max (Fayda)	Min (Maliyet)	Min (Maliyet)	Max (Fayda)

4.2. Entropi Adımları: Kriter Ağırlıklarının Hesaplanması

Entropi yöntemi, verilerin içindeki "belirsizlik" veya "farklılaşma" miktarını ölçerek kriter önem derecelerini saptar.

Adım 1: Normalizasyon: Veriler, toplam normalizasyon ($r_{ij} = x_{ij} / \sum x_{ij}$) yöntemiyle 0-1 arasına çekilmiştir.

C_3 (Ağırlık) için normalizasyon değerleri: 0,733; 0,106; 0,160.

C_4 (Emisyon) için normalizasyon değerleri: 0,733; 0,106; 0,160.

Adım 2: Entropi Değerleri (e_j): Her kriter için verilerin dağılım yoğunluğu hesaplanmıştır. Varyasyonun (farklılaşmanın) en yüksek olduğu kriterler olan C_3 ve C_4 , en düşük entropi değerlerini ($e_j = 0,654$) almıştır.

Adım 3: Nihai Ağırlıklar (w_j): Bilgi farklılaşma derecesi ($1 - e_j$) üzerinden hesaplanan nihai ağırlıklar Tablo 3'de sunulmuştur.

Tablo 3. Kriter Ağırlıklandırma Sonuçları

Kriter	Entropi	Farklılaşma	Farklılaşma
	(e_j)	(d_j)	(w_j)
C1 (Maliyet)	0,885	0,115	0,131
C2 (Koruma)	0,977	0,023	0,026
C3 (Ağırlık)	0,635	0,365	0,416
C4 (Emisyon)	0,635	0,365	0,416
C5 (Döngüsellik)	0,99	0,01	0,011

Tablo 3'deki bulgular incelendiğinde, Hacimsel Ağırlık (C3) ve Karbon Ayak İzi (C4) kriterlerinin eşdeğer ağırlık değerlerine ($w_i = 0.416$) sahip olduğu görülmektedir. Bir uçağın taşıdığı yük ile indüklenen sürükleme arasındaki aerodinamik ilişki, yakıt ve emisyon kalemlerinde doğrudan bir maliyet artışına yol açmaktadır. Entropi yöntemi, veri setindeki bu fiziksel bağlantıyı kanıtlar nitelikte sonuçlar vermiş ve ilgili kriterleri en yüksek ağırlıkla önceliklendirmiştir. Bu sebeple elde edilen sonuçlar; istatistiksel bir tesadüf olmamakla birlikte, havacılık kurallarının matematiksel modellere başarılı bir aktarım olduğunu göstermektedir.

4.3. TOPSIS Adımları: Alternatiflerin Sıralanması

Adım 1: Ağırlıklı Standart Karar Matrisi (V): Entropi'den gelen ağırlıklar, vektör normalizasyonu yapılmış matrise uygulanmıştır.

Adım 2: İdeal ve Negatif İdeal Çözümlerin Belirlenmesi:

Pozitif İdeal A^+ : Maliyetler için en düşük (C_1, C_3, C_4), faydalar için en yüksek (C_2, C_5) değerler: [0.03, 0.01, 0.04, 0.05, 0.01]

Negatif İdeal (A^-): Tam tersi olan en kötü değerler: [0.10, 0.00, 0.29, 0.38, 0.00]

Adım 3: Uzaklıkların Hesaplanması ve Görelî Yakınlık (C_i): Her alternatifin ideal noktalara uzaklığı (S_i^+ ve S_i^-) hesaplanarak nihai performans skorları elde edilmiştir.

Tablo 4. TOPSIS Nihai Skorları ve Sıralama

Alternatifler	S_i^+ (ideale Uzaklık)	S_i^- (N.İdeale Uzaklık)	Skor (C_i)	Sıralama
A ₁ :Aktif Sistem	0,483	0,007	0,015	3
A ₂ :Pasif PCM	0,006	0,477	0,985	1
A ₃ :Vakum Panel	0,051	0,432	0,89	2

Tablo 4 incelendiğinde Pasif PCM sisteminin 0,985 gibi oldukça yüksek bir skor elde ettiği görülmektedir. Pasif PCM (A₂) sisteminin TOPSIS skorunun ideal çözüme asimptotik düzeyde yaklaşması ($C_i=0.985$) ilk bakışta istisnai bir durum gibi görünse dahi, karşılaştırma setindeki yapısal farklılıklardan kaynaklanmaktadır. TOPSIS algoritması, alternatiflerin birbirine göre görelî üstünlüğünü ölçer. Karşılaştırma grubunda yer alan Aktif Sistem (A₁); yüksek birim maliyet (1200 USD) ve yüksek emisyon (1925 kg CO₂) değerleriyle 'Negatif İdeal Çözüm' (A⁻) noktasını o kadar azaltmıştır ki, bu durum Pasif PCM seçeneğinin görelî yakınlık katsayısını maksimize etmiştir. Dolayısıyla bu yüksek skor, modelin bir kural dışılığı değil; havacılık lojistiğinde eski nesil aktif konteynerler ile yeni nesil hafifletilmiş pasif sistemler arasındaki derin teknolojik ve ekonomik farkın sayısal kanıtıdır.

4.4. Bulguların Değerlendirilmesi

Matematiksel analiz sonucunda Pasif PCM (A₂) sistemi, 0,985 puan ile en yüksek sürdürülebilirlik performansını sergilemiştir.

Sıralamada ikinci yer alan Vakum Yalıtımlı Paneller (A_3), termal koruma performansındaki teknik üstünlüğüne karşın; maliyet ve ağırlık faktörlerinin Entropi yöntemiyle yüksek ağırlık alması nedeniyle geride kalmıştır. Bu sonuç, havacılık lojistiğinde ambalaj seçiminin sadece 'ısı koruma' yeteneğine göre değil; operasyonel maliyet ve çevresel yük (emisyon) dengesine göre yapılması gerektiğini göstermektedir. Modelin ürettiği bu sıralama ($A_2 > A_3 > A_1$), çalışmanın başında belirlenen 'sürdürülebilirlik' öncelikleriyle tam uyum içerisindedir.

4.5. Duyarlılık Analizi

Entropi tabanlı ağırlıklandırma sonucunda elde edilen sıralamanın ($A_2 > A_3 > A_1$) tesadüfi olup olmadığını test etmek amacıyla, kriter ağırlıklarının değiştirildiği 3 farklı senaryo oluşturulmuştur.

Senaryo 1 (Eşit Ağırlık): Tüm kriterlerin eşit kabul edildiği durum ($w_i = 0.20$).

Senaryo 2 (Maliyet Odaklı): Ekonomik kısıtların baskın olduğu durum ($C_1 = 0.50$, diğerleri düşük).

Senaryo 3 (Çevresel Odaklı): Sürdürülebilirliğin tek öncelik olduğu durum ($C_4 = 0.50$, diğerleri düşük).

Analiz sonuçları Tablo 5'te gösterilmiştir.

Tablo 5. Duyarlılık Analizi Sıralama Sonuçları

Senaryo	En İyi Alternatif	A ₂ (Pasif PCM) Sırası	Değişim Durumu
Mevcut Durum (Entropi)	Pasif PCM (A ₂)	1.	-
Senaryo 1 (Eşit Ağırlık)	Pasif PCM (A ₂)	1.	Kararlı (Robust)
Senaryo 2 (Maliyet Odaklı)	Pasif PCM (A ₂)	1.	Kararlı (Robust)
Senaryo 3 (Çevre Odaklı)	Pasif PCM (A ₂)	1.	Kararlı (Robust)

Yapılan analiz, Pasif PCM (A₂) sisteminin yalnızca mevcut ağırlıklarla değil, olası tüm yönetimsel senaryolarda (maliyet odaklı veya çevre odaklı) en iyi performansı sergilediğini göstermektedir. Pasif PCM sisteminin hem maliyet (C_1) hem de emisyon (C_4) verilerinde rakiplerine göre sayısal üstünlüğü (Bkz. Tablo 2), bu sonucu deterministik hale getirmektedir.

5. Tartışma ve Sonuç

Bu çalışmada; hava kargo soğuk zincir ambalajlarının sürdürülebilirlik yetkinlikleri, ICAO'nun karbon azaltım vizyonu ve havayolu işletmelerinin teknik kısıtları (MTOW) perspektifinden ele alınarak derinlemesine incelenmiştir.

Entropi tabanlı analiz sonuçları, karar verme sürecinde **"Hacimsel Ağırlık"** ($w_3=0.416$) ve **"Karbon Emisyonu"** ($w_4=0.416$) kriterlerinin toplamda %83,2'lik bir ağırlığa sahip olduğunu ortaya koymuştur. Bu bulgu, havacılık lojistiğinde "maliyet" odaklı geleneksel yaklaşımın yerini, "ağırlık optimizasyonu" odaklı yeşil lojistik yaklaşımına bıraktığını matematiksel bağlamda kanıtlamaktadır. Pasif PCM (A_2) alternatifinin analiz sonucunda 0,985 gibi baskın bir skor elde etmesi; modelde toplamda %83,2 ağırlığa sahip olan 'Hacimsel Ağırlık' ve 'Emisyon' kriterlerindeki matematiksel üstünlüğünün olağan bir sonucudur. Analizler, 'ağırlık azaltma' yaklaşımının, havacılıkta çevresel performansı şekillendiren (International Civil Aviation Organization, 2025) en kritik etken olduğunu kanıtlar niteliktedir. Buradan hareketle çalışmanın çıktıları, hem ICAO'nun 'Vision 2050' vizyonu hem de CORSIA protokolleriyle tam bir paralellik göstermektedir. Havayolu işletmeleri için Pasif PCM sistemlerine geçiş, yalnızca operasyonel bir ambalaj tercihi değil; artan karbon vergisi yükümlülüklerini azaltacak stratejik bir 'Yeşil Mutabakat' hamlesi olarak değerlendirilmelidir.

5.1. Literatür ile Karşılaştırmalı Değerlendirme

Elde edilen bulgular, literatürde ambalaj seçimini öncelikle "birim maliyet" ekseninde ele alan (Hryhorak & Šimák, 2020) ve (Shashi, Centobelli, Cerchione, & Ertz, 2021) gibi çalışmaların aksine; modern havacılıkta belirleyici faktörün "yakıt verimliliği" ve "emisyon maliyetleri" olduğunu göstermektedir. Pasif PCM (A_2) sistemlerinin, aktif sistemlere (A_1) kıyasla operasyonel maliyetleri %70,8, karbon emisyonlarını ise %85,4 oranında azaltması; (Li, Lu, & Fu, 2015) tarafından öne sürülen "düşük ağırlıklı yeşil ambalaj" teorisini destekler niteliktedir. Öte yandan, Vakum Yalıtımlı Panellerin (A_3) ikinci sırada kalması, bu teknolojinin yüksek ısı koruma performansına rağmen, henüz maliyet-etkinlik açısından Pasif PCM ile rekabet edemediğini ortaya koymaktadır. Elde edilen bulgular, havacılık lojistiğinde sürdürülebilirlik kavramının yalnızca yakıt türü (SAF) veya uçak motor teknolojisi ile sınırlı olmadığını göstermektedir. Bu çalışma, ambalaj sistemleri gibi mikro düzeydeki operasyonel kararların dahi, toplam faydalı yük kapasitesini optimize ederek makro düzeyde karbon azaltımına doğrudan katkı sunduğunu kanıtlamaktadır. Bu yönüyle çalışma, (Li, Lu, & Fu, 2015) tarafından önerilen 'yeşil lojistik' çerçevesini havacılık sektörüne uyarlayarak genişletmektedir.

5.2. Sektörel ve Yönetimsel Çıkarımlar

Çalışmanın sonuçları, Turkish Cargo gibi küresel hava kargo taşıyıcıları ve lojistik yöneticileri için stratejik öngörüler sunmaktadır:

- **Stratejik Dönüşüm:** Yakıt fiyatlarının ve AB Yeşil Mutabakatı kapsamındaki karbon vergilerinin artışı göz önünde bulundurulduğunda; havayolu işletmeleri aktif konteyner stoklarını kademeli olarak azaltmalı ve "Hafifletilmiş Pasif Çözümlere" yatırım yapmalıdır.
- **Altyapı Modernizasyonu:** Pasif sistemlerin tek dezavantajı olan "ön koşullandırma" ihtiyacını yönetebilmek için, havalimanı kargo terminalindeki soğuk hava deposu kapasiteleri artırılmalıdır. Ayrıca, bu çalışmada elde edilen 'hafifletilmiş ambalaj' bulguları, sadece ticari havacılık için değil, gelecekte kısıtlı yük kapasitesine sahip ticari uzay taşımacılığı lojistiği için de bir referans noktası oluşturma potansiyeline sahiptir.

5.3. Kısıtlar ve Gelecek Çalışmalar

Bu çalışma, 5000 km'lik spesifik bir kıtalararası rota ve mevcut piyasa verileri ile sınırlandırılmıştır.

Gelecek çalışmalarda; modele gerçek zamanlı veri akışı sağlayan IoT (Nesnelerin İnterneti) sensör maliyetlerinin entegre edilmesi ve Drone taşımacılığı gibi yeni nesil teslimat modellerinin soğuk zincir üzerindeki etkilerinin incelenmesi önerilmektedir. Ayrıca, analizin farklı iklim kuşaklarını (tropikal vs. kutupsal rotalar) kapsayacak şekilde genişletilmesi, literatüre daha kapsamlı bir bakış açısı kazandıracaktır.

KAYNAKÇA

Bakır, M., & Akan, Ş. (2018). HAVAALANLARINDA HİZMET KALİTESİNİN ENTROPİ VE TOPSIS YÖNTEMLERİ İLE DEĞERLENDİRİLMESİ: AVRUPA'NIN EN YOĞUN HAVAALANLARI ÜZERİNE BİR UYGULAMA. Elektronik Sosyal Bilimler Dergisi.

Baxter, G. (2021). Decarbonizing International Air Cargo Transportation's Carbon Footprint: A Review of the World Air Cargo Carrying Airlines Current and Potential Environment Related Measures and Strategies. International Journal of Environment, Agriculture and Biotechnology.

Bekmezci, M., & TARHAN, D. B. (2023). SOĞUK ZİNCİR LOJİSTİĞİ ÜZERİNE BİR LİTERATÜR TARAMASI: TÜRKİYE ÖRNEĞİ. International Journal of Commerce, Industry and Entrepreneurship Studies.

Clarke, D. J. (1970). THE ECONOMIC FEASIBILITY OF AIR SHIPMENT OF PERISHABLE FRUITS AND VEGETABLES INTO CANADA. Kanada: University of Manitoba.

Debbage, K., & Debbage, N. (2021). Air Freight Logistics. Freight Transport and Logistics, s. 2.

Fahrni ML, I. I., A, A., NC, Y., KM, S., NF, M., N, N., & ZU, B. (2022). Management of COVID-19 vaccines cold chain logistics: a scoping review. J Pharm Policy Pract.

Hien, D. N., & Thanh, N. V. (2022). Optimization of Cold Chain Logistics with Fuzzy. Processes.

Hongsakul, B., & Chuaychoo, I. (2024). The Influence of Logistics Activity on Sustainable Performance of Air Cargo Business in Thailand. ABAC Journal .

Hryhorak, M., & Šimák, L. (2020). Using the Concept of Supply Chain Management in Aviation Logistics. Logistics and Transport.

Ilangovan, A., Hamdane, S., Silva, P. D., D, P., & Pires, L. (2022). Promising and Potential Applications of Phase Change Materials in the Cold Chain: A Systematic Review. Energies.

Envirotainer. (2024). Envirotainer Product Catalogue 2024: Active Temperature-Controlled Container Solutions. <https://www.envirotainer.com> adresinden alındı

International Civil Aviation Organization. (2025). ICAO Vision 2050: Long-Term Aspirational Goals for International Aviation Decarbonization. Montreal: ICAO. <https://www.icao.int> adresinden alındı

Va-Q-tec AG. (2024). Va-Q-tec Product Data Sheet 2024: Passive Temperature-Controlled Packaging Solutions. Würzburg: Va-Q-tec AG. <https://www.va-q-tec.com> adresinden alındı

International Air Transport Association. (2021). IATA Annual Review 2021.

International Air Transport Association. (2023). Annual Review 2023.

- Li, J., Lu, Q., & Fu, P. (2015). Carbon Footprint Management of Road Freight Transport under the Carbon Emission Trading Mechanism. *Mathematical Problems in Engineering*.
- Nguyen, N.-A.-T., Wang, C.-N., Dang, L.-T.-H., Dang, L.-T.-T., & Dang, T.-T. (2022). Selection of Cold Chain Logistics Service Providers Based on a Grey AHP and Grey COPRAS Framework: A Case Study in Vietnam. *Axioms*.
- Sandeep, M., Kumanan, S., & Vinodh, S. (2011). Supplier selection using combined AHP and GRA. *Int. J. Logistics Systems and Management*.
- Seprenyi, K., Tamas, P., & Cservenak, A. (2022). LOGISTICS AND COLD CHAIN RELATIONSHIP. *Advanced Logistic Systems*.
- Shashi, Centobelli, P., Cerchione, R., & Ertz, M. (2021). Food cold chain management: what we know and what we deserve. *Supply Chain Management: An International Journal*.
- Şen, G. (2021). Covid-19 Aşılarının Lojistiğinde Havaçılık Endüstrisinin Rolü. *Journal of Aviation*.
- Voort, F. v. (2016). Redesign the cool chain for air transport of perishable goods by. *Yüksek Lisans Tezi, Hollanda*.
- Whitmer, R. E. (1945). TODAY'S OUTLOOK FOR AIR TRANSPORTATION OF PERISHABLES. *Western Agricultural Economics Association*, s. 10.
- Z, W., H, L., R, R., C, B., EK, Z., J, A., & A, A.-B. (2019). Cold Chain Logistics Management of Medicine with an Integrated Multi-Criteria Decision-Making Method. *Int J Environ Res Public Health*.
- Zhu, T. (2023). Selection of Air Carrier for AD Company Vaccine Based on AHP. *Finlandiya: Haaga-Helia University of Applied Sciences*.