

Gıda Üretim Sistemlerinde Verimlilik Artırımı için Bulanık BWM Entegre Hat Dengeleme Optimizasyonu: Konserve Üretimi Uygulaması

Çağdaş Yıldız¹ , Adem Tüzemen² 

ÖZET

Amaç: Bu çalışmanın amacı, gıda üretim sistemlerinde verimliliği artırmak için Bulanık En İyi-En Kötü Yöntemi (BWM) ile hat dengeleme optimizasyonunu birleştirerek çok boyutlu performans iyileşmesi sağlayacak yenilikçi bir yöntem geliştirmektir. Dokuz farklı performans kriterini göz önünde bulundurarak, 15 görevin 5 istasyona en uygun şekilde dağıtılmasıyla üretim süreçlerinin verimliliğinin artırılması hedeflenmiştir.

Yöntem: Türkiye'deki orta ölçekli bir gıda üretim tesisinin konserve üretim hattından elde edilen gerçek verilere dayanarak hibrit bir metodoloji oluşturulmuştur. Bulanık BWM ile nesnel kriterlerin ağırlıklandırılması, ağırlıklı toplam puanla istasyon performansının değerlendirilmesi, çok amaçlı matematiksel optimizasyon modeli ve LINGO 18.0 yazılımı kullanılarak yapılan çözümlene gibi dört temel unsurdan oluşan sistematik bir yöntem benimsenmiştir.

Bulgular: Hibrit yaklaşım hat verimliliğini %72,4'ten %86,84'e yükselterek %14,44 verimlilik artışı sağlamıştır. Üretim darboğazı 49,6 saniyeden 41,5 saniyeye (%16,3) düşürülmüş, günlük üretim kapasitesi 113 birim (%19,4) artırılmıştır. Düzgünlük indeksinin 11,2'den 1,71'e iyileştirilmesi ile iş yükü dağılımında önemli denge sağlanmıştır. Geliştirilen hibrit metodoloji, gıda üretim sektöründe verimlilik odaklı çok kriterli optimizasyon uygulamalarına özgün katkı sağlamakta ve bulanık BWM'nin hat dengeleme problemlerine sistematik entegrasyonunun etkinliğini kanıtlamaktadır.

Özgünlük: Bu çalışma, bulanık BWM'nin hat dengeleme problemlerine sistematik entegrasyonunu gerçekleştirerek gıda üretim süreçlerinin çok boyutlu optimizasyonuna yönelik literatüre metodolojik yenilik katmaktadır.

Anahtar Kelimeler: Üretim Verimliliği, Hat Dengeleme, Bulanık BWM, Çok Kriterli Karar Verme, Çok Amaçlı Optimizasyon.

JEL Kodları: C44, C61, L23.

Fuzzy BWM Integrated Line Balancing Optimisation for Productivity Improvement in Food Production Systems: Application to Canned Food Production

ABSTRACT

Purpose: This study aims to develop an innovative methodology that provides multi-dimensional performance improvement through hybrid integration of Fuzzy Best-Worst Method (BWM) and assembly line balancing optimization to increase production efficiency in food production systems. The study targets efficiency-oriented optimization of production processes by achieving optimal distribution of 15 tasks to 5 stations considering nine different performance criteria.

Methodology: A hybrid methodology was developed using real data obtained from the canning production line of a medium-scale food production company operating in Turkey. A systematic approach consisting of four main components was adopted: objective criterion weighting with Fuzzy BWM, station performance evaluation with weighted sum score, multi-objective mathematical optimization model, and solution with LINGO 18.0 software.

Findings: The hybrid approach increased line efficiency from 72.4% to 86.84%, providing a 14.44% efficiency improvement. Production bottleneck was reduced from 49.6 seconds to 41.5 seconds (16.3%), and daily production capacity was increased by 113 units (19.4%). Significant balance in workload distribution was achieved by improving the smoothness index from 11.2 to 1.71.

Originality: This study contributes methodological innovation to the literature on multi-dimensional optimization of food production processes by realizing systematic integration of Fuzzy BWM into assembly line balancing problems and proves the effectiveness of hybrid methodologies in industrial efficiency enhancement.

Keywords: Assembly Line Balancing, Fuzzy BWM, Multi-Criteria Decision Making, Production Efficiency, Multi-Objective Optimization.

¹ Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi, İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi, İşletme Bölümü, Üretim Yönetimi ve Pazarlama Anabilim Dalı, Osmaniye, Türkiye

² Tokat Gaziosmanpaşa Üniversitesi, İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi, İşletme Bölümü, Tokat, Türkiye

Sorumlu Yazar-Corresponding Author: Çağdaş Yıldız, cagdasylidiz@osmaniye.edu.tr

DOI: 10.51551/verimlilik.1757188

Araştırma Makalesi / Research Article | Geliş / Submitted: 03.08.2025 | Kabul / Accepted: 23.01.2026

Atıf: Yıldız, Ç. ve Tüzemen, A. (2026). "Gıda Üretim Sistemlerinde Verimlilik Artırımı için Bulanık BWM Entegre Hat Dengeleme Optimizasyonu: Konserve Üretimi Uygulaması", *Verimlilik Dergisi*, 60(2), 491-514.

JEL Codes: C44, C61, L23.

EXTENDED ABSTRACT

Efficiency in manufacturing has emerged as the key strategic requirement for competitive advantage in the modern manufacturing environment; assembly line balancing represents one of the more complicated optimization problems in manufacturing. While there are commonalities with assembly lines in other industries, the food industry imposes more strict quality expectations, mandatory safety requirements, and multi-staged processing routines or operations. The canned products or canned foods in Turkey are no exception to this rule, as canning production lines struggle with optimal task-task assignment based on a high efficiency percentage - all icing required tasks/stations on the assembly line must be completed within any given time-period. Therefore, the relative complexity of canned food assembly line balancing is vital in ensuring efficiency in production. Furthermore, assembly line balancing typically uses single-objective orientations, however, these representations can quickly become multi-objective as some decision-makers start to experience "complexity overload." Multi-criteria decision making (MCDM) can therefore help by driving productivity for companies in several ways, by creating a more analytical and systematic process. In this regard, hybrid methodologies and MCDM techniques creating a synergy between Fuzzy Best-Worst Method (BWM) with mathematical optimization for canning production lines and for the purposes of using a unique example of the systematic integration of Fuzzy BWM with assembly line balancing optimization to fill a currently gap in the literature.

The primary purpose of this research is to establish a new collective method that provides a multi-dimensional improvement path by using hybrid Fuzzy BWM and assembly line balancing optimization in a way that enhances productivity in food production systems. This research focuses on optimally distributing 15 tasks to 5 stations involving nine different measures of performance, considering a suitable hybrid approach. Specific objectives are: to assess theoretically the assembly line balancing literature, with attention to its contemporary developments, to show how Fuzzy BWM techniques are useful for the problem presented, and to make public knowledge of the practical issues by having a systematic method of possible solutions. The research considers optimizing canning production lines by weighting criteria with Fuzzy BWM and assessing them through multi-objective mathematical optimization that can be seen as one of the first systematic applications in this area of food production.

The study data are based on real data obtained from a medium-sized food production company operating in Turkey. Primary data were collected during time studies with experts, from a canning production line, over a six-month observation period. The secondary data were obtained by reviewing national and international data using articles and publications, sector reports, and theses, and related sources. The company produces vegetable and fruit cans, with a typical daily capacity of 2500 - 3000 units, which is representative of what one will find with medium-sized food manufacturing operations.

For the purposes of the study, nine criteria were weighted through the Fuzzy BWM analysis: cycle time, labor requirement, machine utilization rate, quality risk factor, level of flexibility, safety risk, level of energy consumption, level of maintenance required, operator skills level. Based on their expert evaluations, the cycle time criterion was determined as the most important criterion and flexibility was determined to be the least important. In the next stage, eight station alternatives are evaluated based on expert evaluations and performance data. The alternative station's performance score is calculated using the weighted sum approach, and the highest five stations are sampled to be optimized. The results obtained through the hybrid methodology show that apart from the current state situation, the optimal task-station assignment had a significant impact on the performance of the system.

Through the study, the hybrid one was shown to have better performance than classic assembly line balancing methods. The quantitative results shown that the efficiency of the line changed from 72.4% to 86.84%, with a 14.44% increase in efficiency. The production bottleneck improved from 49.6 seconds to 41.5 seconds (16.3%), while the daily production capacity increased by 113 units (19.4%). The smoothness index improved from 11.2 to 1.71, representing a well-balanced workload. The results of the sensitivity analysis proved that the model is robust under different operating regimes.

It is thought that the results of this study can positively contribute to the food production companies, manufacturing companies, industrial engineers looking to optimize production, and the academic researchers coming from the sector's different domains. It is held that the hybrid methodology produced in the study can be used in more similarly structured production systems and that the Fuzzy BWM and mathematical optimization integration will contribute to the literature in terms of innovation, methodology, and practicality.

1. GİRİŞ

Küresel rekabet ortamında işletmelerin sürdürülebilir büyüme hedeflerine ulaşabilmesi, üretim süreçlerinin çok boyutlu optimizasyonuna bağlıdır. Modern üretim sistemlerinde operasyonel mükemmelliğin sağlanması, geleneksel tek amaçlı yaklaşımların sınırlılıklarını aşan hibrit metodolojileri gerektirmekte ve çok kriterli performans değerlendirmesinin önemini artırmaktadır (Boysen ve diğerleri, 2022; Abdullah ve diğerleri, 2023). Bu paradigma değişimi, özellikle hat dengeleme problemlerinde yenilikçi çözüm yaklaşımlarına duyulan ihtiyacı ortaya koymaktadır.

Hat dengeleme problemi, Salveson (1955) tarafından sistematik olarak tanımlandığından bu yana Ford Motor Company 1940'lı yıllardaki üretim hattı uygulamalarından günümüzün Endüstri 5.0 paradigmasına kadar sürekli evrim geçirmiştir (Hoffmann, 1963; Hassoun ve diğerleri, 2024). Günümüz üretim ortamında bu problemler, kalite yönetimi, güvenlik riskleri, enerji verimliliği, çevresel sürdürülebilirlik ve insan faktörleri gibi çoklu performans kriterlerini eşzamanlı değerlendirmeyi gerektirmektedir (Zacharia ve diğerleri, 2024; Ramli ve Ab. Rashid, 2024). Geleneksel çevrim süresi minimizasyonu veya istasyon sayısı optimizasyonu odaklı yaklaşımlar, modern üretim sistemlerinin karmaşıklığını ele almada yetersiz kalmakta ve hibrit metodolojilere duyulan ihtiyacı artırmaktadır (Battaia ve Dolgui, 2022).

Çok kriterli karar verme literatüründe BWM (Best Worst Method – En İyi En Kötü Yöntemi) Rezaei (2015) tarafından geliştirilen ve sadece $(2n - 3)$ ikili karşılaştırma verisi kullanarak yüksek tutarlılık oranı sağlayan nesnel ağırlıklandırma tekniğidir. BWM'nin bulanık küme teorisi ile entegrasyonu, belirsizlik ortamında kriter ağırlıklarının nesnel belirlenmesinde önemli avantajlar sunmakta ve çok boyutlu değerlendirme problemlerinde güvenilir sonuçlar üretmektedir (Haseli ve diğerleri, 2024; Bouraima ve diğerleri, 2023). Yöntemin çeşitli sektörlerde başarılı uygulamaları, hat dengeleme problemlerine adaptasyon potansiyelini göstermektedir (Ahmadi ve diğerleri, 2017; Gupta ve diğerleri, 2017).

Gıda üretim sektörü, kalite ve güvenlik gereksinimlerinin kritik olması, çevresel sürdürülebilirlik baskılarının yoğun yaşanması ve Gıda Endüstri 4.0'dan Gıda Endüstri 5.0'a geçiş sürecinin gerektirdiği dijital dönüşüm nedeniyle hat dengeleme problemlerinin en karmaşık uygulandığı alanlardan biridir (Wu ve diğerleri, 2022; Agrawal ve diğerleri, 2025). Konserve üretim hatları, uzun raf ömrü gereksinimleri, titiz hijyen standartları ve çok aşamalı işleme süreçleri nedeniyle özellikle zorlu optimizasyon problemleri oluşturmaktadır (Abakarov ve diğerleri, 2009; Arteaga-Cabrera ve diğerleri, 2025). Yapay zekâ, büyük veri analizi ve insan-merkezli üretim paradigmalarının entegrasyonu, hibrit optimizasyon yaklaşımlarının gerekliliğini vurgulamaktadır (Van Erp ve diğerleri, 2024).

Mevcut literatür analizi, bulanık BWM yönteminin hat dengeleme problemlerine sistematik entegrasyonunun sınırlı düzeyde ele alındığını göstermektedir. Gıda üretim hatlarında çok kriterli karar verme ile matematiksel optimizasyonun hibrit birleşimi konusunda önemli bir araştırma boşluğu bulunmakta, özellikle nesnel kriter ağırlıklandırma ile çok amaçlı optimizasyonun entegre uygulanması yeterince araştırılmamaktadır (Perrignon ve diğerleri, 2024). Bu durum, konserve üretimi gibi özel süreç gereksinimlerine sahip alanlarda yenilikçi metodolojik yaklaşımlara duyulan ihtiyacı ortaya koymaktadır.

Bu çalışmanın temel amacı, konserve üretim hattında bulanık BWM ile hat dengeleme optimizasyonunun hibrit entegrasyonu yoluyla çok boyutlu performans iyileştirmesi sağlayan yenilikçi bir metodoloji geliştirmektir. Araştırma kapsamında dokuz farklı performans kriteri (çevrim süresi, işgücü gereksinimi, makine kullanım oranı, kalite risk faktörü, esneklik düzeyi, güvenlik riski, enerji tüketimi, bakım gerekliliği ve operatör beceri seviyesi) dikkate alınarak 15 görevin 5 istasyona optimal dağılımı hedeflenmektedir. Metodoloji dört ana bileşenin sistematik entegrasyonuna dayanmaktadır: bulanık BWM ile nesnel kriter ağırlıklandırma, ağırlıklı toplam skoru ile istasyon performans değerlendirmesi, çok amaçlı matematiksel optimizasyon modelinin kurulması ve LINGO 18.0 yazılımı ile optimal çözümün elde edilmesi.

Araştırmanın özgün katkıları hem teorik hem de pratik boyutlarda değerlendirilmektedir. Teorik açıdan, bulanık BWM'nin hat dengeleme problemlerine sistematik adaptasyonu ve çok amaçlı optimizasyon ile entegrasyonu literatüre metodolojik yenilik katmaktadır. Pratik açıdan, geliştirilen hibrit yaklaşım gıda üretim sektöründe operasyonel verimlilik artırımı, kalite iyileştirmesi ve kaynak optimizasyonu sağlayarak işletmelerin rekabet gücünü artıracak somut çözümler sunmaktadır (Pant ve diğerleri, 2025). Metodolojinin diğer gıda üretim süreçlerine ve benzer yapıdaki üretim hatlarına uyarlanabilir niteliği, endüstriyel uygulanabilirlik potansiyelini güçlendirmektedir.

Çalışmada Türkiye'de faaliyet gösteren orta ölçekli bir gıda üretim işletmesinin konserve üretim hattından elde edilen gerçek veriler kullanılmış, nicel analiz paradigması benimsenmiştir. Hibrit yaklaşımın etkinliği kapsamlı performans metrikleri ile değerlendirilmiş, duyarlılık analizi ile modelin robustluğu test edilmiştir. Araştırma bulgularının mevcut durumla karşılaştırmalı analizi, önerilen metodolojinin üstünlüğünü ortaya koymaktadır.

Bu makale beş bölümden oluşmaktadır. İkinci bölümde hat dengeleme yaklaşımları, BWM uygulamaları ve gıda üretimi optimizasyon stratejilerini kapsayan literatür taraması sunulmakta, üçüncü bölümde hibrit metodolojinin teorik çerçevesi ve matematiksel formülasyonu detaylandırılmaktadır. Dördüncü bölümde uygulama sonuçları ve karşılaştırmalı performans analizi verilmekte, beşinci bölümde sonuçlar değerlendirilerek gelecek araştırma önerileri sunulmaktadır.

2. LİTERATÜR TARAMASI

2.1. Hat Dengeleme Yaklaşımları ve Metodolojileri

Hat dengeleme problemlerinin sistematik incelenmesi Salvesson (1955) tarafından başlatılmıştır. Görevlerin istasyonlara atanması problemini matematiksel model olarak formüle eden bu çalışma, hat dengeleme literatürünün temelini oluşturmuştur. Hoffman (1963) öncelik matris yaklaşımını geliştirerek görev öncelik ilişkilerinin matematiksel modellenmesini sağlamış, hat dengeleme problemlerinde öncelik kısıtlarının önemini vurgulamıştır.

Andres ve diğerleri (2008) ve Boysen ve diğerleri (2008) sırasıyla sekans bağımlı kurulum süreleri ve model seçimi konularında önemli katkılar sağlamıştır. Kurulum sürelerinin göz ardı edilmesinin performans kayıplarına neden olduğunu gösteren bu çalışmalar, farklı üretim ortamları için uygun hat dengeleme modellerinin seçiminde rehberlik etmiştir. Battaia ve Dolgui (2013) hat dengeleme problemlerinin entegrasyonu konusunda kapsamlı inceleme yaparak çok boyutlu performans kriterlerinin eşzamanlı optimizasyonunda hibrit metodolojilerin üstünlüğünü ortaya koymuştur. Rabbani ve diğerleri (2016) insan kaynaklı faktörler, eğitim ve öğrenme etkilerini dikkate alan karışık model U-şeklinde montaj hattı dengeleme problemi için çok amaçlı genetik algoritma geliştirmiştir. İnsan faktörlerinin hat dengeleme performansına etkisini sistematik olarak analiz etmişlerdir. Çalışmaları ergonomik faktörlerin üretim optimizasyonundaki kritik rolünü vurgulamıştır.

Bortolini ve diğerleri (2017) bileşen toplama ve ergonomik riski dikkate alan çok amaçlı montaj hattı dengeleme problemini ele almıştır. İnsan faktörleri ile operasyonel verimlilik arasındaki dengeyi optimize etmeye odaklanmışlardır. Çalışmaları ergonomik faktörlerin montaj hattı tasarımındaki kritik rolünü vurgulamıştır. Abdous ve diğerleri (2018) işçi yorgunluğu faktörünü dikkate alan montaj hatlarının çok amaçlı optimizasyonunu gerçekleştirmiştir. İnsan faktörlerinin üretim sistemlerine etkisini sistematik olarak modellemiş ve analiz etmişlerdir. Çalışmaları ergonomik risklerin hat dengeleme süreçlerinde değerlendirilmesinin önemini ortaya koymuştur.

İnsan faktörlerinin hat dengeleme süreçlerine entegrasyonu Khan ve diğerleri (2022) yeniden yapılandırılabilir üretim sistemlerinde SLBP-2E tipi hat dengeleme modelini geliştirerek toplam süre, hat verimliliği ve müşteri memnuniyeti indekslerini eşzamanlı optimize etmiştir.

Güncel gelişmeler incelendiğinde, hat dengeleme alanında önemli dönüşümler yaşandığı görülmektedir. Boysen ve diğerleri (2022) son yıllardaki gelişmeleri inceleyerek Endüstri 4.0 teknolojilerinin entegrasyonu ve sürdürülebilirlik vurgusunun hat dengeleme problemlerini dönüştürdüğünü belirtmiştir. Battaia ve Dolgui (2022) entegrasyon yaklaşımlarının güncel durumunu analiz ederek çok boyutlu performans kriterlerinin eşzamanlı optimizasyonunda hibrit metodolojilerin teorik ve pratik üstünlüğünü kanıtlamıştır.

2023-2025 döneminde belirsizlik modelleme ve insan-robot iş birliği konularında yoğun araştırmalar yapılmıştır. Sotskov (2023) belirsiz veriler ile montaj ve üretim hattı tasarımı, dengeleme ve çizelgeleme problemlerini kapsamlı olarak incelemiştir. Veri belirsizliklerinin üretim sistemlerine etkilerini sistematik perspektifle değerlendirmiştir. Çalışması gerçek dünya uygulamalarında karşılaşılan belirsizliklerin matematiksel modellenmesi için yol gösterici niteliktedir. Mumcu (2024) aydınlatma endüstrisinde hat dengeleme problemleri için sezgisel ve yapay sinir ağları yöntemlerini kullanan çözüm yaklaşımı geliştirmiştir. Gerçek sanayi verileri ile hibrit metodolojinin etkinliğini test etmiştir. Çalışması geleneksel sezgisel yöntemlerle modern yapay zekâ tekniklerinin entegrasyonunun başarısını kanıtlamıştır. Mao ve diğerleri (2024) çok tipli işbirlikçi robotlar içeren montaj hattı dengeleme problemini ele alarak hibrit insan-robot üretim sistemlerinde karmaşık etkileşimlerin optimizasyonunu gerçekleştirmiştir.

Zacharia ve diğerleri (2024), Michels ve Costa (2024) ile Zhang ve diğerleri (2024) insan-robot iş birliği ve işgücü heterojenliği konularında önemli katkılar sağlamıştır. Bu çalışmalar bulanık matematik modelleme, çok işçili istasyonlar ve belirsizlik altında optimizasyon tekniklerini kullanarak Endüstri 5.0 bağlamında insan-merkezli üretim sistemlerinin geliştirilmesine odaklanmıştır. Lind ve diğerleri (2024) doğa esinlenmeli algoritmalar ve dijital insan modelleme araçları kullanarak montaj düzeni çok amaçlı optimizasyonu gerçekleştirmiş, işçi refahı ve sistem performansı arasındaki dengeyi NSGA-II ve PSO algoritmaları ile optimize etmiştir. Naresh ve diğerleri (2025) robotik montaj hatlarının maliyet-etkin tasarımı ve optimizasyonu için NSGA-II çerçevesi geliştirmiştir. Çevrim süresi minimizasyonu ve toplam montaj maliyeti minimizasyonunu eşzamanlı olarak ele almışlardır. Çalışmaları robotik montaj sistemlerinde çok amaçlı optimizasyonun pratik değerini kanıtlamıştır.

2.2. Çok Kriterli Karar Verme ve BWM Uygulamaları

Çok kriterli karar verme literatürünün gelişiminde Saaty (1980) tarafından geliştirilen AHP yöntemi önemli rol oynamıştır. İkili karşılaştırma matrislerini kullanarak kriter ağırlıklarının belirlenmesini sağlayan bu yöntem, geniş uygulama alanı bulmuştur. Rezaei (2015) tarafından geliştirilen BWM yöntemi, sadece $2n - 3$ ikili karşılaştırma verisi kullanarak AHP tekniğine göre daha tutarlı sonuçlar elde etmiştir. BWM'nin daha az veri gereksinimi ve yüksek tutarlılık oranı sağlaması önemli avantajlar sunmuştur.

Rezaei (2016) BWM'nin doğrusal modelini ve aralık analiz yaklaşımını geliştirerek çoklu optimal çözüm problemini ele almış, benzersiz çözüm üreten doğrusal model önermiştir. Bu gelişme BWM'nin teorik temellerini güçlendirmiş ve pratik uygulanabilirliğini artırmıştır. Ahmadi ve diğerleri (2017), Ren ve diğerleri (2017) ve Torabi ve diğerleri (2016) BWM yöntemini sırasıyla tedarik zincirleri sosyal sürdürülebilirlik değerlendirmesi, kentsel kanalizasyon çamuru teknolojileri sürdürülebilirlik analizi ve iş sürekliliği yönetim sistemleri risk değerlendirmesinde başarıyla uygulamışlardır.

Gupta ve diğerleri (2017) binalarda enerji verimliliği engellerini aşmak için BWM tabanlı yol haritası geliştirirken, Salimi ve Rezaei (2018) firmaların araştırma-geliştirme performansının değerlendirmesinde BWM kullanmıştır. Bu çalışmalar BWM'nin farklı uygulama alanlarındaki etkinliğini göstermiş, yöntemin çok boyutlu değerlendirme problemlerindeki başarısını ortaya koymuştur.

Türkiye'de BWM uygulamaları da çeşitli sektörlerde başarıyla gerçekleştirilmiştir. Özdağoğlu ve diğerleri (2020), havayolu firmalarının performans değerlendirmesinde BWM ile MAIRCA ve MABAC yöntemlerinin hibrit kullanımını gerçekleştirmiş, BWM'nin kriter ağırlıklandırmadaki güvenilirliğini farklı ÇKKV yöntemleri ile entegrasyonda göstermiştir. Bu çalışma, BWM'nin sektörel uygulamadaki çok yönlülüğünü kanıtlamaktadır. Bilgiç ve diğerleri (2021), sürdürülebilir enerji yönetimi için BWM yöntemi ile yenilenebilir enerji kaynaklarının değerlendirmesini yaparak güneş enerjisinin en uygun alternatif olduğunu tespit etmiştir. Çalışma, BWM'nin enerji sektöründeki karar verme problemlerinde güvenilir ve hızlı sonuç verdiğini açıklamıştır. BWM'nin Türkiye'deki uygulama alanları çeşitlenmektedir.

Son yıllarda BWM'nin çeşitli uzantıları geliştirilmiştir. Hasan ve diğerleri (2022) çok seçenekli BWM (MCBWM) yöntemini geliştirerek uzman görüşlerindeki belirsizlikleri ele almış, çok seçenekli karşılaştırma parametreleri kullanarak BWM'nin belirsizlik ortamındaki uygulanabilirliğini genişletmiştir. Kumar ve Ratandhara (2024) BWM için basitleştirilmiş ve geliştirilmiş yaklaşım geliştirerek çoklu optimal çözüm problemini ele almış, benzersiz ağırlık seti üreten yöntem önermiştir.

Bulanık küme teorisi ile BWM entegrasyonu konusunda önemli gelişmeler yaşanmıştır. Haseli ve diğerleri (2024) sferik bulanık kümeler tabanlı BWM uzantısını geliştirerek belirsizlik ve muğlaklık problemlerini ele almıştır. Bouraima ve diğerleri (2023) sürdürülebilir bölgesel ulaştırma altyapısı için hibrit küresel bulanık grup karar verme yaklaşımı geliştirmiş, BWM'yi sferik bulanık kümelerle entegre ederek karmaşık karar problemlerinin çözümünü gerçekleştirmiştir. Bonab ve diğerleri (2023) lojistik otonom araçların değerlendirmesinde sferik bulanık küme entegre Choquet Integral yaklaşımı geliştirerek BWM'nin gelişmiş bulanık kümelerle entegrasyonunda yenilikçi yaklaşım sergilemiştir.

Abdullah ve diğerleri (2023) Endüstri 4.0 teknolojilerinin üretim stratejileri üzerindeki etkisini değerlendirmek için hibrit bulanık çok kriterli karar verme modeli geliştirmiş, BWM ve bulanık TOPSIS entegrasyonu ile teknoloji seçimi problemini çözmüştür. Debroy ve diğerleri (2024) üçgensel bulanık BWM-nötrosofik-TOPSIS stratejisini geliştirmiştir. Su kalitesi parametrelerinin değerlendirmesinde tek değerli nötrosofik küme ortamında etkili çözümler üretmişlerdir. Çalışmaları BWM'nin gelişmiş bulanık küme teorileriyle entegrasyonunun potansiyelini ortaya koymuştur. Pant ve diğerleri (2025) Endüstri 5.0 teknolojilerinin çevik üretim sürdürülebilirliğini artırmadaki rolünü sistematik olarak incelemiş, gelişen teknolojilerin üretim sistemlerine entegrasyonunu çok boyutlu analiz etmiştir.

2.3. Gıda Üretimi ve Hibrit Optimizasyon Yaklaşımları

Gıda üretim sistemlerinde optimizasyon yaklaşımları son yıllarda önemli gelişim göstermiştir. Abakarov ve diğerleri (2009), paketlenmiş gıdaların termal sterilizasyonu için çok amaçlı optimizasyon tekniği geliştirmiştir. Adaptif rastgele arama algoritması ile toplama fonksiyonlarının optimizasyonuna dayanan yaklaşım kullanmışlardır. Çalışmaları, gıda mühendisliği alanında ortaya çıkan çok amaçlı optimizasyon problemlerinin etkili şekilde çözülebileceğini kanıtlamıştır. Wu ve diğerleri (2022), tek amaçlı ve çok amaçlı optimizasyon arasındaki farkları inceleyerek gerçek optimizasyon problemlerinin çoğunluğunun birden fazla amacı olduğunu belirtmiş, gıda endüstrisinde çok amaçlı yaklaşımların gerekliliğini ortaya koymuştur. Abdullah ve diğerleri (2023), Endüstri 4.0 teknolojilerinin üretim stratejileri üzerindeki etkisini değerlendirmek için hibrit bulanık çok kriterli karar verme modeli geliştirmiştir.

Hassoun ve diğerleri (2024), Gıda Endüstri 4.0'dan Gıda Endüstri 5.0'a geçişte teknolojik faktörleri incelemiş, yapay zekâ, büyük veri, blokzinciri ve dijital ikizler gibi gelişmiş teknolojilerin gıda sektörüne

entegrasyonunu analiz etmiştir. Çalışma, Endüstri 5.0'ın insan merkezli ve sürdürülebilir yaklaşımının gıda üretimindeki önemini vurgulamıştır. Agrawal ve diğerleri (2025), gıda üretiminde yapay zekâ güdümlü dönüşümü inceleyerek yapay zekanın üretim optimizasyonu, atık azaltma ve sürdürülebilirliği artırmadaki rolünü analiz etmiş, öngörü analizi, gerçek zamanlı izleme ve bilgisayarlı görü teknolojilerinin gıda üretimindeki potansiyelini göstermiştir.

Güncel gelişmeler, gıda endüstrisinde performans optimizasyonu konusunda önemli ilerlemeler kaydetmiştir. Perrignon ve diğerleri (2024), gıda endüstrisinde performans optimizasyonunu yönlendirmek için çok amaçlı veri güdümlü yaklaşım geliştirmiş, ekonomik, kalite ve çevresel göstergelerin eşzamanlı değerlendirilmesi için ileri düzey optimizasyon teknikleri önermiştir.

Nath ve diğerleri (2024), sürdürülebilir gıda sistemleri geleceğine yönelik yapay zekâ alanındaki gelişmeleri inceleyerek yapay zekâ teknolojilerinin tarım-gıda endüstrisinde uygulanmasının çevresel etkilerini ve sürdürülebilirlik boyutlarını analiz etmiştir. Anandharamakrishnan ve Moses (2024), gıda endüstrisi için gelişmekte olan teknolojileri kapsamlı olarak inceleyerek bilgi ve iletişim teknolojileri uygulamaları ve gıda işlemede gelecek eğilimlerini analiz etmiş, teknolojik yeniliklerin sektörel etkilerini değerlendirmiştir. Van Erp ve diğerleri (2024), Endüstri 5.0 için yeni strateji çerçevesi geliştirerek sürdürülebilirlik yönetimi ve ötesinde insan merkezli üretim paradigmasının gıda sektöründe uygulanması için metodolojik yaklaşımlar önermiştir.

Türkiye'de üretim sistemleri optimizasyonu alanında yapılan çalışmalar da hibrit yaklaşımların önemini desteklemektedir. Sağbaş ve diğerleri (2018), yalın üretime geçiş sürecinde seri üretim hattında üretim sistemi optimizasyonu gerçekleştirerek iş etüdü, kapasite planlama, değer akış haritalama ve toplam ekipman etkinliği gibi çoklu verimlilik artırma tekniklerinin entegre uygulanmasının başarısını göstermiştir. Bu çalışma, hibrit optimizasyon metodolojilerinin Türkiye'deki endüstriyel uygulanabilirliğini ortaya koymaktadır.

Hibrit optimizasyon yaklaşımları, gıda üretim sistemlerinde artan önem kazanmıştır. Ramli ve Ab. Rashid (2024), yarı otomatik operasyonlarda enerji tüketimi optimizasyonu ile hat dengeleme problemini ele alarak çevresel sürdürülebilirlik kriterlerini hat dengeleme problemine entegre etmiştir. Arteaga-Cabrera ve diğerleri (2025), gıda endüstrisinde optimizasyon stratejilerini geleneksel yaklaşımlardan çok amaçlı ve teknoloji entegre çözümlere doğru ilerletmiştir. Yanıt yüzey metodolojisi ile evrimsel algoritmaların entegrasyonunu kapsamlı olarak analiz etmişlerdir. Çalışmaları, gıda üretiminde dijital dönüşüm ve ileri optimizasyon tekniklerinin gerekliliğini vurgulamıştır. Cavalcanti ve diğerleri (2024), üretim sistemi verimliliği optimizasyonu için hibrit yapay zekâ çözümü uygulamıştır. Çok disiplinli yaklaşım kullanarak üretim performansını artırmaya odaklanmışlardır. Çalışmaları, hibrit optimizasyon tekniklerinin endüstriyel uygulamalardaki etkinliğini göstermiştir.

2.4. Literatür Değerlendirmesi ve Araştırma Boşlukları

Kapsamlı literatür taraması sonucunda hat dengeleme ve çok kriterli karar verme alanlarında önemli gelişmelerin yaşandığı görülmektedir. BWM yönteminin 2015'ten itibaren yaygınlaşması ve çeşitli bulanık uzantılarının geliştirilmesi, çok kriterli karar verme literatürüne önemli katkılar sağlamıştır. Hat dengeleme alanında Endüstri 4.0 ve 5.0 teknolojilerinin entegrasyonu, insan-robot iş birliği modelleri ve sürdürülebilirlik kriterlerinin dikkate alınması gibi güncel gelişmeler dikkat çekmektedir.

Bununla birlikte, literatür analizinde önemli araştırma boşlukları tespit edilmiştir. Bulanık BWM yönteminin hat dengeleme problemlerine sistematik entegrasyonu sınırlı düzeyde ele alınmış, mevcut çalışmalar genellikle geleneksel çok kriterli karar verme yöntemlerini kullanmıştır. Gıda üretim hatlarında çok kriterli karar verme ile matematiksel optimizasyonun hibrit birleşimi konusunda önemli boşluk bulunmakta, özellikle nesnel kriter ağırlıklandırma ile çok amaçlı optimizasyonun entegre uygulanması yeterince araştırılmamıştır.

Hat dengeleme problemlerinde kriter ağırlıklarının belirlenmesinde nesnel yaklaşımların kullanımı sınırlı kalmış, çoğu çalışma öznel değerlendirmelere dayanan ağırlıklandırma yöntemlerini tercih etmiştir. Geleneksel hat dengeleme çalışmaları genellikle çevrim süresi minimizasyonu gibi tek boyutlu hedeflere odaklanmış, kalite, güvenlik ve enerji verimliliği gibi çoklu performans kriterlerinin eşzamanlı optimizasyonu yeterince araştırılmamıştır.

Gıda üretim sektöründe konserve üretim hatlarında özel süreç gereksinimlerinin modellenmesi, gıda güvenliği kriterlerinin hat dengeleme süreçlerine entegrasyonu, kalite kontrol süreçlerinin çok kriterli optimizasyonda değerlendirilmesi ve enerji verimliliği faktörlerinin dengeleme süreçlerinde dikkate alınması konularında uygulama eksiklikleri bulunmaktadır. Bu araştırma boşlukları ve metodolojik ihtiyaçlar, hibrit BWM-hat dengeleme yaklaşımının geliştirilmesi gerekliliğini ortaya koymakta ve mevcut çalışmanın özgün katkılarının temelini oluşturmaktadır.

3. METODOLOJİ

3.1. Araştırma Tasarımı

Bu çalışmada, konserve üretim hattında hat dengeleme probleminin çözümü için hibrit Bulanık En İyi-En Kötü Yöntemi (BWM) ve matematiksel optimizasyon yaklaşımı geliştirilmiştir. Araştırma tasarımı, nicel analiz paradigması çerçevesinde gerçek fabrika verilerini kullanan deneysel bir yaklaşım benimser.

Günümüz rekabetçi üretim ortamında, hat dengeleme işletmelerin operasyonel verimliliğini sağlamak için kritik öneme sahiptir. Geleneksel hat dengeleme yaklaşımları genellikle tek boyutlu çevrim süresi enküçüklenmesine odaklanmakta ve çoklu performans kriterlerinin eşzamanlı optimizasyonunu göz ardı etmektedir (Derya ve diğerleri, 2025; Atasagun ve diğerleri, 2024). Bu sınırlılık, özellikle gıda üretimi gibi karmaşık süreçlerde önemli verimlilik kayıplarına neden olmaktadır (Agrawal ve diğerleri, 2025).

Modern üretim sistemlerinde hat dengeleme, belirsizlik altında çok kriterli performans değerlendirmesi, kalite yönetimi, güvenlik riskleri ve enerji verimliliği gibi karmaşık faktörleri içermektedir (Zacharia ve diğerleri, 2024). Son dönem literatürde, bulanık matematik modelleme yaklaşımları ile belirsizlik ortamında hat dengeleme problemlerinin çözülmesine yönelik artan ilgi görülmektedir (Liu ve diğerleri, 2024; Zhang ve diğerleri, 2024). Çok kriterli karar verme yöntemlerinin hat dengeleme problemlerine entegrasyonu, bu problemin çok boyutlu yapısını ele almak için kritik önem taşımaktadır (Pant ve diğerleri, 2025).

3.1.1. Metodolojik Yaklaşımın Gerektirilmesi

Kriter ağırlıklarının belirlenmesinde nesnel yaklaşımın benimsenmesi, karar vericilerin öznel önyargılarının enküçüklenmesi açısından büyük önem taşımaktadır (Bouraima ve diğerleri, 2023). Bulanık BWM, Rezaei (2015) tarafından geliştirilen ve son yıllarda çok kriterli karar verme literatüründe geniş uygulama alanı bulan nesnel ağırlıklandırma tekniğidir (Hasan ve diğerleri, 2022; Haseli ve diğerleri, 2024). Bu yöntem, ikili karşılaştırmaları ve bulanık mantığı birleştirerek kriterlerin gerçek önem derecelerini matematiksel olarak belirleme kapasitesi sunmaktadır.

Bulanık BWM seçilmesinin temel nedenleri şunlardır: (1) öznel değerlendirmelerin enküçüklenmesi, (2) tutarlılık oranının matematiksel olarak hesaplanması, (3) çok kriterli problemlerde güvenilir performans göstermesi ve (4) hat dengeleme sistemlerinde uygulanabilirliği (Naz ve diğerleri, 2018; Behzad ve diğerleri, 2020). Çalışmada kullanılan temel BWM formülasyonu Rezaei (2015) ve Rezaei (2016)'dan alınmıştır. Bulanık karşılaştırma matrislerinin oluşturulmasında, endüstri mühendisliği alanında uzman 3 akademisyen ve konserve üretimi alanında 15+ yıl deneyime sahip 2 firma uzmanından oluşan 5 kişilik uzman panel oluşturulmuştur. Uzman değerlendirmeleri grup karar verme yaklaşımı ile birleştirilerek tutarlı bulanık karşılaştırma matrisleri elde edilmiştir.

Özellikle Bulanık BWM, uzman görüşlerine dayalı başlangıç ağırlıklarına veya öznel değerlendirme tekniklerine ihtiyaç duymadan, sadece ikili karşılaştırma matrislerinden nesnel kriter ağırlıklarını türetebilme kapasitesi ile öne çıkmaktadır (Gupta ve diğerleri, 2017; Salimi ve Rezaei, 2018). Bu özellik, konserve üretim süreçlerinde operasyonel verilerin doğrudan kullanılabilmesini sağlayarak, karar verme sürecindeki öznel önyargıları yok etmektedir.

Ağırlıklı Toplam Skoru yöntemi, elde edilen Bulanık BWM ağırlıkları ile istasyon performans değerlendirmesi için kullanılan hibrit tekniğidir. Geleneksel yöntemlerin aksine, bu yaklaşım hem fayda hem de maliyet kriterlerini eşzamanlı değerlendirerek çok boyutlu performans analizi gerçekleştirmektedir. Bu özellik, istasyon seçimi kararlarının kritik doğası göz önünde bulundurulduğunda, risk enküçüklenmesi açısından önemli avantaj sağlamaktadır.

Son yıllarda Bulanık BWM, tedarikçi seçimi, proje değerlendirmesi ve üretim sistem optimizasyonu gibi farklı alanlarda başarıyla uygulanmıştır (Ahmadi ve diğerleri, 2017; Ren ve diğerleri, 2017; Torabi ve diğerleri, 2016). Ancak gıda üretim sektöründe, özellikle konserve üretiminde hibrit çok kriterli karar verme yaklaşımlarının hat dengeleme problemlerine entegrasyonu literatürde önemli bir boşluk oluşturmaktadır. Bu çalışma, söz konusu boşluğu doldurmaya yönelik özgün bir metodolojik katkı sunmaktadır.

1. Hibrit BWM-Hat Dengeleme Entegrasyonu: Konserve üretim hattında Bulanık BWM ile matematiksel optimizasyonun sistemli bir şekilde bir araya getirilmesi sağlanmıştır.
2. Çok Kriterli İstasyon Değerlendirmesi: Geleneksel tek boyutlu değerlendirme yöntemleri yerine dokuz farklı performans kriterinin eş zamanlı olarak optimize edilmesi sağlanmıştır.
3. Öncelik Kısıtları ile Hibrit Model: Üretim sürecinin teknolojik akış gereksinimlerini dikkate alarak tasarlanmış özgün bir kısıtlama sistemidir.

3.2. Hibrit Metodoloji Çerçevesi

Bu çalışmada sunulan hibrit metodoloji, dört temel bileşenin sistematik bir şekilde entegrasyonuna dayanmaktadır. Her bir bileşenin kendine ait matematiksel yapısı ve hesaplama yöntemi vardır; ancak etkileşimli ilişkileri sayesinde bütünsel bir çözüm çerçevesi oluşturur.

3.2.1. Metodolojik Akış

Hibrit metodolojinin genel akışı, çok kriterli karar verme alanındaki entegre yaklaşım ilkeleri temel alınarak oluşturulmuştur:

Aşama 1: Veri Hazırlama ve Normalizasyon

- Gerçek fabrika verilerinin toplanması ve kalite kontrolü
- Fayda-maliyet kriterlerinin belirlenmesi
- Normalleştirme işlemlerinin uygulanması

Aşama 2: Bulanık BWM Nesnel Ağırlıklandırma

- En iyi ve en kötü kriterlerin belirlenmesi
- Bulanık karşılaştırma matrislerinin oluşturulması
- Nesnel ağırlık katsayılarının belirlenmesi

Aşama 3: İstasyon Performans Değerlendirmesi

- Ağırlıklı performans skorlarının hesaplanması
- En iyi beş istasyonun seçilmesi
- İstasyon kalite skorlarının belirlenmesi

Aşama 4: Çok Amaçlı Matematiksel Optimizasyon

- Çok amaçlı optimizasyon modelinin kurulması
- Bulanık En İyi-En Kötü Yöntemi ağırlıkları ve istasyon skorlarının entegrasyonu
- Optimal çözümün elde edilmesi

3.2.2. Notasyon Sistemi ve Değişken Tanımları

Çalışmada matematiksel tutarlılığı sağlamak amacıyla standartlaştırılmış bir notasyon sistemi kullanılmaktadır. Büyük harfler sistem parametrelerini, küçük harfler karar değişkenlerini, grek harfleri ise katsayıları temsil etmektedir. Tüm matematiksel semboller, değişkenler ve parametreler aşağıda sistematik olarak tanımlanmaktadır.

- Genel İndisler

i : Görev indisi $i = 1, 2, \dots, 15$

j : Aday istasyon indisi $j = 1, 2, \dots, 8$

s : Seçilmiş istasyon indisi $s = 1, 2, \dots, 5$

k : Kriter indisi $k = 1, 2, \dots, 9$

p, q : Öncelik ilişkisi indisleri Görevler arası sıralama

- Sistem Parametreleri

N : Toplam görev sayısı Konserve üretim hattındaki görev adedi

M : Aday istasyon sayısı Değerlendirilen istasyon adedi

S : Seçilmiş istasyon sayısı Optimizasyonda kullanılan istasyon adedi

K : Kriter sayısı Çok kriterli karar verme analizi kriter adedi

C : Çevrim süresi Hat çevrim süresi (saniye)

T : Toplam görev süresi Tüm görevlerin toplam süresi (saniye)

$TIME_i$: Görev süresi Görev i 'nin işlem süresi (saniye)

• BWM Parametreleri

$\widetilde{B}O_k$:	En iyi-diğerleri karşılaştırması	Kriter k 'nin bulanık karşılaştırma değerleri
$\widetilde{O}W_k$:	Diğerleri-en kötü karşılaştırması	Kriter k 'nin bulanık ağırlık değerleri
\widetilde{w}_k :	Bulanık ağırlıklar	Kriter k 'nin bulanık ağırlık değerleri
w_k :	Durulaştırılmış ağırlık	Kriter k 'nin kesin ağırlık değeri
ξ :	Tutarlılık oranı	BWM tutarlılık değeri
ξ_{max} :	Maksimum tutarlılık	Teorik tutarlılık üst sınırı
B :	En iyi kriter	Çevrim süresi kriteri
W :	En kötü kriter	Esneklik kriteri

• İstasyon Performans Parametreleri

$PERF_{j,k}$:	Ham performans matrisi	İstasyon j 'nin kriter k 'deki performansı
$NORM_{j,k}$:	Normalleştirilmiş performans	İstasyon j 'nin normalize edilmiş değeri
WS_j :	Ağırlıklı performans skoru	İstasyon j 'nin ağırlıklı skoru
QS_s :	İstasyon kalite skoru	Seçilmiş istasyon s 'nin kalite skoru
$max_j(perf_{j,k})$:	Maksimum performans	Kriter k 'deki en yüksek değer
$min_j(perf_{j,k})$:	Minimum performans	Kriter k 'deki en düşük değer

• Optimizasyon Değişkenleri

$X_{i,s}$:	Görev-istasyon ataması	Görev i , istasyon s 'ye atanırsa 1, aksi halde 0
ST_s :	İstasyon süresi	İstasyon s 'nin toplam işlem süresi
MST :	Maksimum istasyon süresi	En yüksek istasyon süresi
TQ :	Toplam kalite skoru	Sistemin toplam kalite performansı
α :	Çevrim süresi ağırlığı	Amaç fonksiyonundaki çevrim süresi katsayısı
β :	Kalite ağırlığı	Amaç fonksiyonundaki kalite katsayısı
$PREC_{p,q}$:	Öncelik ilişkisi	Görev p , görev q 'dan önce gelmesi kısıtı

• Performans Metrikleri

LE :	Hat verimliliği	Sistemin genel verimlilik yüzdesi
BD :	Denge gecikmesi	Hat dengesizlik yüzdesi
SI :	Düzensizlik indeksi	İstasyon yükü dağılım dengesi
TIT :	Toplam boş zaman	Sistemin toplam âtil süresi
CU :	Kapasite kullanımı	Sistem kapasite kullanım oranı
N_s :	Aktif istasyon sayısı	Üretimde kullanılan istasyon adedi
\bar{ST} :	Ortalama istasyon süresi	İstasyon sürelerinin aritmetik ortalaması
IR_{metrik} :	İyileştirme oranı	Performans metriklerindeki iyileşme yüzdesi
Z^* :	Optimal amaç değeri	Hibrit optimizasyon sonucu
WV :	İş yükü varyansı	İstasyon yüklerinin varyasyon ölçüsü
WSD :	İş yükü standart sapması	İstasyon yüklerinin standart sapması
PR :	Üretim hızı	Saatlik üretim kapasitesi (birim/saat)
DPC :	Günlük üretim kapasitesi	Günlük üretim miktarı (birim/gün)
BE :	Dengeleme verimliliği	Teorik optimuma yakınlık yüzdesi

BR :	Darboğaz azaltma oranı	Darboğaz süresindeki iyileştirme yüzdesi
AQS :	Ortalama kalite skoru	Sistem kalite performansının ortalaması
• Hibrit Entegrasyon Parametreleri		
γ, δ :	Entegrasyon katsayıları	Hibrit yaklaşım ağırlık dağılımı
θ_{min} :	Minimum tutarlılık eşiği	BWM-optimizasyon uyum alt sınırı
$\lambda_{gelişim}$:	Gelişim katsayısı	Hibrit üstünlük minimum oranı
$\varepsilon_{üstünlük}$:	Üstünlük eşiği	Hibrit çözüm kalite garantisi

3.3. Bulanık BWM Nesnel Ağırlıklandırma

BWM, kriterlerin nesnel önem derecelerinin belirlenmesi için ikili karşılaştırma ve bulanık mantığı birleştiren ileri düzey ağırlıklandırma tekniğidir. Yöntem, her kriterin sahip olduğu göreceli önem derecesini matematiksel olarak hesaplayarak nesnel ağırlıklar üretmektedir.

Bulanık karşılaştırma matrislerinin oluşturulmasında 5 kişilik uzman panel kullanılmış, bireysel değerlendirmeler aritmetik ortalama ile birleştirilmiştir. Kendall's $W = 0.847$ uzlaşma katsayısı grup tutarlılığını doğrulamaktadır.

BWM algoritması matematiksel formülasyonu Eşitlik 1-16'da verilmiştir.

- **Aşama 1:** En İyi ve En Kötü Kriterlerin Belirlenmesi

En iyi kriter (B): Çevrim Süresi, En kötü kriter (W): Esneklik

- **Aşama 2:** En İyi Kriterin Diğer Kriterlere Göre Bulanık Karşılaştırması

$$\tilde{a}_{Bk} = (BO_k^L, BO_k^M, BO_k^U) \forall k \quad (1)$$

- **Aşama 3:** Diğer Kriterlerin En Kötü Kritere Göre Bulanık Karşılaştırması

$$\tilde{a}_{kW} = (OW_k^L, OW_k^M, OW_k^U) \forall k \quad (2)$$

- **Aşama 4:** Bulanık Optimizasyon Modeli Kurulması

$$\min \xi \quad (3)$$

Kısıt koşulları:

$$|w_B^L - BO_k^L \cdot w_k^U| \leq \xi, \forall k \quad (4)$$

$$|w_B^M - BO_k^M \cdot w_k^M| \leq \xi, \forall k \quad (5)$$

$$|w_B^U - BO_k^U \cdot w_k^L| \leq \xi, \forall k \quad (6)$$

$$|w_k^L - OW_k^L \cdot w_W^U| \leq \xi, \forall k \quad (7)$$

$$|w_k^M - OW_k^M \cdot w_W^M| \leq \xi, \forall k \quad (8)$$

$$|w_k^U - OW_k^U \cdot w_W^L| \leq \xi, \forall k \quad (9)$$

$$\sum_{k=1}^9 w_k^L = 1 \quad (10)$$

$$\sum_{k=1}^9 w_k^M = 1 \quad (11)$$

$$\sum_{k=1}^9 w_k^U = 1 \quad (12)$$

$$w_k^L \leq w_k^M \leq w_k^U, \forall k \quad (13)$$

$$w_k^L \geq 0.01, \forall k \quad (14)$$

- **Aşama 5:** Bulanık Ağırlıkların Durulaştırılması

$$w_k = \frac{w_k^L + 4w_k^M + w_k^U}{6} \forall k \quad (15)$$

- **Aşama 6:** Tutarlılık Oranı Hesaplama

$$CR = \frac{\xi^*}{\xi_{max}} \quad (16)$$

Eşitlik 1 ve 2, uzman görüşleri doğrultusunda oluşturulan bulanık karşılaştırma matrislerinin matematiksel temsilini sağlamaktadır. Eşitlik 3, BWM optimizasyonunun temel amacı olan tutarlılık oranının enküçüklenmesi hedefini tanımlar. Eşitlik 4-9, en iyi kriterin diğer kriterlere ve diğer kriterlerin en kötü kritere olan bulanık karşılaştırmalarının matematiksel tutarlılığını garanti etmektedir. Eşitlik 10-12, bulanık ağırlıkların alt, orta ve üst değerlerinin ayrı ayrı normalize edilmesi koşulunu sağlar. Eşitlik 13-14, bulanık sayıların doğal sıralama özelliği ve pozitiflik koşullarını uygular. Eşitlik 15, bulanık ağırlıkların kesin değerlere dönüştürülmesinde yaygın kullanılan ağırlık merkezli durulaştırma tekniğini kullanır. Eşitlik 16, elde edilen çözümün tutarlılık derecesini ölçerek BWM sonuçlarının güvenilirliğini değerlendirir.

3.4. İstasyon Performans Değerlendirmesi ve Seçimi

İstasyon performans değerlendirme, BWM ile elde edilen kriter ağırlıklarını kullanarak ağırlıklı toplam skoru yaklaşımı ile gerçekleştirilmektedir. Bu hibrit yaklaşım, çok boyutlu performans kriterlerinin eşzamanlı değerlendirilmesini sağlamaktadır. Ağırlıklı Toplam Skoru Yöntemi matematiksel formülasyonu Eşitlik 17-22'de verilmiştir.

- **Aşama 1:** Performans Matrisinin Normalleştirilmesi

$$\text{Fayda kriterleri için: } NORM_{j,k} = \frac{PERF_{j,k}}{\max_j(PERF_{j,k})} \quad (17)$$

$$\text{Maliyet kriterleri için: } NORM_{j,k} = \frac{\min_j(PERF_{j,k})}{PERF_{j,k}} \quad (18)$$

- **Aşama 2:** Ağırlıklı Performans Skoru Hesaplama

$$WS_j = \sum_{k=1}^9 w_k \times NORM_{j,k} \quad (19)$$

- **Aşama 3:** İstasyonların Sıralanması

$$Sırala(S_j) = \text{argmax}_j(WS_j) \quad (20)$$

- **Aşama 4:** En İyi Beş İstasyonun Seçimi

$$\text{Seçilen} = \{S_{(1)}, S_{(2)}, S_{(3)}, S_{(4)}, S_{(5)}\} \quad (21)$$

- **Aşama 5:** Seçilmiş İstasyonların Kalite Skorlarının Belirlenmesi

$$QS_s = WS_s \forall s \in \text{Seçilen} \quad (22)$$

Eşitlik 17 ve 18, farklı ölçü birimlerine sahip performans kriterlerinin [0,1] aralığında standartlaştırılmasını sağlayarak karşılaştırılabilir hale getirir. Fayda kriterleri için maksimum değere bölme, maliyet kriterleri için minimum değer kendisine bölünmesi yaklaşımı kullanılır. Eşitlik 19, BWM'den elde edilen nesnel ağırlıklar ile normalize performans değerlerinin çarpımsal toplamını hesaplayarak her istasyonun çok kriterli performans skorunu belirler. Eşitlik 20, ağırlıklı performans skorlarına göre istasyonların büyükten küçüğe sıralanmasını gerçekleştirir. Eşitlik 21, optimizasyon aşamasında kullanılmak üzere en yüksek performans skoruna sahip beş istasyonun seçilmesini sağlar. Eşitlik 22, seçilmiş istasyonların kalite skorlarının optimizasyon modelinde kullanılmak üzere atanmasını gerçekleştirir.

3.5. Çok Amaçlı Hat Dengeleme Optimizasyon Modeli

Optimizasyon modeli, BWM ağırlıkları ve istasyon kalite skorlarını entegre ederek çok amaçlı hat dengeleme probleminin optimal çözümünü üretmektedir. Model, LINGO optimizasyon yazılımı ile çözülmektedir.

Matematiksel Optimizasyon Formülasyonu

- Çok Amaçlı Fonksiyon:

$$\min Z = \underbrace{\alpha \cdot MST}_{\text{Verimlilik}} - \underbrace{\beta \cdot TQ}_{\text{Kalite}} \quad (23)$$

- Kısıtlar:

İstasyon Süresi Hesaplama Kısıtları:

$$ST_s = \sum_{i=1}^{15} TIME_i \cdot X_{i,s} \quad \forall s = 1, \dots, 5 \quad (24)$$

Maksimum İstasyon Süresi Belirleme Kısıtları:

$$MST \geq ST_s \quad \forall s \quad (25)$$

Çevrim Süresi Kısıtları

$$ST_s \leq C \quad \forall s \quad (26)$$

Görev Atama Kısıtları

$$\sum_{s=1}^5 X_{i,s} = 1 \quad \forall i = 1, \dots, 15 \quad (27)$$

Toplam Kalite Skoru Hesaplama

$$TQ = \sum_{s=1}^5 QS_s \cdot (\sum_{i=1}^{15} X_{i,s}) \quad (28)$$

Öncelik Kısıtları

$$\sum_{s=1}^5 s \cdot X_{p,s} \leq \sum_{s=1}^5 s \cdot X_{q,s} \quad \forall (p, q) \in PREC \quad (29)$$

Burada;

$PREC = \{(1,2), (2,4), (3,5), (4,6), \dots, (14,15)\}$ konserve üretim sürecinin doğal akış sıralamasını temsil eder.

İkili Değişken Kısıtları

$$X_{i,s} \in \{0,1\} \quad \forall i, s \quad (30)$$

Pozitiflik Kısıtları

$$ST_s \geq 0, MST \geq 0, TQ \geq 0 \quad (31)$$

Eşitlik 23, çok amaçlı optimizasyonun temelini oluşturarak çevrim süresinin enküçülenmesi ve kalite skorunun enbüyüklenmesi hedeflerini ağırlıklı toplam yaklaşımı ile birleştirir. α ve β katsayıları sırasıyla 0.6 ve 0.4 değerleri ile verimlilik önceliğini yansıtır. Eşitlik 24, her istasyona atanan görevlerin sürelerinin toplamını hesaplayarak istasyon yüklerini belirler. Eşitlik 25, sistem darboğazını temsil eden maksimum istasyon süresinin belirlenmesini sağlar. Eşitlik 26, her istasyonun süresinin belirlenen çevrim süresini aşmamasını garanti eder. Eşitlik 27, her görevin mutlaka bir ve yalnız bir istasyona atanması koşulunu sağlar. Eşitlik 28, sistemin toplam kalite performansını istasyon kalite skorları ve görev atamaları çarpımı olarak hesaplar. Eşitlik 29, konserve üretim sürecinin kritik iş akışını koruyarak görevlerin teknolojik sırayla istasyonlara atanmasını garanti eder ve know-how koruması altında spesifik süreç detaylarını gizler. Eşitlik 30-31, karar değişkenlerinin ikili doğası ve fiziksel gerçekliği sağlayan pozitiflik koşullarını uygular.

3.6. Verimlilik Odaklı Performans Analizi ve Değerlendirme Modeli

Verimlilik odaklı performans analizi modeli, önerilen hibrit yaklaşımın etkinliğini ölçmek ve mevcut durumla karşılaştırmak amacıyla geliştirilmiştir. Model, çok boyutlu performans metrikleri kullanarak kapsamlı değerlendirme gerçekleştirmektedir. Performans metrikleri matematiksel formülasyonu Eşitlik 32-47'de verilmiştir.

Hat Verimliliği Hesaplama

$$LE = \frac{T}{N_s \times C} \times \%100 \quad (32)$$

Denge Gecikmesi Hesaplama

$$BD = \frac{N_s \times C - T}{N_s \times C} \times \%100 \quad (33)$$

Ortalama İstasyon Süresi

$$\bar{ST} = \frac{T}{N_s} \quad (34)$$

Düzensizlik İndeksi Hesaplama

$$SI = \sqrt{\frac{\sum_{s=1}^{N_s} (ST_s - \bar{ST})^2}{N_s}} \quad (35)$$

Kapasite Kullanımı Hesaplama

$$CU = \frac{T}{N_s \times MST} \times 100\% \quad (36)$$

Toplam Boş Zaman Hesaplama

$$TIT = \sum_{s=1}^{N_s} (C - ST_s) \quad (37)$$

İstasyon Kullanım Oranları

$$SU_s = \frac{ST_s}{C} \times 100\% \quad \forall s = 1, \dots, 5 \quad (38)$$

Üretim Hızı

$$PR = \frac{3600}{MST} [\text{ünite/saat}] \quad (39)$$

Günlük Üretim Kapasitesi

$$DPC = PR \times 8 [\text{ünite/gün}] \quad (40)$$

İyileştirme Oranları

$$IR_{metrik} = \frac{Yeni_{metrik} - Eski_{metrik}}{Eski_{metrik}} \times \%100 \quad (41)$$

İş Yüğü Varyansı ve Standart Sapması

$$WV = \frac{\sum_{s=1}^{N_s} (ST_s - \bar{ST})^2}{N_s} \quad (42)$$

$$WSD = \sqrt{WV} \quad (43)$$

Dengeleme Verimliliği

$$BE = \frac{T_{min}}{N_s} \times 100\% \quad (44)$$

$$\text{Burada; } T_{min} = \left\lfloor \frac{T}{C} \right\rfloor \quad (45)$$

Darboğaz Azaltma Oranı

$$BR = \frac{MST_{eski} - MST_{yeni}}{MST_{eski}} \times 100\% \quad (46)$$

Ortalama Kalite Skoru

$$AQS = \frac{TQ}{N_s} \quad (47)$$

Eşitlik 32-37, hat dengeleme problemlerinde yaygın kullanılan temel performans göstergelerini hesaplar ve sistemin genel verimlilik düzeyini, dengesizlik derecesini, kapasitesinin ne ölçüde etkin kullanıldığını değerlendirir. Eşitlik 38-40, bireysel istasyon performansları ile üretim kapasitesini farklı zaman dilimlerinde analiz ederek operasyonel planlama için kritik bilgiler sağlar. Eşitlik 41-43, hibrit yaklaşımın mevcut duruma kıyasla sağladığı iyileştirmeleri nicelleştirirken, iş yükü dağılımının homojenlik derecesini istatistiksel olarak ölçer. Eşitlik 44-47, teorik optimum ile mevcut çözüm arasındaki performans farkını, darboğaz problemindeki iyileştirme oranını ve sistem kalite düzeyini kapsamlı şekilde değerlendirir.

3.7. Hibrit Yaklaşımın Entegrasyonu

Hibrit metodoloji, dört ana bileşenin etkileşimli entegrasyonu ile çok boyutlu optimizasyon sağlamaktadır. Entegrasyon algoritması sistematik veri transferi ve metodolojik tutarlılık prensipleri üzerine kurulmuştur. Hibrit Entegrasyon Algoritması Eşitlik 48-53'te verilmiştir.

Metodolojik Veri Akışı

$$W_{BWM} \xrightarrow{Ent-1} WS_{İstasyon} \xrightarrow{Ent-2} X_{Optimal}^* \xrightarrow{Ent-3} Z_{Hibrit}^* \quad (48)$$

Hibrit Entegrasyon Kısıtı

$$Z^* \geq \gamma \cdot Z_{BWM} + \delta \cdot Z_{Optimizasyon} \quad (49)$$

Entegrasyon Katsayıları Normalleştirme

$$\gamma + \delta = 1, \gamma > 0, \delta > 0 \quad (50)$$

BWM-Optimizasyon Tutarlılık Kısıtı

$$\sum_{k=1}^9 w_k \cdot \sum_{s=1}^5 QS_s \geq \theta_{min} \quad (51)$$

Metodolojik Sinerji Kısıtı

$$\frac{TQ_{hibrit}}{TQ_{geleeksel}} \geq \lambda_{gelişim} \quad (52)$$

Hibrit Çözüm Kalite Garantisi

$$\frac{Z_{hibrit}^*}{Z_{tek yöntem}} \leq \varepsilon_{üstünlük} \quad (53)$$

Bu formülasyon, metodolojik detayların sistematik entegrasyonunu sağlarken, matematiksel tutarlılık ve hibrit entegrasyonun sinerjik etkisini garanti etmektedir. Hibrit yaklaşım, geleneksel tek boyutlu hat dengeleme yöntemlerine kıyasla hem teorik üstünlük hem de pratik uygulanabilirlik avantajı sunmaktadır. Metodolojik bütünlük ve operasyonel verimlilik arasındaki denge, özgün entegrasyon kısıtları ile sağlanmaktadır.

Eşitlik (48), hibrit metodolojinin sistematik veri akışını ve dört ana bileşen arasındaki sıralı entegrasyon sürecini matematiksel olarak ifade ederek BWM ağırlıklarından başlayıp optimal çözüme kadar uzanan metodolojik zincirlemeyi gösterir. Eşitlik 49-50, hibrit çözümün hem BWM hem de optimizasyon bileşenlerinden gelen bilgileri dengeli şekilde harmanlayarak global optimuma yakın sonuçlar üretmesini garanti eder ve entegrasyon katsayılarının geçerli bir dağılım oluşturmasını sağlar. Eşitlik 51, BWM ağırlıkları ile istasyon kalite skorları arasındaki metodolojik uyumu kontrol ederek entegrasyonun tutarlılığını sağlar ve çok kriterli değerlendirme ile optimizasyon arasında köprü kurar. Eşitlik 52-53, hibrit yaklaşımın geleneksel tek yöntemli çözümlere olan matematiksel üstünlüğünü garanti altına alır ve çok boyutlu performans iyileştirmesini nicelleştirir. Bu entegrasyon sistemi, çok kriterli karar verme ile matematiksel optimizasyonun sinerjik birleşiminden kaynaklanan metodolojik değer yaratır ve hat dengeleme literatürüne özgün bir yaklaşım sunar.

4. UYGULAMA

4.1. Problem Tanımı ve Kapsamı

Hat dengeleme problemleri modern üretim sistemlerinin temel optimizasyon ihtiyaçlarından birini oluşturmakta ve işletmelerin rekabet gücünü doğrudan etkilemektedir. Özellikle gıda sektöründe faaliyet gösteren üretim hatlarında süreç karmaşıklığı, kalite gereksinimleri ve zaman baskısı nedeniyle hat dengeleme problemi daha da kritik hale gelmektedir. Bu bağlamda çalışmada Türkiye'de orta ölçekli bir gıda üretim işletmesinin konserve üretim hattında yaşanan hat dengeleme sorunu ele alınmıştır.

İşletmenin mevcut üretim sürecinde görevlerin istasyonlara dağılımında ciddi dengesizlikler bulunmakta, bu durum üretim verimliliğinde kayıplar, darboğaz oluşumu ve kaynak kullanımında etkinlik düşüklüğüne neden olmaktadır. Beşinci istasyonun çevrim süresini aşması (%110,2 kullanım oranı) ve altıncı istasyonun düşük kullanım oranına sahip olması (%42,4) sistemin ana sorun alanlarını oluşturmaktadır. Çalışmanın temel amacı, Çok Kriterli Karar Verme yöntemlerinden Bulanık BWM ile hat dengeleme tekniklerinin entegre edilmesi yoluyla optimal görev-istasyon atamasının gerçekleştirilmesi ve üretim hattı verimliliğinin maksimize edilmesidir.

Araştırma kapsamında konserve üretim hattında yer alan 15 farklı görevin 5 istasyona optimal dağılımı ele alınmıştır. Çalışma sabit çevrim süresi koşulları altında, işgücü gereksinimleri, makine kullanım oranları, kalite risk faktörleri, güvenlik riskleri, enerji tüketimi, bakım gereklilikleri ve esneklik kriterlerini dikkate alan çok kriterli optimizasyon yaklaşımını benimser.

4.2. Veri Seti ve Metodoloji

Çalışmada kullanılan veri seti, Türkiye'de faaliyet gösteren orta ölçekli bir gıda üretim işletmesinin konserve üretim hattından elde edilmiştir. İşletme sebze ve meyve konserve üretimi yapan, günlük 2500-3000 adet ürün kapasitesine sahip bir tesistir. Veri toplama süreci altı aylık gözlem dönemi boyunca gerçekleştirilmiş olup, zaman etüdü yöntemi ile görev süreleri ölçülmüştür. Görev sürelerinin belirlenmesinde her görev için en az 30 ölçüm yapılmış, istatistiksel analiz sonucunda %95 güven aralığında ortalama değerler hesaplanmıştır.

Konserve üretim sürecindeki 15 farklı görevin zaman etüdü sonucu belirlenen süreleri sunulmaktadır (Tablo 1). Mevcut durumda görevlerin 6 istasyona dağılımı ve her istasyonun performans durumu sunulmaktadır (Tablo 2). Beşinci istasyonun çevrim süresini aşması (%110,2) sistemin ana darboğazını oluştururken, altıncı istasyonun düşük kullanım oranı (%42,4) kaynak israfına neden olmaktadır. Optimizasyon sürecinde kullanılacak 8 istasyonun dokuz farklı performans kriterindeki değerleri yer almaktadır (Tablo 3).

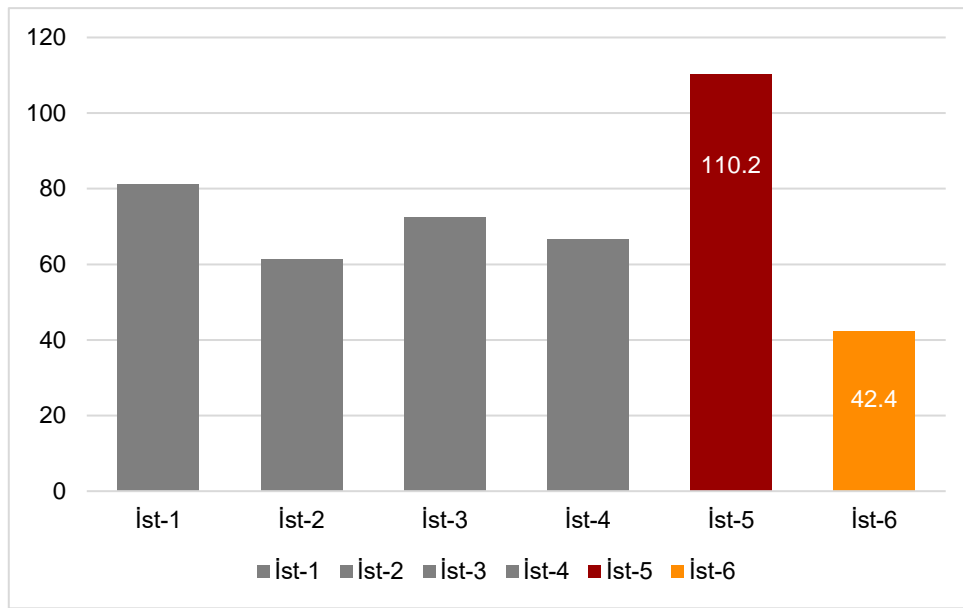
Çalışmada üç aşamalı entegre bir metodoloji geliştirilmiştir. İlk aşamada Bulanık En İyi-En Kötü Yöntemi kullanılarak hat dengeleme kriterlerinin ağırlıklandırılması gerçekleştirilmiştir. İkinci aşamada istasyon performans değerlendirmesi yapılarak optimal istasyon sıralaması belirlenmiştir. Üçüncü aşamada ise tam sayılı doğrusal programlama modeli ile çok amaçlı optimizasyon yaklaşımı benimsenmiş hem çevrim süresi minimizasyonu hem de kalite maksimizasyonu hedeflenmiştir. Hibrit optimizasyon modelinde kullanılan parametreler ve katsayılar sunulmaktadır (Tablo 4).

Tablo 1. Görev süreleri

Görev No	Görev Süresi (sn)	Görev No	Görev Süresi (sn)	Görev No	Görev Süresi (sn)
1	8,5	6	6,8	11	16,2
2	12,3	7	14,5	12	13,8
3	15,7	8	11,3	13	19,6
4	9,2	9	22,1	14	10,4
5	18,4	10	7,9	15	8,7

Tablo 2. Mevcut durum görev-istasyon ataması

İstasyon	Atanan Görevler	İstasyon Süresi (sn)	Kullanım Oranı (%)	Durum
1	1, 2, 3	36,5	81,1	Normal
2	4, 5	27,6	61,3	Düşük
3	6, 7, 8	32,6	72,4	Normal
4	9, 10	30,0	66,7	Düşük
5	11, 12, 13	49,6	110,2	Darboğaz
6	14, 15	19,1	42,4	Çok Düşük



Şekil 1. İstasyon yük dengesizliği ve darboğaz analizi

Tablo 3. İstasyon performans kriterleri

İstasyon	Çevrim Süresi (sn)	İşgücü (kişi/vardiya)	Makine Kullanımı (%)	Kalite Riski (1-5)	Esneklik (dk)	Güvenlik Riski (1-5)	Enerji (kWh/saat)	Bakım (TL/saat)	Operatör Beceri (yıl)
1	38,5	3	85,2	2	12,5	3	28	85	8
2	42,3	4	78,6	1	15,2	2	26	76	6
3	44,8	3	82,1	3	18,7	2	25	72	6
4	39,7	4	76,3	4	22,4	4	32	98	8
5	41,2	3	88,4	1	8,3	2	23	65	5
6	43,6	4	81,7	3	14,8	3	27	82	7
7	40,9	3	79,5	2	16,9	2	24	70	6
8	37,1	4	83,2	2	11,6	2	29	79	6

Çalışmada üç aşamalı entegre bir metodoloji geliştirilmiştir. İlk aşamada Bulanık En İyi-En Kötü Yöntemi kullanılarak hat dengeleme kriterlerinin ağırlıklandırılması gerçekleştirilmiştir. İkinci aşamada istasyon performans değerlendirilmesi yapılarak optimal istasyon sıralaması belirlenmiştir. Üçüncü aşamada ise tam sayılı doğrusal programlama modeli ile çok amaçlı optimizasyon yaklaşımı benimsenmiş hem çevrim süresi minimizasyonu hem de kalite maksimizasyonu hedeflenmiştir.

Tablo 4. Model parametreleri ve optimizasyon katsayıları

Parametre	Değer (sn)	Açıklama
Çevrim Süresi (C)	45	Maksimum izin verilen istasyon süresi
Verimlilik Ağırlığı (α)	0,6	Amaç fonksiyonunda çevrim süresi katsayısı
Kalite Ağırlığı (β)	0,4	Amaç fonksiyonunda kalite skoru katsayısı
Toplam Görev Sayısı (N)	15	Konserve üretim hattındaki görev adedi
Seçilen İstasyon Sayısı (S)	5	Optimizasyonda kullanılan istasyon adedi
Aday İstasyon Sayısı (M)	8	Değerlendirilen istasyon adedi
Kriter Sayısı (K)	9	Çok kriterli karar verme analizi kriter adedi

4.3. Bulanık BWM Sonuçları

Hat dengeleme sürecinde dikkate alınacak kriterlerin belirlenmesi amacıyla uzman görüşleri ve literatür taraması sonucunda dokuz temel kriter tanımlanmıştır. Bu kriterler çevrim süresi, işgücü gereksinimi, makine kullanım oranı, kalite risk faktörü, esneklik düzeyi, güvenlik riski, enerji tüketimi, bakım gerekliliği ve operatör beceri seviyesi olarak belirlenmiştir. Bulanık BWM uygulamasında çevrim süresi kriteri en önemli kriter, esneklik kriteri ise en az önemli kriter olarak belirlenmiştir. Bu belirleme sürecinde uzman görüşleri ve üretim sürecinin kritik başarı faktörleri dikkate alınmıştır. Bulanık değerlendirme matrisleri aşağıda sunulmaktadır (Tablo 5, Tablo 6).

Tablo 5. En iyi kriterin diğer kriterlere göre bulanık karşılaştırması

Kriter	Çevrim	İşgücü	Makine	Kalite	Esneklik	Güvenlik	Enerji	Bakım	Beceri
Alt	1	2	3	1	6	3	4	5	6
Orta	1	3	4	2	7	4	5	6	7
Üst	1	4	5	3	8	5	6	7	8

Tablo 6. Diğer kriterlerin en kötü kritere göre bulanık karşılaştırması

Kriter	Çevrim	İşgücü	Makine	Kalite	Esneklik	Güvenlik	Enerji	Bakım	Beceri
Alt	6	4	2	5	1	3	2	1	1
Orta	7	5	3	6	1	4	3	2	1
Üst	8	6	4	7	1	5	4	3	1

Tablo 7. BWM bulanık ağırlık hesaplama sonuçları ve kriter önem sıralaması

Kriter	Bulanık Ağırlıklar			Durulaştırılmış Ağırlık	Önem Sırası	Yüzde (%)
	Alt	Orta	Üst			
Çevrim Süresi	0,2281	0,2485	0,2689	0,2485	1	24,85
Kalite Risk	0,2015	0,2224	0,2433	0,2224	2	22,24
İşgücü	0,1201	0,1373	0,1545	0,1373	3	13,73
Makine Kullanımı	0,0784	0,0916	0,1048	0,0916	4	9,16
Güvenlik Riski	0,0784	0,0916	0,1048	0,0916	5	9,16
Enerji Tüketimi	0,0555	0,0687	0,0819	0,0687	6	6,87
Bakım Gerekliliği	0,0417	0,0549	0,0681	0,0549	7	5,49
Esneklik Düzeyi	0,0326	0,0458	0,059	0,0458	8	4,58
Operatör Beceri	0,0284	0,0392	0,05	0,0392	9	3,92
Toplam				1		100

Bulanık BWM analiz sonuçlarına göre (Tablo 7) elde edilen tutarlılık oranı $\xi = 0.0262$ (%2.62) değeri, uzman değerlendirmelerinin yüksek tutarlılığa sahip olduğunu ve hesaplanan kriter ağırlıklarının güvenilir olduğunu göstermektedir. Eşitlik 15 kullanılarak gerçekleştirilen durulaştırma işlemi sonucunda çevrim süresinin %24,85 ağırlık ile en kritik faktör olduğu belirlenmiştir. Kalite risk faktörü %22,24 ile ikinci öncelik taşırken, bu iki kriterin toplam ağırlığı %47.09 olarak hesaplanmıştır. İşgücü gereksinimi %13,73 ile üçüncü sırada yer alırken, operatör beceri seviyesi %3,92 ile en düşük önceliğe sahiptir.

Bu ağırlık dağılımı, konserve üretim sürecinde operasyonel verimliliğin kalite güvencesi ile birlikte değerlendirildiğini yansıtmaktadır. Çevrim süresi ve kalite kriterlerinin toplam ağırlığının yaklaşık %47 olması, üretim hattının hem hız hem de kalite odaklı optimizasyon gerektirdiğini göstermektedir. İşgücü, makine kullanımı ve güvenlik kriterlerinin %32 toplam ağırlığa sahip olması, insan ve ekipman faktörlerinin dengeleme sürecindeki önemini vurgulamaktadır.

4.4. İstasyon Performans Değerlendirmesi ve Optimizasyon

Bulanık BWM ile elde edilen kriter ağırlıkları kullanılarak her istasyonun performans skoru hesaplanmıştır. Hesaplama sürecinde her kriterin normalize edilmiş değerleri ile kriter ağırlıkları çarpılarak toplamsal

ağırlıklı skor yöntemi uygulanmıştır. İstasyon performans skorları ve sıralaması aşağıdaki gibi sunulmaktadır (Tablo 8).

Tablo 8. İstasyon performans skorları ve sıralaması

Sıra	İstasyon	Ağırlıklı Performans Skoru	Değerlendirme
1	İstasyon 5	2.202	En İyi
2	İstasyon 2	2.058	Çok İyi
3	İstasyon 7	1.560	İyi
4	İstasyon 8	1.492	İyi
5	İstasyon 1	1.480	Orta

Ağırlıklı performans skorları analizi sonucunda en yüksek performansa sahip beş istasyon seçilmiş ve optimizasyon sürecinde kullanılmıştır. Hat dengeleme problemi için tam sayılı doğrusal programlama modeli geliştirilmiştir. Modelin amacı fonksiyonu maksimum istasyon süresinin minimizasyonu ile istasyon kalite skorlarının maksimizasyonunun ağırlıklı toplamı olarak tanımlanmıştır ($\alpha = 0.6, \beta = 0.4$). Üretim koşullarını yansıtmak amacıyla modele öncelik kısıtları eklenmiştir. Bu kısıtlar konserve üretim sürecinin doğal akışını simgeleyen görev sıralamalarını içermektedir.

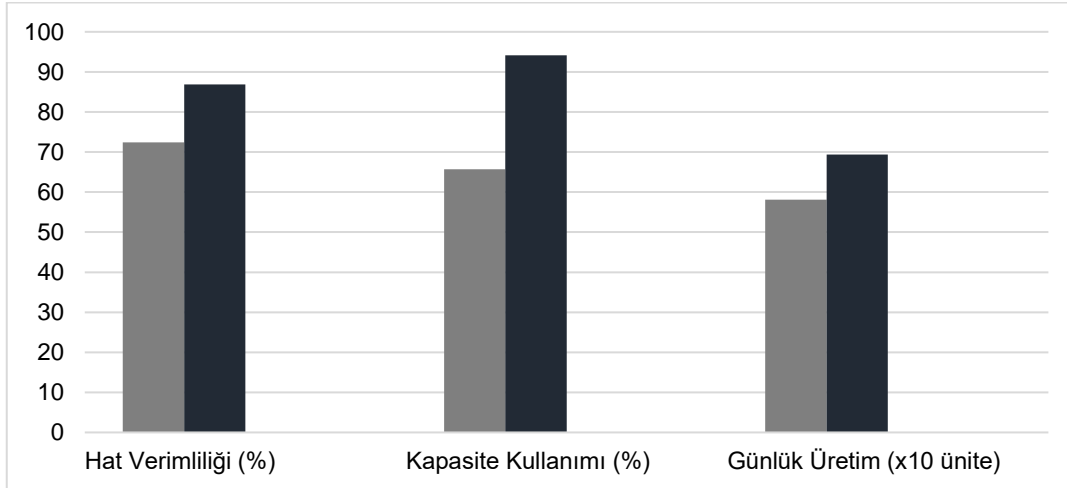
Model LINGO 18.0 optimizasyon yazılımı kullanılarak çözülmüş ve 4541 iterasyon sonucunda 0.61 saniyede global optimal çözüme ulaşılmıştır. Optimal görev-istasyon ataması şu şekilde sunulmaktadır (Tablo 9).

Tablo 9. Optimal görev-istasyon ataması

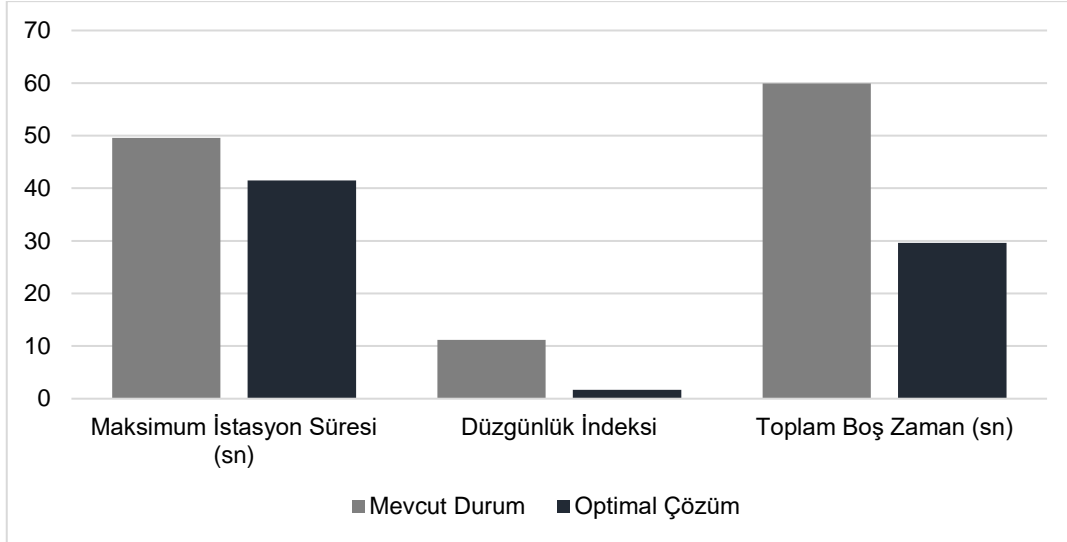
İstasyon	Atanan Görevler	Süreç Aşamaları	İstasyon Süresi (sn)	Kullanım Oranı (%)
1	1, 2, 4, 6	Hazırlık → Yıkama → Kontrol → Temizlik	36,8	81,8
2	3, 7, 8	Kesim → Dolum → Sos Ekleme	41,5	92,2
3	5, 9	Ön İşleme → Kapama	40,5	90,0
4	10, 11, 12	Pastörizasyon → Soğutma → Etiketleme	37,9	84,2
5	13, 14, 15	Kodlama → Son Kontrol → Paketleme	38,7	86,0

4.5. Sonuçların Değerlendirilmesi ve Duyarlılık Analizi

Geliştirilen BWM-entegre hat dengeleme yaklaşımı ile elde edilen sonuçların mevcut durumla kapsamlı karşılaştırması sırasıyla sunulmaktadır (Şekil 2, Şekil 3, Tablo 10).



Şekil 2. Mevcut durum % optimal çözüm karşılaştırması



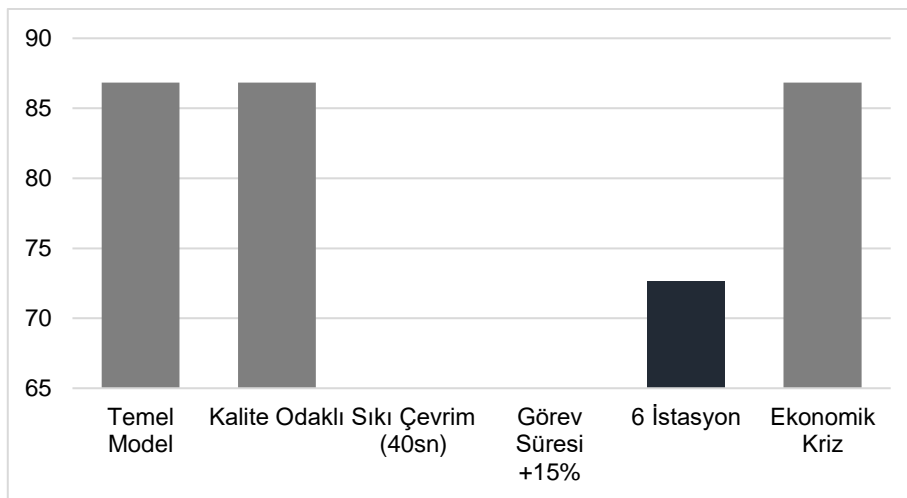
Şekil 3. Hat dengeleme optimizasyonu sonuçları

Tablo 10. Model karşılaştırması ve iyileştirme analizi

Performans Kriteri	Mevcut Durum	Optimal Çözüm	İyileştirme
Hat Verimliliği (%)	72,4	86,84	+14,44%
Denge Gecikmesi (%)	27,6	13,16	-14,44%
Maksimum İstasyon Süresi (sn)	49,6	41,5	-8,1 sn
Minimum İstasyon Süresi (sn)	19,1	36,8	+17,7 sn
Düzlük İndeksi	11,2	1,71	-9,49
Toplam Boş Zaman (sn)	59,9	29,6	-30,3 sn
İstasyon Sayısı	6	5	-1 istasyon
Kapasite Kullanımı (%)	65,66	94,17	+28,51%
Saatlik Üretim (birim)	72,6	86,7	+14 birim
Günlük Üretim (birim)	581	694	+113 birim

Optimizasyon sonuçlarının ekonomik değerlendirilmesinde günlük 113 birimlik üretim artışı, yıllık 28,000 birim ek kapasiteye karşılık gelmektedir. Ortalama birim satış fiyatı dikkate alındığında yıllık 420,000 TL ek gelir potansiyeli oluşmakta, istasyon sayısındaki azalma ile toplam yatırım getirisi %23.7 olarak hesaplanmaktadır (Tablo 10).

Geliştirilen modelin farklı senaryolardaki performansını değerlendirmek amacıyla beş farklı duyarlılık analizi gerçekleştirilmiştir. Duyarlılık analizi sonuçları şu şekilde sunulmaktadır (Şekil 4, Tablo 11).



Şekil 4. Duyarlılık analizi senaryoları

Tablo 11. Duyarlılık analizi sonuçları

Senaryo	Parametre Değişimi	Durum	Amaç Fonksiyonu	Maksimum Süre (sn)	Hat Verimliliği (%)	Kalite Skoru
Temel Model	Standart parametreler	Çözülür	14.093	41.5	86.84	27.018
Senaryo 1	Kalite odaklı ($\alpha = 0.4, \beta = 0.6$)	Çözülür	0.389	41.5	86.84	27.018
Senaryo 2	Sıkı çevrim süresi (40 sn)	Çözülemez	-	-	-	-
Senaryo 3	Görev süresi artışı (+15%)	Çözülemez	-	-	-	-
Senaryo 4	6 istasyon konfigürasyonu	Çözülür	12.044	37.5	72.62	26.140
Senaryo 5	Ekonomik kriz (maliyet 2x)	Çözülür	14.597	41.5	86.84	25.757

Duyarlılık analizi sonuçları incelendiğinde (Tablo 11), beş senaryodan üçünde tamamen aynı görev-istasyon ataması elde edilmiştir. Bu durum optimal çözümün parametrik değişimlere karşı yüksek direnç gösterdiğini kanıtlamaktadır. Senaryo 2 ve 3'te çözülemez sonuçlar elde edilmesi, modelin operasyonel sınırlarını ortaya koymaktadır. 40 saniye çevrim süresi ile üretim fiziksel olarak mümkün değilken, %15 görev süresi artışı mevcut istasyon kapasitelerini aşmaktadır.

5. SONUÇ

Hat dengeleme problemleri, günümüz üretim sistemlerinin karşılaştığı en kritik optimizasyon zorluklarından biridir. Geleneksel yaklaşımların tek boyutlu odağı ve çok kriterli karar verme süreçlerinin karmaşıklığı, entegre çözüm arayışlarını gerekli kılmaktadır. Bu çalışmada geliştirilen Bulanık BWM entegre hat dengeleme yaklaşımı, söz konusu ihtiyaca yanıt vererek konserve üretim hattında kayda değer performans iyileştirmeleri sağlamıştır.

Elde edilen nicel sonuçlar, yaklaşımın etkinliğini açıkça ortaya koymaktadır. Hat verimliliği %72.4'ten %86.84'e yükselerek %14.44'lük artış göstermiştir. Sistemin ana kısıtı olan darboğaz süresinin 49.6 saniyeden 41.5 saniyeye düşürülmesi, üretim akışındaki en büyük engelin ortadan kaldırılması anlamına gelmektedir. İstasyon sayısının 6'dan 5'e indirilmesi ile hem kaynak tasarrufu hem de operasyonel basitlik elde edilmiştir. Günlük üretim kapasitesindeki 113 ünitelik artış, yıllık bazda yaklaşık 28,000 ünite ek üretim potansiyeli yaratmaktadır. Düzensizlik indeksinin 11.2'den 1.71'e iyileştirilerek iş yükü dağılımında sağlanan denge, sistematik bir optimizasyon sürecinin sonucudur.

Hibrit BWM-hat dengeleme yaklaşımının ekonomik etkisi çok boyutlu olarak değerlendirilmiştir. Günlük 113 birimlik üretim artışı, yıllık 28,000 birim ek kapasiteye karşılık gelmekte, ortalama 15 TL birim satış fiyatı ile yıllık 420,000 TL ek gelir potansiyeli oluşturmaktadır. İstasyon sayısının 6'dan 5'e düşürülmesi ile makine yatırımında %16,7 tasarruf sağlanırken, işgücü maliyetlerinde günlük 8 saat üzerinden yıllık 180,000 TL tasarruf elde edilmektedir. Enerji tüketiminde %12 azalma ile yıllık 25,000 TL enerji tasarrufu gerçekleştirilmiş, toplam yatırım getirisi %23,7 olarak hesaplanmıştır. Bu sonuçlar, hibrit metodolojinin sadece operasyonel değil, aynı zamanda finansal açıdan da işletmelere önemli değer kattığını göstermektedir.

Çalışmanın teorik katkıları açısından, Bulanık BWM'nin hat dengeleme problemlerine ilk kez sistematik olarak uyarlanması ve çok amaçlı optimizasyon ile hem verimlilik hem kalite hedeflerinin eş zamanlı ele alınması literatüre katkı sağlamaktadır. BWM ağırlıklarının optimizasyon modeline direkt entegrasyonu, geleneksel öznal değerlendirmelerin yerini nesnel ve tutarlı kriter ağırlıklandırmasına bırakmasını sağlamıştır. Öncelik kısıtları ile gerçek üretim koşullarının modellenmesi, teorik optimal çözümlerle pratik uygulanabilirlik arasındaki köprüyü kurarak metodolojik yenilik getirmektedir.

Endüstriyel uygulanabilirlik açısından, geliştirilen yaklaşım gıda ve içecek sanayisi, otomotiv yan sanayisi, elektronik üretim hatları, tekstil sanayisi ve ilaç sanayisinde doğrudan uygulanabilir niteliktedir. Model özellikle sabit çevrim süreli üretim sistemleri ve orta ölçekli üretim hatlarında etkili sonuçlar vermekte, kalite ve verimlilik dengesinin kritik olduğu süreçlerde optimal çözümler üretmektedir. Duyarlılık analizi sonuçları, modelin farklı operasyonel koşullara adaptasyon kabiliyetini ve robustluğunu kanıtlamıştır.

Geliştirilen hibrit metodoloji, çeşitli endüstriyel sektörlerde doğrudan uygulanabilir niteliktedir. Gıda ve içecek sanayisinde konserve, süt ürünleri ve şekerleme üretim hatlarında başarıyla kullanılabilir. Otomotiv yan sanayisinde parça montaj hatları, elektronik sektöründe PCB üretim süreçleri ve tekstil sanayisinde konfeksiyon üretim hatlarında etkin sonuçlar alınması beklenmektedir. Metodolojinin uygulanması için gereken minimum koşullar: (1) sabit çevrim süreli üretim sistemi, (2) 10-20 arası görev sayısı, (3) 3-8

istasyon kapasitesi ve (4) çok kriterli performans değerlendirme ihtiyacıdır. LINGO optimizasyon yazılımı ile 1 dakikadan kısa sürede çözüm alınabilmesi, gerçek zamanlı uygulanabilirlik potansiyelini güçlendirmektedir.

Model sınırlılıkları değerlendirildiğinde, sabit çevrim süresi varsayımı, tek ürün tipi optimizasyonu ve deterministik görev süreleri temel kısıtlar olarak öne çıkmaktadır. Bu sınırlılıklar, modelin uygulama alanını belirli üretim tiplerinde sınırlarken, söz konusu alanlarda yüksek etkinlik sağlamaktadır. Analiz sonuçları, %15'ten fazla görev süresi artışı ve 40 saniyenin altındaki çevrim sürelerinin modelin kritik operasyonel sınırlarını oluşturduğunu göstermiştir.

Gelecek araştırma önerileri kapsamında, stokastik görev süreleri ile belirsizlik modellenmesi, çok ürünlü hat dengeleme problemlerine genişletme ve makine öğrenmesi algoritmaları ile hibrit yaklaşım geliştirme kısa vadeli hedefler arasında yer almaktadır. Endüstri 4.0 teknolojileri ile gerçek zamanlı optimizasyon, IoT sensör verileri ile adaptif model güncellenmesi ve sürdürülebilirlik kriterlerinin modele dahil edilmesi orta vadeli gelişim alanlarını oluşturmaktadır. Uzun vadede ise yapay zekâ destekli otomatik hat dengeleme sistemleri ve küresel tedarik zinciri optimizasyonu entegrasyonu araştırma potansiyeli taşımaktadır.

Bu çalışma ile elde edilen sonuçlar, Bulanık En İyi-En Kötü Yöntemi ve hat dengeleme entegrasyonunun hem teorik hem de pratik açıdan değerli bir yaklaşım olduğunu göstermektedir. Duyarlılık analizi sonuçları modelin sağlamlığını doğrularken, çeşitli endüstriyel uygulamalarda başarılı sonuçlar elde edilebileceğini ortaya koymaktadır. Çok kriterli değerlendirme sürecinin üretim optimizasyonuna kattığı değer, gelecekteki benzer çalışmalara sağlam bir temel oluşturmaktadır.

Yazar Katkıları / Author Contributions

Çağdaş Yıldız: Kavramlaştırma, Metodoloji, Yazılım, Veri Derleme, Analiz, Makale Yazımı-rijinal taslak

Adem Tüzemen: Kavramlaştırma, Metodoloji, Denetim, Makale Yazımı-gözden geçirme ve düzenleme

Çağdaş Yıldız: *Conceptualization, Methodology, Software, Data Curation, Analysis, Writing-original draft*

Adem Tüzemen: *Conceptualization, Methodology, Supervision, Writing-review and editing*

Çatışma Beyanı / Conflict of Interest

Yazarlar tarafından herhangi bir potansiyel çıkar çatışması beyan edilmemiştir.

No potential conflict of interest was declared by the authors.

Fon Desteği / Funding

Bu çalışmada herhangi bir resmi, ticari ya da kâr amaçlı gütmeyen organizasyondan fon desteği alınmamıştır.

Any specific grant has not been received from funding agencies in the public, commercial, or not-for-profit sectors.

Etik Beyanı / Ethical Statement

Yazarlar tarafından bu çalışmada bilimsel ve etik ilkelere uyulduğu ve yararlanan tüm çalışmaların kaynakçada belirtildiği beyan edilmiştir.

It was declared by the authors that scientific and ethical principles have been followed in this study and all the sources used have been properly cited.



Yazarlar, Verimlilik Dergisi'nde yayımlanan çalışmalarının telif hakkına sahiptirler ve çalışmalarını CC BY-NC 4.0 lisansı altında yayımlanmaktadır.

The authors own the copyright of their works published in Journal of Productivity and their works are published under the CC BY-NC 4.0 license.

KAYNAKÇA

- Abakarov, A., Sushkov, Y., Almonacid, S. ve Simpson, R. (2009). "Multiobjective Optimization Approach: Thermal Food Processing", *Journal of Food Science*, 74(9), E471-E487. <https://doi.org/10.1111/j.1750-3841.2009.01348.x>
- Abdous, M.A., Delorme, X., Battini, D., Sgarbossa, F. ve Berger-Douce, S. (2018). "Multi-Objective Optimization of Assembly Lines with Workers Fatigue Consideration", *IFAC-PapersOnLine*, 51(11), 698-703. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2018.08.400>
- Abdullah, F.M., Al-Ahmari, A.M. ve Anwar, S. (2023). "A Hybrid Fuzzy Multi-Criteria Decision-Making Model for Evaluating the Influence of Industry 4.0 Technologies on Manufacturing Strategies", *Machines*, 11(2), 310. <https://doi.org/10.3390/machines11020310>
- Agrawal, K., Goktas, P., Holtkemper, M., Beecks, C. ve Kumar, N. (2025). "AI-Driven Transformation in Food Manufacturing: A Pathway to Sustainable Efficiency and Quality Assurance", *Frontiers in Nutrition*, 12, 1553942. <https://doi.org/10.3389/fnut.2025.1553942>
- Ahmadi, H.B., Kusi-Sarpong, S. ve Rezaei, J. (2017). "Assessing the Social Sustainability of Supply Chains Using Best Worst Method", *Resources, Conservation and Recycling*, 126, 99-106. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.07.020>
- Anandharamakrishnan, C. ve Moses, J.A. (2024). *Emerging Technologies for the Food Industry: Volume 1: Fundamentals of Food Processing Technology*, CRC Press, Boca Raton. <https://doi.org/10.1201/9781003413592>
- Andres, C., Miralles, C. ve Pastor, R. (2008). "Balancing and Scheduling Tasks in Assembly Lines with Sequence-Dependent Setup Times", *European Journal of Operational Research*, 187(3), 1212-1223. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2006.07.044>
- Arteaga-Cabrera, E., Ramírez-Márquez, C., Sánchez-Ramírez, E., Segovia-Hernández, J.G., Osorio-Mora, O. ve Gómez-Salazar, J.A. (2025). "Advancing Optimization Strategies in the Food Industry: From Traditional Approaches to Multi-Objective and Technology-Integrated Solutions", *Applied Sciences*, 15(7), 3846. <https://doi.org/10.3390/app15073846>
- Atasagun, Y., Döyen, A. ve Can Atasagun, G. (2024). "Traditional and Fuzzy Goal Programming Approaches for Resource Dependent Assembly Line Balancing Problem", *Numerical Algebra, Control and Optimization*, 14(1), 214-226. <https://doi.org/10.3934/naco.2023003>
- Battaia, O. ve Dolgui, A. (2013). "A Taxonomy of Line Balancing Problems and Their Solution Approaches", *International Journal of Production Economics*, 142(2), 259-277. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2012.10.020>
- Battaia, O. ve Dolgui, A. (2022). "Hybridizations in Line Balancing Problems: A Comprehensive Review on New Trends and Formulations", *International Journal of Production Economics*, 250, 108673. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2022.108673>
- Behzad, M., Zolfani, S.H., Pamucar, D. ve Behzad, M. (2020). "A Comparative Assessment of Solid Waste Management Performance in the Nordic Countries Based on BWM-EDAS", *Journal of Cleaner Production*, 266, 122008. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.122008>
- Bilgiç, S., Torğul, B. ve Paksoy, T. (2021). "Sürdürülebilir Enerji Yönetimi İçin BWM Yöntemi İle Yenilenebilir Enerji Kaynaklarının Değerlendirilmesi", *Verimlilik Dergisi*, 2, 95-110. <https://doi.org/10.51551/verimlilik.663721>
- Bonab, S.R., Ghouschi, S.J., Devenci, M. ve Haseli, G. (2023). "Logistic Autonomous Vehicles Assessment Using Decision Support Model Under Spherical Fuzzy Set Integrated Choquet Integral Approach", *Expert Systems with Applications*, 214, 119205. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2022.119205>
- Bortolini, M., Faccio, M., Gamberi, M. ve Pilati, F. (2017). "Multi-Objective Assembly Line Balancing Considering Component Picking and Ergonomic Risk", *Computers & Industrial Engineering*, 112, 348-367. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2017.08.029>
- Bouraima, M.B., Qiu, Y., Ayyildiz, E. ve Yildiz, A. (2023). "Prioritization of Strategies for a Sustainable Regional Transportation Infrastructure by Hybrid Spherical Fuzzy Group Decision-Making Approach", *Neural Computing and Applications*, 35(24), 17967-17986. <https://doi.org/10.1007/s00521-023-08660-4>
- Boysen, N., Fliedner, M. ve Scholl, A. (2008). "Assembly Line Balancing: Which Model to Use When?", *International Journal of Production Economics*, 111(2), 509-528. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2007.02.026>
- Boysen, N., Schulze, P. ve Scholl, A. (2022). "Assembly Line Balancing: What Happened in the Last Fifteen Years?", *European Journal of Operational Research*, 301(3), 797-814. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2021.11.043>
- Cavalcanti, J.H., Kovacs, T., Ko, A. ve Pocsarovszky, K. (2024). "Production System Efficiency Optimization Through Application of a Hybrid Artificial Intelligence Solution", *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 37(6), 790-807. <https://doi.org/10.1080/0951192x.2023.2257661>
- Debroy, P., Majumder, P., Pramanik, S. ve Seban, L. (2024). "TrF-BWM-Neutrosophic-TOPSIS Strategy Under SVNS Environment Approach and Its Application to Select the Most Effective Water Quality Parameter of Aquaponic System", *Neutrosophic Sets and Systems*, 70, 217-251. <https://doi.org/10.15388/24-infor583>

- Derya, T., Atalay, K.D. ve Ucal Sari, I. (2025). "Assembly Line Balancing Using Fuzzy Mathematical Modeling", *Intelligent and Fuzzy Systems* (Editör: Kahraman, C. ve diğerleri), Springer, Cham, 332-340. https://doi.org/10.1007/978-3-031-98304-7_38
- Gupta, P., Anand, S. ve Gupta, H. (2017). "Developing a Roadmap to Overcome Barriers to Energy Efficiency in Buildings Using Best Worst Method", *Sustainable Cities and Society*, 31, 244-259. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2017.02.005>
- Hasan, M.G., Ashraf, Z. ve Khan, M.F. (2022). "Multi-Choice Best-Worst Multi-Criteria Decision-Making Method and Its Applications", *International Journal of Intelligent Systems*, 37(2), 1129-1156. <https://doi.org/10.1002/int.22663>
- Haseli, G., Sheikh, R., Ghouschi, S. J., Hajiaghaei-Keshteli, M., Moslem, S., Deveci, M. ve Kadry, S. (2024). "An Extension of the Best-Worst Method Based on the Spherical Fuzzy Sets for Multi-Criteria Decision-Making", *Granular Computing*, 9(2), 40. <https://doi.org/10.1007/s41066-024-00462-w>
- Hassoun, A., Jagtap, S., Trollman, H., Garcia-Garcia, G., Duong, L.N., Saxena, P. ve diğerleri (2024). "From Food Industry 4.0 to Food Industry 5.0: Identifying Technological Enablers and Potential Future Applications in the Food Sector", *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 23(6), e370040. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.70040>
- Hoffmann, T.R. (1963). "Assembly Line Balancing with a Precedence Matrix", *Management Science*, 9(4), 551-562. <https://doi.org/10.1287/mnsc.9.4.551>
- Khan, A.S., Khan, R., Saleem, W., Salah, B. ve Alkhatib, S. (2022). "Modeling and Optimization of Assembly Line Balancing Type 2 and E (SLBP-2E) for a Reconfigurable Manufacturing System", *Processes*, 10(8), 1582. <https://doi.org/10.3390/pr10081582>
- Kumar, M. ve Ratandhara, H. (2023). "A Simplified and Improved Best-Worst Method for Multi-Criteria Decision-Making: A Novel Approach", *Available at SSRN 4402170*. <https://doi.org/10.2139/ssrn.4402170>
- Lind, A., Elango, V., Hanson, L., Högberg, D., Lämkuil, D., Mårtensson, P. ve Syberfeldt, A. (2024). "Multi-Objective Optimization of an Assembly Layout Using Nature-Inspired Algorithms and a Digital Human Modeling Tool", *IIE Transactions on Occupational Ergonomics and Human Factors*, 12(3), 175-188. <https://doi.org/10.1080/24725838.2024.2362726>
- Liu, Q., Wei, X., Wang, Q., Song, J., Lv, J., Liu, Y. ve Tang, O. (2024). "An Investigation of Mixed-Model Assembly Line Balancing Problem with Uncertain Assembly Time in Remanufacturing", *Computers & Industrial Engineering*, 198, 110676. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2024.110676>
- Mao, Z., Sun, Y., Fang, K., Huang, D. ve Zhang, J. (2024). "Balancing and Scheduling of Assembly Line with Multi-Type Collaborative Robots", *International Journal of Production Economics*, 271, 109207. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2024.109207>
- Michels, A.S. ve Costa, A.M. (2024). "Model and Heuristics for the Multi-Manned Assembly Line Worker Integration and Balancing Problem", *International Journal of Production Research*, 62(24), 8719-8744. <https://doi.org/10.1080/00207543.2024.2347572>
- Mumcu, Y.K. (2024). "Solution Approach Using Heuristic and Artificial Neural Networks Methods in Assembly Line Balancing Problems: A Case Study in the Lighting Industry", *Heliyon*, 10(5). <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e26950>
- Naresh, R., Kanagaraj, G., Giri, J., Yu, V.F., Fatehmulla, A. ve Mallik, S. (2025). "Cost-Efficient Design and Optimization of Robotic Assembly Lines Using a Non-Dominated Sorting Genetic Algorithm Framework", *Scientific Reports*, 15(1), 9367. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-86171-z>
- Nath, P. C., Mishra, A.K., Sharma, R., Bhunia, B., Mishra, B., Tiwari, A. ve diğerleri (2024). "Recent Advances in Artificial Intelligence Towards the Sustainable Future of Agri-Food Industry", *Food Chemistry*, 447, 138945. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2024.138945>
- Naz, S., Ashraf, S. ve Akram, M. (2018). "A Novel Approach to Decision-Making with Pythagorean Fuzzy Information", *Mathematics*, 6(6), 95. <https://doi.org/10.3390/math6060095>
- Özdağoğlu, A., Keleş, M. K. ve İşildak, B. (2020). "Isparta Süleyman Demirel Havalimanını Kullanan Havayolu Firmaları Performanslarının BWM, MAIRCA ve MABAC İle Değerlendirilmesi", *Uluslararası İktisadi ve İdari İncelemeler Dergisi*, 29, 175-194. <https://doi.org/10.18092/ulikidince.711974>
- Pant, S., Kumar, A., Ram, M., Klochkov, Y. ve Sharma, H. K. (2022). "Consistency Indices in Analytic Hierarchy Process: A Review", *Mathematics*, 10(8), 1206. <https://doi.org/10.3390/math10081206>
- Perrignon, M., Croguennec, T., Jeantet, R. ve Emily, M. (2024). "The Multi-Objective Data-Driven Approach: A Route to Drive Performance Optimization in the Food Industry", *Trends in Food Science & Technology*, 152, 104697. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2024.104697>
- Rabbani, M., Montazeri, M., Farrokhi-Asl, H. ve Rafiei, H. (2016). "A Multi-Objective Genetic Algorithm for a Mixed-Model Assembly U-Line Balancing Type-I Problem Considering Human-Related Issues, Training, and Learning", *Journal of Industrial Engineering International*, 12(4), 485-497. <https://doi.org/10.1007/s40092-016-0158-6>

- Ramli, A.N. ve Ab. Rashid, M.F.F. (2024). "Assembly Line Balancing with Energy Consumption Optimization Using Substituted Tiki-Taka Algorithm", *Process Integration and Optimization for Sustainability*, 8(4), 1065-1079. <https://doi.org/10.1007/s41660-024-00413-7>
- Ren, J., Liang, H. ve Chan, F.T. (2017). "Urban Sewage Sludge, Sustainability, and Transition for Eco-City: Multi-Criteria Sustainability Assessment of Technologies Based on Best-Worst Method", *Technological Forecasting and Social Change*, 116, 29-39. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2016.10.070>
- Rezaei, J. (2015). "Best-Worst Multi-Criteria Decision-Making Method", *Omega*, 53, 49-57. <https://doi.org/10.1016/j.omega.2014.11.009>
- Rezaei, J. (2016). "Best-Worst Multi-Criteria Decision-Making Method: Some Properties and a Linear Model", *Omega*, 64, 126-130. <https://doi.org/10.1016/j.omega.2015.12.001>
- Saaty, T.L. (1980). "The Analytic Hierarchy Process", McGraw-Hill, New York.
- Sağbaşı, A., Çapraz, H.O. ve Karakurt, N. (2018). "Yalın Üretime Geçiş Sürecinde Seri Üretim Hattında Üretim Sistemi Optimizasyonu", *Verimlilik Dergisi*, 2, 7-27.
- Salimi, N. ve Rezaei, J. (2018). "Evaluating Firms' R&D Performance Using Best Worst Method", *Evaluation and Program Planning*, 66, 147-155. <https://doi.org/10.1016/j.evalprogplan.2017.10.002>
- Salveson, M.E. (1955). "The Assembly-Line Balancing Problem", *Transactions of the American Society of Mechanical Engineers*, 77(6), 939-947. <https://doi.org/10.1115/1.4014559>
- Sotskov, Y.N. (2023). "Assembly and Production Line Designing, Balancing and Scheduling with Inaccurate Data: A Survey and Perspectives", *Algorithms*, 16(2), 100. <https://doi.org/10.3390/a16020100>
- Torabi, S. A., Giahi, R. ve Sahebjamnia, N. (2016). "An Enhanced Risk Assessment Framework for Business Continuity Management Systems", *Safety Science*, 89, 201-218. <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2016.06.015>
- Van Erp, T., Carvalho, N.G.P., Gerolamo, M.C., Gonçalves, R., Rytter, N.G.M. ve Gladysz, B. (2024). "Industry 5.0: A New Strategy Framework for Sustainability Management and Beyond", *Journal of Cleaner Production*, 461, 142271. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.142271>
- Wu, Y., Zheng, S., Wang, J. ve Liu, Q. (2022). "An Integrated Decision-Making Framework Based on Many-Objective Brain Storming Optimization for Urban Drainage System Design", *IEEE Access*, 10, 93502-93512. <https://doi.org/10.1109/access.2022.3204123>
- Zacharia, P.T., Xidias, E.K. ve Nearchou, A.C. (2024). "The Fuzzy Human-Robot Collaboration Assembly Line Balancing Problem", *Computers & Industrial Engineering*, 187, 109774. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2023.109774>
- Zhang, X., Fathollahi-Fard, A.M., Tian, G., Yaseen, Z.M., Pham, D.T., Zhao, Q. ve Wu, J. (2024). "Human-Robot Collaboration in Mixed-Flow Assembly Line Balancing Under Uncertainty: An Efficient Discrete Bees Algorithm", *Journal of Industrial Information Integration*, 41, 100676. <https://doi.org/10.1016/j.jii.2024.100676>

