

Konfeksiyon Sektöründe Siparişlerin Bölünebilirlik Durumuna Göre İki Amaçlı İlişkisiz Paralel Üretim Hattı Çizelgeleme Probleminin Doğrusal Karma Tamsayılı Modellenmesi

Filiz IŞIK^{*1}, Mustafa YILMAZ², Özden ÜSTÜN³

^{1,3}Aksaray Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, 68100, Aksaray, Türkiye

²Atatürk Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, 25100, Erzurum, Türkiye

(Alınış / Received: 08.11.2024, Kabul / Accepted: 12.03.2025, Online Yayınlanma / Published Online: 25.04.2025)

Anahtar Kelimeler

Paralel üretim hattı çizelgeleme,
Çok amaçlı programlama,
Gams/Cplex,
Siparişlerin bölünmesi

Öz: Paralel makine çizelgeleme problemlerine odaklanan literatür çalışmaları temel alınarak, bu çalışmada konfeksiyon firmasındaki dikiş bölümünde karşılaşılan paralel üretim hattı çizelgeleme problemi ele alınmıştır. Literatürde çizelgeleme problemleri genellikle işlerin bölünemez olduğu varsayımıyla ele alınmaktadır. Ancak, işlerin bölünebilir olması; gecikmelerin önlenmesi, müşteri memnuniyetinin artırılması ve makinelerin kapasite kullanım oranlarının optimize edilmesi gibi önemli avantajlar sunabilmektedir. Bu doğrultuda, çalışmada işlerin bölünemez ve bölünebilir olduğu iki farklı ilişkisiz paralel makine çizelgeleme problemi için çok amaçlı matematiksel modeller geliştirilmiştir. İlk modelde siparişlerin bölünemediği durum, ikinci modelde ise bölünebilir olduğu durum ele alınmıştır. İkinci model, siparişlerin hangi üretim hatlarına atanacağı ve sıralarının yanı sıra, işlerin kaç parçaya bölüneceği ve bu parçaların hangi oranlarda işleneceğini de belirlemektedir. Her iki modelin temel amacı, son işin tamamlanma zamanının ve siparişlerin gecikme süresini en aza indirilmesidir. Bu modellerin geliştirilmesindeki amaç konfeksiyon firmasının zamanında üretim yaparak müşteri tatmin seviyesini arttırmaktır. Önerilen çok amaçlı modeller, Ağırlıklı Toplam Yöntemi ve Epsilon Kısıt Yöntemi kullanılarak tek amaçlı hale dönüştürülmüş ve rastgele üretilen test problemleri, GAMS/Cplex çözücüsü ile analiz edilmiştir. Elde edilen sonuçlar karşılaştırmalı olarak incelenmiş ve yapılan testlerde, ikinci modelin birinci modele kıyasla daha iyi performans sergilediği gözlemlenmiştir. Ayrıca, çok amaçlı programlama yöntemleri açısından değerlendirildiğinde, Epsilon Kısıt Yöntemi'nin daha iyi Pareto çözümleri sunduğu belirlenmiştir. Bu çalışma, çizelgeleme süreçlerinde iş bölünebilirliğinin etkilerini değerlendirerek, üretim sistemlerinin verimliliğini artırmayı amaçlamaktadır. Çalışma kapsamında geliştirilen matematiksel modeller, üretim hattı çizelgeleme süreçlerinde karar vericilere sistematik bir yaklaşım sunmakta olup, elde edilen bulgular iş bölünebilirliğinin operasyonel avantajlarını ortaya koymaktadır. Ancak, büyük ölçekli problemlerin çözümünde matematiksel modellerin yetersiz kalabileceği göz önünde bulundurularak, ilerleyen çalışmalar kapsamında sezgisel ve sezgisel-meta sezgisel yöntemlerin uygulanması önerilmektedir. Böylece, büyük boyutlu problemlerde daha etkili ve hesaplama açısından verimli çözümler üretililecektir.

Linear Mixed Integer Modeling of Dual Objective Unrelated Parallel Production Line Scheduling Problem with Split Orders in Textile Industry

Keywords

Parallel production line
scheduling,
Multi-objective
programming,

Abstract: Based on literature studies focusing on parallel machine scheduling problems, this study addresses the parallel production line scheduling problem encountered in the sewing department of a clothing company. In the literature, scheduling problems are generally addressed with the assumption that jobs are indivisible. However, the fact that jobs are divisible can offer significant advantages

*İlgili yazar: filiz.isik@aksaray.edu.tr

Gams/Cplex,
Splitting orders

such as preventing delays, increasing customer satisfaction and optimizing the capacity utilization rates of machines. In this context, multi-objective mathematical models were developed for two different unrelated parallel machine scheduling problems where jobs are indivisible and divisible. The first model addresses the case where orders are indivisible, while the second model addresses the case where they are divisible. The second model determines which production lines the orders will be assigned to and their order, as well as how many parts the jobs will be divided into and in what proportions these parts will be processed. The main purpose of both models is to minimize the completion time of the last job within the total production time and the delay time of orders. The proposed multi-objective models were converted to single-objective models using the Weighted Sum Method and the Epsilon Constraint Method, and randomly generated test problems were analyzed with the GAMS/Cplex solver. The results obtained were examined comparatively, and in the tests performed, it was observed that the second model performed better than the first model. In addition, when evaluated in terms of multi-objective programming methods, it was determined that the Epsilon Constraint Method provided better Pareto solutions. This study aims to increase the efficiency of production systems by evaluating the effects of work divisibility in scheduling processes. The mathematical models developed within the scope of the study provide a systematic approach to decision makers in production line scheduling processes, and the obtained findings reveal the operational advantages of work divisibility. However, considering that mathematical models may be insufficient in solving large-scale problems, it is recommended that heuristic and heuristic-meta-heuristic methods be applied within the scope of further studies. Thus, more effective and computationally efficient solutions can be produced in large-scale problems.

1. Giriş

Günümüzde artan rekabet, firmaların pazar paylarını tehdit etmektedir. Firmalar, hem maliyetlerini düşük tutup hem de kalitelerinden ödün vermeden, müşteriye zamanında teslimat sağlamak zorundadırlar. Günümüzde planlama sorunları, işletmelerin çözmesi gereken en önemli sorunlardan biridir. Bu noktada firmalar için kaynaklarını amaçları doğrultusunda kullanmada üretim planlama ve çizelgeleme konuları önemli bir rol oynamaktadır. Planlamanın öne çıkmasını sağlayan en önemli nokta zamanında üretim yaparak müşteri memnuniyetini sağlamak aynı zamanda gelecek siparişler için müşterilerden talepleri toplayarak rakip firmaların önüne geçilmesini hedeflemektir.

Bu çalışmada, bir konfeksiyon firmasının dikiş bölümü ele alınmış olup, temel olarak sweatshirt ve tişört üretimi gerçekleştirilmektedir. Üretim süreçleri, yalın üretim prensiplerine uygun olarak seri üretim hatları şeklinde tasarlanmıştır. Bu üretim hatlarında dikiş açısından farklılık gösteren ürün tipleri sınırlı olup, ağırlıklı olarak seri üretime dayalı bir üretim modeli benimsenmiştir. Seri üretim yaklaşımı, firmaya önemli ölçüde kârlılık sağlamakla birlikte, müşteri memnuniyetinin en üst düzeyde tutulması gerekmektedir. Bunun temel nedeni, firmanın çalıştığı müşterilerin sürekli ve düzenli sipariş verebilmesi için istenilen kalite ve teslim süresine uyumun kritik bir faktör olmasıdır. Bu bağlamda, firmanın karşılaştığı en büyük problemlerden biri, müşteri tarafından talep edilen kalite standartlarına ve teslimat sürelerine

uygun üretim yapmaktır. Zira, siparişlerin zamanında teslim edilememesi durumunda müşteri tarafından uygulanacak ceza maliyetleri söz konusu olmaktadır. Bu çalışmanın temel amacı, karmaşık bir doğrusal programlama modeli geliştirerek üretim çizelgelemesini optimize etmek ve sipariş gecikmelerini en aza indirmektir. Geliştirilen model ile, müşteri taleplerine zamanında ve yüksek kalite standartlarında yanıt verilerek, işletmenin rekabet gücünün artırılması hedeflenmektedir.

Üretim çizelgeleme konusu, tek makine çizelgeleme, paralel makine çizelgeleme, akış tipi atölye çizelgeleme, atölye tipi çizelgeleme, grup tipi çizelgeleme ve dolaşimli sabit atölye çizelgeleme olmak üzere alt parçalara ayrılmaktadır. Paralel makine çizelgeleme, birden fazla aynı işi yapan makinenin olduğu üretim sistemine denir [1]. Paralel makine çizelgeleme, aynı zamanda tek makine çizelgelemenin daha genişletilmiş karmaşık hali olarak da bilinmektedir. İşlerin hangi makineye hangi sırada atanacağını belirleyerek daha etkin bir sonuç bulma çabasıdır.

Çizelgeleme problemleri ile ilgili literatüre baktığımızda çoğunlukla siparişlerin bölünmediği varsayılmıştır. Ancak siparişlerin bölünmesine izin veren üretim planları, tam zamanında teslimatta önemli iyileştirmeler sağlamaktadır [2]. Bu sayede müşterinin işletmelere olan güveni, siparişlerin sürdürülebilirliğini artırmaktadır. Siparişlerin bölünerek uygun üretim hatlarına atanması siparişlerin gecikmesini önlemeyi sağlamakta ve son

işin tamamlanma süresini kısaltarak üretim hatlarındaki boş olma durumunu ortadan kaldırıp üretim hatlarındaki doluluk oranlarını arttırmaktadır. Bu doğrultudan yola çıkarak siparişlerin hem bölünememe hem de bölünebilir olması durumları ile ilgili iki amaçlı matematiksel modeller kurulup GAMS'in CPLEX çözücüsü ile küçük boyutlu problemleri için çözülmüştür. Çok amaçlı eniyileme yöntemlerinden Ağırlıklı Toplam ve Epsilon Kısıt Yöntemi kullanılarak pareto yüzeyde bulunan noktalarda kıyaslama yapılmıştır. Paralel makine çizelgeleme problemlerinde, farklı performans kriterleri altında çeşitli çözüm yöntemleri geliştirilmiştir.

Çalışmanın ilerleyen bölümlerinde paralel makine çizelgeleme ile ilgili literatür taraması ile ilgili bilgi verilmektedir. Üçüncü bölümde ise konfeksiyon işletmesinde üretim hattı planlama probleminin tanımı yapıp matematiksel modeli anlatılmıştır. Dördüncü bölümde ise çok amaçlı yöntemler anlatılarak siparişlerin bölünme durumunda pareto yüzeydeki bulunan noktaların hangi yöntemde daha iyi olduğu açıklanmıştır. Beşinci bölümde ise örnek problem ve buna uygun gantt şeması çizilip test problemlerinden elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır. Son bölümde ise sonuç ve geleceğe dair yazılan modelin daha büyük boyutlu problemleri için öneriler sunulmuştur.

Paralel makine çizelgeleme problemlerinde makinelerin özdeş olup olmama durumu, sıra bağımlılık durumu ve bölünebilirlik durumu önem arz etmektedir. Paralel makine çizelgeleme problemleri, n iş ve m makineden oluştuğu için ve bunun sonucunda $(n!)^m$ kadar plan oluştuğundan NP-Zor problemler arasında yer almaktadır [3]. *Paralel makine çizelgeleme problemleri, hem akademik araştırmalar hem de endüstriyel uygulamalar açısından büyük önem taşımaktadır* [4]. *Gerçek dünyadaki üretim süreçlerinde, özellikle seri üretim yapan fabrikalarda ve hizmet sektöründe, kaynakların etkin kullanımı için paralel makinelerin doğru şekilde planlanması gerekmektedir* [5]. *Bu doğrultuda, çizelgeleme sürecinde dikkate alınması gereken faktörler arasında işlem süreleri, makine bakım süreleri, iş öncelikleri ve kapasite kısıtları bulunmaktadır* [6]. *Edis* [7], *Bağılantısız paralel parti üretimi yapan makine çizelgeleme problemlerinin çözümü için karma tamsayılı programlama yöntemleri uygulanmıştır. Bu çalışmalar, özellikle parti üretimi yapan sistemlerde etkin çizelgeleme stratejileri geliştirmeyi hedeflemektedir.* Tüm işler, zamanında teslimatı sağlayabilmek için, alt işlere bölünebilmektedir. İşlerin bölünmesi durumu, özellikle de paralel makinelerde, literatürde nadiren çalışılmıştır. Problemin NP-zor yapısından dolayı, gerçek hayata dair, büyük boyutlu problemlerin çözümü için sezgisel ve meta-sezgisel yöntemler kullanılmaktadır [8]. *Villa vd.* [9], *ilişkisiz paralel makine çizelgeleme problemlerine*

ek kısıtlar ekleyerek, sezgisel yöntemleri matematiksel yöntemlerle karşılaştırmıştır.

Sezgisel yöntemler, geçerli dayanağı olan bir yöntemin izlenmesi ve belirli varsayımların yapılması ile problemin çözümüne yönelik yaklaşık sonuçlar verir [10]. Kesin çözüm yöntemleri ise eniyi çözümü garanti edebilmekle birlikte NP-zor problemlerin büyük boyutlu olanlarına istenen süre zarfında çözüm bulabilmeleri zordur [11]. Paralel makine çizelgeleme problemlerinde bulanıklık konusu da işlenmektedir [12]. Çünkü parametreler her zaman kesin ve net değildir. Öğrenme eğrileri de konularak işlerin süreleri ile ilgili veriler bulunmaktadır.

İşletmede ele alınan problemde, firmaya gelen siparişleri üretim hatlarında termin zamanına göre yerleştirmek müşteri memnuniyeti açısından önemli rol oynamaktadır. Bu nedenle siparişlerin zamanında üretimin sağlanması için siparişlerin üretim hatlarına bölünerek planlanması, bölünmeden ki planlamaya göre daha iyi bir sonuç vereceği düşünülmüştür. Üretim hattı çizelgeleme problemi literatürüne baktığımızda konfeksiyon işletmesinde paralel makine çizelgelemede, hazırlık süreli, işler 0 zamanında hazır, özdeş ve bölünebilirlik özelliğine sahip olan bir problem türüdür. *Eroğlu vd.* [8], 2014 yılında yayınladıkları makalelerinde doküma tezgahlarında ilişkisiz paralel makine üretim çizelgeleme problemini ele almışlardır. Bahsedilen konuda işlerin bölünmesi ile tamamlanma zamanını en küçüklenmesi yönünde pozitif bir etki olduğunu sezgisel algoritma ile çözümlenerek tanımlanmıştır. *Tekstil sektöründe, boyahane bölümlerinde paralel makine çizelgeleme problemleri için matematiksel modeller önerilmiş ve farklı çizelgeleme kuralları karşılaştırılmıştır. Bu çalışmalar, sektörel uygulamalarda verimliliği artırmaya yöneliktir* [13]. *Wang vd.* [14], 2016 yılındaki çalışmalarında işlerin bölünme ve öğrenme durumunu ele alarak işlerin tamamlanma süresini en küçüklemişlerdir. *Eroğlu vd.* [8], *tekstil sektöründe makinelerin arıza ve kesintilerinden dolayı işlerin bölünmesinin başlama zamanı ile gerçekte başlama zamanı arasındaki sapmayı minimize edecek bir planlama önermiştir.* *Bağılantısız paralel parti üretimi yapan makine çizelgeleme problemlerinin çözümü için karma tamsayılı programlama yöntemleri uygulanmıştır. Bakır vd. özellikle parti üretimi yapan sistemlerde etkin çizelgeleme stratejileri geliştirmeyi hedeflemektedir* [15]. *Saraç ve Tutumlu* [2], işlerin bölünmesinin, daha dengeli ve daha kısa zamanda üretim yapılmasına faydasını iki aşamalı mat-sezgisel algoritma ile göstermiştir.

Paralel makine çizelgeleme problemlerinden türetilmiş olan paralel üretim hatlarının çizelgelenmesi son zamanlarda yoğun olarak çalışılmıştır. *Saraç ve Tutumlu* [16], son işin tamamlanma zamanını yani Cenb'un en küçüklenmesi amaçlamıştır. Bunun yanı sıra toplam gecikmeyi,

geciken iş sayısını ve kullanılan makine sayısını enküçüklemekte amaçlar arasında yer almaktadır. Sıra bağımlı, hazırlık süreli, özdeş ve özdeş olmayan paralel makine problemleri çeşitli versiyonlar ile ele alınmıştır. Tablo 1’de verilen literatür taramasında özet bir şekilde paralel makine probleminde kullanılan yöntemler, amaçlar ve bölünme durumu göz önüne alınarak bir literatür taranması yapılmıştır.

Literatür taraması için yapılan tabloya baktığımızda amaç fonksiyonu olarak en çok Cenb en küçüklemektir. Tek amaçlı makalelerde ise daha çok sezgisel yöntemler kullanılmıştır. Bu yöntemlerden bazıları, *Arnaout*, karınca sürüsü algoritması [17], *Cota*, adapte edilmiş komşu yerel arama algoritması [18], *Abreu ve Prata* genetik algoritma ile komşu arama yaklaşımı [19], ile karşımıza çıkmaktadır. *Wang vd.* [20], tek amaçlı modelleme ile Hibrit evrimsel yaklaşım algoritmasını işlerin bölünmesine göre kullanmıştır. *Paralel makineli üretim sistemlerinde, Karınca Kolonisi Optimizasyonu (Ant Colony Optimization) gibi sezgisel yöntemler kullanılarak çizelgeleme problemlerine çözümler üretilmiştir* [21]. Bu yöntemler, özellikle [13] büyük ve karmaşık problemlerde etkin sonuçlar vermektedir. Literatüre baktığımızda, paralel üretim hattı çizelgeleme problemlerinde en çok, işlerin maksimum tamamlanma süresinin en küçüklenmesinin ardından teslim zamanının en küçüklenmesiyle ilgili çalışmaların yapıldığını görmekteyiz. Ancak genellikle bu iki amaç fonksiyonu tek tek ele alınmıştır. Çok amaçlı programlama kullanılan makalelerde de bölünme durumu nadir kullanılmıştır. Şekil 1 ‘de tek amaçlı ve çok amaçlı modellemedeki bölünebilirlik durumu gösterilmiştir. *Çok amaçlı modelleme tekniklerinde ise en çok ağırlıklı toplam yöntemi kullanılmıştır. Örneğin, toplam ağırlıklı tamamlanma zamanını en küçükleyen modeller ve algoritmalar literatürde geniş yer bulmaktadır* [22]. AHP teknikleri ile normalize edilmiş olup ağırlıklı toplam yöntemi kullanılmıştır [23]. *Kaya ve Karaçizmeli* [24], *Solamani, Akyol ve Saraç* [25, 22] ve *Carvalho ve Nascimento* [26] ağırlıklı toplam yöntemi uygulamıştır. [27], *Ceylan vd.*, hedef programlama teknikleri ile katsayıları ağırlık verilerek amaçları minimize etmiştir. [2] *Saraç ve Tutumlu* Epsilon kısıt yöntemi uygulamıştır. [28] *Ostovar*, maliyeti ve tamamlanma süresini enküçüklemiştir. Şekil 1’ de tek amaçlı ve çok amaçlı modellerin bölünebilirlik durumu gösterilmiştir.

2. Problemin Tanımı

Çalışmanın yapıldığı tekstil firması, ülkemizde fason üretim yapan birçok firma ile çalışmakta olup yurt dışına ihracat yapmaktadır. Siparişler, işletmenin üretim kapasitesine göre sezonlara uygun bir şekilde belirli aralıklarla gelmektedir. Bu siparişlerin üretimi için işletme kumaş alımından yardımcı malzeme alımına kadar tedarik sağlamaktadır. Gerekli iş gücü için ise fason veya kendi bünyesinde sipariş üretimini gerçekleştirmektedir. Firma, Türkiye’deki tekstil

sektöründe öncü firmalardan biridir. Birçok ünlü giyim markasına üretim yapmakta olup daha çok seri üretim yapılacak ürün grupları ile çalışılmaktadır. Basic t-shirt, short, polo t-shirt gibi spor giyim ürünleri çalışmaktadır. Tekstilde hazır giyim, yoğunlaşan ve zaman baskısı artan insan hayatına değer kattığı için sürekli değer kazanan bir sektördür. Barınma beslenme gibi giyinme de insan için temel bir ihtiyaçtır. Türkiye’de tekstil sektörü, dünya çapında üretim yaptığı için hazır giyim açısından büyük önem arz etmektedir. Gerek iş gücü ucuzluğu gerekse pazarlama durumu göz önüne alındığında Türkiye, dünya çapında üretim yapılmasının tercih sebeplerindendir.

Firma iplik üretiminden, kumaş boyamaya, kumaş boyamadan hazır giyim dikim aşamasına kadar siparişlerini yönetmektedir. Firma tüm bu siparişleri yönetirken ERP ve MRP programları kullanılmaktadır. MRP programları müşteri temsilcileri ile bağlantılıdır. Firmaya tedarik edilmesi gereken Konfeksiyon Yardımcı Malzeme (KYM) bilgileri yüklenip tedarigi bu şekilde sağlanmaktadır. Böylelikle üretilen ürünler, orijinal malzeme kullanarak kalite standartlarına uygun şekilde üretilmektedir.

Uygulama, tekstil firmasının konfeksiyon bölümünde kesili beden olarak gelen siparişlerin koli kapanana kadar ki sürecini kapsamaktadır. Siparişler için verilen üretim dakikasına ve teslim zamanına göre üretim planlama yapılmasını hedeflemektedir. Firma gelen siparişleri ilgili fason firmaya veya bünye içerisindeki üretim hatlarına kapasite yükü olarak atamaktadır. Daha sonra siparişler için gerekli KYM bilgisi, dikiş detayı incelenip gerekli numune, malzeme tedarigi ve kesili bedenler hazırlık ekibi ile sağlanarak üretim konfeksiyon alanına sevk edilir. Bu işlemler arasında makine bakım bölümü de üretim hattındaki şeflerle birlikte ihtiyaç duyulan makineleri ayarlayarak üretim hatlarını hazırlamaktadır. Siparişlerdeki kesili bedenler, konfeksiyon yardımcı malzemeleri ile üretim hattına sipariş adetinin yüzde 3 firesi ile gelerek üretime alınmaya başlanır. Bunun öncesinde üretilen siparişlerin kaliteli çıkabilmesi için beş tane ürün ön dikim olarak yapıp kalite onayı alınarak üretime koyulmaktadır. Bu kalite onayının alınması için dikilen ürünler endirekt elemanları kalite kontrol elemanları ve şefi ile yapılır.

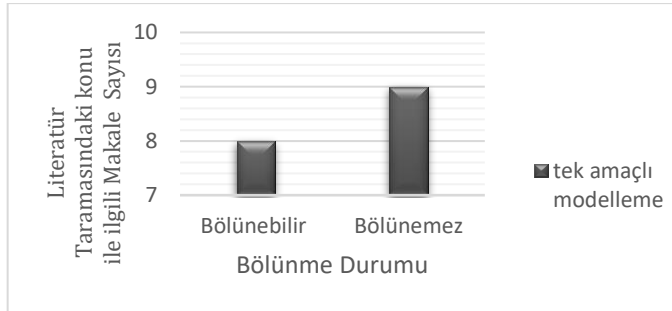
Tablo 1. Literatür Tablosu.

Yıl	Yazar	Amaç	Yöntem	Bölünebilirlik
2012	[20] Wang vd.	C_{enb} en küçükleme	Hibrit Diferansiyel algoritması	✓
2014	[8] Eroğlu vd.	C_{enb} en küçükleme	Genetik Algoritma	✓
2014	[12] Yeh vd.	C_{enb} en küçükleme	Benzetilmiş tav/ Genetik alg.	X
2015	[29] Canıyılmaz vd.	C_{enb} en küçükleme	Yapay arı kolonisi algoritması	X
2016	[14] Wang vd.	C_{enb} ve Min_T , i en küçükleme	B&B Algoritması	✓
2017	[22] Akyol vd.	Min_T , i en küçükleme	Hibrit Diferansiyel Evrim algoritması	X
2017	[18] Cota vd.	C_{enb} en küçükleme	Macar, Komşu ve Benzetilmiş arama	X
2018	[23] Tapkan vd.	Çalışma süresi ve C_{enb} en küçükleme	Karma tamsayılı/ Gams	X
2018	[9] Villa vd.	C_{enb} en küçükleme	Beş aşamalı metasezgisel /C# Programı	X
2018	[24] Kaya vd.	C_{enb} ve C_{ort} en küçükleme	Yerel arama algoritması	X
2019	[27] Ceylan vd.	C_{enb} ve Min_T , i en küçükleme	Karma tamsayılı/ Gams/Lekin	X
2020	[30] Kim vd.	Min_T , i en küçükleme	Benzetilmiş tavlama ve genetik algoritma	✓
2020	[25] Soleimani vd.	Min_T , i ve Enerji tüketimini min.. etme	Kedi sürü optimizasyon ve Karma tamsayılı	X
2020	[17] Arnaout	C_{enb} en küçükleme	Solucan opt. Alg.	X
2021	[31] Lee vd.	C_{enb} en küçükleme	Genetik algoritma	✓
2021	[32] Çalışkan vd.	C_{enb} en küçükleme	Mat sezgisel /Pyhton Programı	X
2021	[33] Li vd.	Kar planı enbüyüklenme	Diferansiyel Hibrit Yaklaşımı	X
2021	[2] Saraç ve Tutumlu	C_{enb} ve Σa_i en küçükleme	Çok amaçlı matsezgisel algortima	✓
2023	[26] Carvalho vd.	Makine kurulum süresi, envanter maliyetini en küçükleme	Karma tamsayılı/ Gams	X
2023	[10] Kılıç	C_{enb} en küçükleme	Yerel ve Komşuluk Arama	X
2023	[34] Mourtos vd.	C_{enb} en küçükleme	İki aşamalı aç gözlü algoritma	✓
2023	[35] Chua vd.	Kar planı enbüyüklenme	Gelir oranı sezgisel yöntemi	✓
2024	[36] Duran vd.	Σa_i en küçükleme	Uyarlanabilir komşu alg.	X
2024	[37] Elyasi vd.	Min_T ve sapma en küçükleme	Emperyalist Rekabet Alg.	X
2024	[38] Lv vd.	C_{enb} en küçükleme	Erken yakınsama harris şahin alg.	X
2024	[28] Ostovaria vd.	Maliyet ve C_{enb} küçükleme	GAMS/CPLEX Çok amaçlı programlama	X

C_{enb} : İşlerin maksimum tamamlanma süresi

Min_T : İşlerin gecikmesinin minimize etme

Σa_i : Toplam makine sayısı

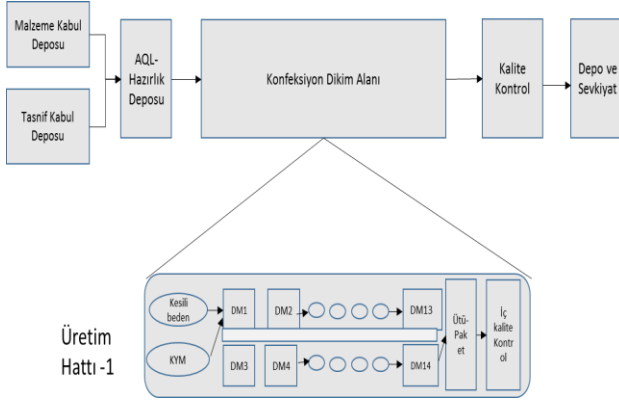


Şekil 1. Literatür taramasındaki konu ile ilgili tek amaçlı makalelerde bölünebilirlik durumu



Şekil 2. Literatür taramasındaki konu ile ilgili çok amaçlı makalelerde bölünebilirlik durumu

Onayı alınmayan siparişler üretime verilememektedir. Tüm bu bahsedilen aşamalar sipariş için gerekli hazırlık süresi işlem süresi ve teslim süresini kapsamaktadır. Şekil 2' de üretim hatlarının hazırlık ile bitmiş ürün arasındaki durumu gösterilmiştir.



Şekil 3. Konfeksiyon Üretim hattı

Ele alınan problem, firmanın işlettiği konfeksiyon dikim bölümüne sahip olan fason firmadaki üretim planlama süreci göz önüne alınarak tanımlanmıştır. Fason firmaya gönderilen işin zamanında teslim edilebilmesi için öncelikle doğru iş yükünün tanımlı olması gerekmektedir. İşletmede net bir üretim çizelgeleme yapılamadığı için gönderilen iş yüküne göre üretim yapılarak gerekli hazırlık süreleri göz ardı edildiğinde fason firma teslimatta gecikme yaşamakta bu da müşteri memnuniyetsizliğine sebep olmaktadır. Bu nedenle siparişlerin teslim zamanına yetişmesi için işlem süreleri ve hazırlık süreleri de ele alınarak en kısa tamamlanma süresi ile siparişlerin çizelgelenmesi amaçlanmıştır. Siparişlerin gecikmesini önlemek amacıyla siparişlerin bölünmesi durumu da incelenmiştir. Ancak işlerin birden fazla üretim hattına bölmek kalite sorunlarını da beraberinde getirmektedir. Bu durumda geliştirilen modelde kaliteden ödün vermemek için işlerin en fazla iki parçaya bölünmesine izin verilmiştir.

2.1. İki amaçlı matematiksel model

Paralel üretim hattı çizelgeleme probleminde üretim hatları makinaları, siparişler ise işleri temsil etmektedir. Fason işletmeye gelen n tane sipariş, sıfırıncı zamanda üretime hazırdır. Siparişlerin işlem süreleri, hazırlık süreleri ve teslim zamanları bilinmektedir. Siparişlerin atanacağı üretim hattında ise özdeş ve paralel olma durumu söz konusudur. Üretimde n adet sipariş ($i=1, 2, \dots, n$) ve h adet üretim hattı ($O=1, 2, \dots, h$) mevcuttur.

Çalışmada ilk olarak üretim hatlarında işlerin bölünmesine izin verilmediği durum, literatürde Tutumlu ve Saraç (2021) tarafından verilen matematiksel modellerden yararlanılarak *konfeksiyon işletmesine* uyarlanmıştır. Matematiksel modeller kurulurken başlangıç hazırlık süreleri dikkate alınmamıştır. Problemde termin süreleri müşteri

tarafından belirlendiği için gecikmeler istenmemektedir. Üretimler sipariş bazlı olup doğrudan müşteriden gelen talebe göre yapılmaktadır. Fason firmada stoka üretim yapılmamaktadır.

Problem, özdeş h adet üretim hattında siparişler arasında hazırlık süresi bulunmaktadır. Hazırlık süresi sıra bağımlı değildir. Çünkü firma aynı stilde ürün dikmektedir. Basic t-shirt üretimi yapıldığı ve farklı stile geçilmediği için hazırlık süresi sıradan bağımsızdır. Amaç fonksiyonları eş zamanlı olarak C_{enb} ve toplam gecikmeyi enküçüklemeyi amaçlamaktadır. İki amaçlı matematiksel model izleyen şekilde tanımlanmıştır.

Model 1: Siparişlerin Bölünemediği Durumda Paralel Üretim Hattı Çizelgeleme Modeli

Kümeler:

$N = \{1, 2, \dots, n\}$ sipariş kümesi,
 $O = \{1, 2, \dots, h\}$ hat kümesi,

İndisler:

$i, j \in N$ sipariş indisi,
 $l \in N$ sıra indisi,
 $k \in O$ hat indisi,

Parametreler:

n : sipariş sayısı,
 h : hat sayısı,
 p_{ik} : i . siparişin k . hattaki işlem süresi,
 d_i : i . siparişinin teslim zamanı,
 M : çok büyük pozitif bir sayı,
 s_{ik} : i . siparişin k . hattaki hazırlık süresi,

Karar Değişkenleri :

C_i : i . siparişin tamamlanma zamanı,
 C_{enb} : h adet hat içinden son siparişin tamamlanma zamanı,
 T_i : i . siparişinin gecikmesi ($T_i = \max\{C_i - d_i, 0\}$),
 y_{ikl} = eğer i . sipariş k . hatta l .sıraya çizelgelendiyse 1; diğer durumlarda 0,

$$\text{Enk } f_1 = C_{enb} \quad (1)$$

$$\text{Enk } f_2 = \sum_{i=1}^n T_i \quad (2)$$

1. ve 2. fonksiyonlar, sırasıyla siparişlerin enbüyük tamamlanma süresini ve toplam gecikme süresini enküçükleyen amaç fonksiyonlarıdır.

$$C_{enb} \geq C_i, \quad \forall i, \quad (3)$$

3. eşitsizlik i . siparişin tamamlanma zamanı C_{enb} 'den küçük olmalı kısıtlarıdır.

$$\sum_{i=1}^n y_{ikl} \leq 1, \quad \forall (k, l) \quad (4)$$

4. eşitsizlik her hattaki her sıraya da en fazla 1 sipariş atanmalı kısıtlarıdır.

$$\sum_{k=1}^h \sum_{l=1}^n y_{ikl} = 1, \forall i \quad (5)$$

5. eşitlik, her siparişin bir hatta ve bir sıraya atanmasını sağlama kısıtlarıdır.

$$\sum_{i=1}^n y_{ikl} - \sum_{j=1}^n y_{jkl-1} \leq 0, \forall (k,l), l > 1 \quad (6)$$

6. eşitsizlik siparişlerin sıra atlamadan sıralanmasını sağlama kısıtlarıdır.

$$C_i + M(1 - y_{ikl}) \geq s_{ik} + p_{ik}, \forall (i, k), l=1, \quad (7)$$

$$C_i - M(1 - y_{ikl}) \leq s_{ik} + p_{ik}, \forall (i, k), l=1, \quad (8)$$

7. ve 8. Eşitsizlikler, ilk hatta atanan ilk siparişin tamamlanma zamanı işlem süresi ile hazırlık süresi toplamı kadar olmalı kısıtlarıdır.

$$C_i + M(2 - y_{ikl} - y_{jk1-1}) \geq C_j + p_{ik}, \forall i \neq j, \forall k, l > 1, \quad (9)$$

$$C_i - M(2 - y_{ikl} - y_{jk1-1}) \leq C_j + p_{ik}, \forall i \neq j, \forall k, l > 1, \quad (10)$$

$$T_i \geq C_i - d_i, \forall i \in N \quad (11)$$

11. eşitsizlik, siparişlerin gecikmelerini hesaplayan kısıtlardır.

$$C_{enb} \geq 0, \forall i \quad (12)$$

$$T_i \geq 0, \forall i \quad (13)$$

$$y_{ikl} \in \{0,1\}, \forall i \quad (14)$$

$$C_i \geq 0, \forall i \quad (15)$$

12-15. eşitsizlikler, karar değişkenlerinin işaret kısıtlarıdır.

Yukarıda tanımlanan matematiksel modele istinaden işlerin bölünebilirliğinin amaç fonksiyonlarına etkisini incelemek için Model 2 geliştirilmiştir. Model 2 'de işlerin bölünmesine izin verilerek amaç fonksiyonu değerleri iyileştirilerek müşteri memnuniyetinin artırılması amaçlanmıştır. Siparişlerin tamamlanma süresinin ve toplam gecikmenin azalması firmaya karlılık açısından fayda sağlayacaktır. Ancak geliştirilen modelde siparişlerin

en fazla ikiye bölünmesinin kalite açısından daha iyi olacağı varsayılmıştır. Tekstil sektöründe müşteri memnuniyeti öncelikle kaliteden ödün vermeden zamanında üretim ile sağlanır. Tekstilde konfeksiyon bölümünde dikim becerisi kişisel yatkınlığa göre değişmektedir. Kaliteli ürün dikiminin en önemli şartı ise operasyonu yapan elemanın, daimi olarak o pozisyonda çalışması el yatkınlığını ve becerisini artırır. Kalite hataları sifıra inmesi sağlanır. Siparişlerin ikiden fazla hatta bölünmesi, özellikle el işçiliğinde bireysel üretim hatalarını artırır. Ayrıca siparişlerin bölünmesi, kolilere konulan bitmiş ürünlerin üretim hatlarındaki takibini zorlaştırır. Bu nedenle ikiden fazla iş bölünmesi ve bölünen siparişler de kullanıcının verdiği belirli bir oranın altında kalması istenmemektedir.

Model 2: Siparişlerin Bölünebildiği Paralel Üretim Hattı Çizelgeleme Modeli

Model 1'e göre ek olarak tanımlanan karar değişkenleri:

a_{ik} : i . siparişin k . hatta atanma oranı,

x_{ijk} = i . sipariş j . işten önce k . hatta çizelgelenmişse 1; diğer durumda 0,

Model 1'e göre ek olarak tanımlanan parametreler:

b : siparişlerin üretim hatlarında işlenebileceği en küçük oran,

olmak üzere Model 1'in 3, 4, 5 ve 6 nolu kısıtlar olduğu gibi modele aktarılmış olup 7-10 numaralı kısıtlara da bölünebilirlik durumu eklenerek 16-19 numaralı kısıtlar şeklinde revize edilmiştir.

$$C_i + M(1 - y_{ikl}) \geq s_{ik} + p_{ik} * a_{ik}, \quad \forall (i,k), l=1, \quad (16)$$

$$C_i - M(1 - y_{ikl}) \leq s_{ik} + p_{ik} * a_{ik}, \quad \forall (i,k), l=1, \quad (17)$$

$$C_i + M(2 - y_{ikl} - y_{jk1-1}) \geq C_j + p_{ik} + s_{ik} + a_{ik}, \quad \forall i \neq j, \forall k, l > 1, \quad (18)$$

$$C_i - M(2 - y_{ikl} - y_{jk1-1}) \leq C_j + p_{ik} + s_{ik} + a_{ik}, \quad \forall i \neq j, \forall k, l > 1, \quad (19)$$

Bölünebilirlik durumuna göre de ilave problem tanımına göre eklenmesi gereken kısıtlar da aşağıdaki gibidir:

$$x_{ijk} + 1 \geq y_{ik(l-1)} + y_{ikl}, \quad \forall i \neq j, \forall k, l > 1, \quad (20)$$

$$\sum_{k=1}^h a_{ik} = 1, \quad \forall i, \quad (21)$$

$$a_{ik} \leq \sum_{k=1}^h y_{ikl}, \quad \forall (i,k), \quad (22)$$

$$a_{ik} \geq b * \sum_{k=1}^n y_{ikl}, \quad \forall (i,k), \quad (23)$$

$$\sum_{k=1}^n \sum_{l=1}^n y_{ikl} \leq 2, \quad \forall i, \quad (24)$$

$$\sum_{l=1}^n y_{ikl} \leq 1, \quad \forall (i,k), \quad (25)$$

$$x_{ijk} \in \{0,1\}, \quad \forall i, \quad (26)$$

$$a_{ik} \in \{0,1\}, \quad \forall i, \quad (27)$$

20. kısıt i . sipariş j . sipariştten hemen önce aynı hatta işlem görmüşse x_{ijk} karar değişkeninin 1 değerini almasını sağlamaktadır. 21. kısıt üretim hatlarına bölünme oranları toplamının 1 olmasını sağlar. 22. kısıt ise bölünme oranının atanma durumundan küçük olmasını sağlar. 23 numaralı kısıt ise hatlara belirlenen en küçük orandan daha az bölünmesini engeller. 24. kısıt, en fazla iki hatta atama olmasını ve 25. kısıt ise sipariş bölündüyse atanan bir sipariş aynı üretim hattına bir kez daha atanmamasını sağlar. 26 ve 27 numaralı kısıtlar ise işaret kısıtlarıdır.

2.2 Çok amaçlı eniyileme yöntemleri

Çok amaçlı eniyileme yöntemleri, birden fazla amacın olduğu matematiksel modellerde kullanılmaktadır. Çok amaçlı bir modeli tek amaçlı bir modele dönüştürmek için skalerleştirme yöntemlerinden faydalanılır. Ağırlıklı toplam, konik skalerleştirme, çeyişev skalerleştirme, epsilon kısıt ve hedef programlama gibi yöntemler yaygın olarak kullanılan yöntemlerdir [39]. Çok amaçlı eniyileme yöntemleri, karar vericinin tercih bilgisini çözüm sürecinin başında, çözüm sürecinin sonunda, etkileşimli gerektiren ve tercih bilgisi gerektirmeyen yöntemler olarak sınıflandırılabilir [39]. Bu çalışmada, Pareto yüzeyi örnekleyerek karşılaştırmak için tercih bilgisini çözüm sürecinin sonunda kullanan ve literatürde en yaygın kullanılan yöntemlerden ağırlıklı toplam ve epsilon kısıt yöntemleri kullanılmıştır. Pareto yüzey üzerinde amaç fonksiyonlarının ödünleşim durumu test problemleri için incelenmiştir.

2.1.1 Ağırlıklı toplam yöntemi

Ağırlıklı toplam yöntemi (ATY), kullanımının kolay olmasından dolayı çok amaçlı eniyilemede en yaygın kullanılan yöntemlerden birisidir. Yöntemde karar vericinin amaç fonksiyonlarına ilişkin önem tercihleri ağırlık verilerek kullanılmaktadır. Amaç fonksiyonlarına verilen ağırlıklar pozitif ve toplamı ise bir e eşit olmaktadır. ATY'den pozitif ağırlıklar için bulunan eniyi çözümlerin, Pareto çözüm olduğu ispatlanmıştır. Amaç fonksiyonu ağırlıkları arasında sıfır değeri varsa elde edilen çözüm, zayıf Pareto çözümdür [40]. Çok amaçlı matematiksel model, dış büyüklük şartını sağlıyorsa ATY ile tüm zayıf Pareto çözümleri elde etmek mümkündür [40].

İki amaçlı bir matematiksel modelin amaç fonksiyonları, $w_i \geq 0$, $i = 1, 2$ ve $\sum_{i=1}^2 w_i = 1$ olmak üzere ATY ile $Enk \sum_{i=1}^2 w_i * f_i(x)$ şeklinde birleştirilir. ATY'de $w_1=1$ ve $w_2=0$ ile $w_1=0$ ve $w_2=1$ ağırlıkları kullanılarak elde edilen çözümlere karşı gelen amaç fonksiyonu eniyi değerlerinde (en küçük değerler) oluşan ideal nokta $f^*=(f_1^*, f_2^*)$ ve en kötü değerlerden oluşan nadir nokta $f^-=(f_1^-, f_2^-)$ şeklinde gösterilmiştir. Amaç fonksiyonlarının değerlerini birimden arındırmak için normalizasyon yapılmıştır.

Çalışmadaki modellerde ise amaç fonksiyonu ağırlıklı toplam yöntemi ile aşağıdaki gibi normalize edilerek kullanılmıştır.

$$Enk \quad w_1 \frac{f_1 - f_1^*}{(f_1^- - f_1^*)} + w_2 \frac{f_2 - f_2^*}{(f_2^- - f_2^*)} \quad (28)$$

2.2.2 ε-Kısıt yöntemi

ε-Kısıt Yöntemi (EKY), yönteminde ise amaçlardan sadece bir tanesi amaç fonksiyonuna yazılır. Diğerleri ise kısıtlara atılır. Yani Model 1 ve Model 2'deki iki tane amaçtan bir tanesini dışarıda bırakıp epsilon değerinden daha küçük olacak şekilde sınırlandırılır. EKY'den elde edilen çözüm tek en iyi çözüm ise elde edilen Pareto çözümdür. Değilse zayıf pareto çözümdür. ε değeri, genellikle ideal nokta ile nadir nokta arasından seçilir. Model 1 ve Model 2'nin EKY ile çözümünde ideal ve nadir noktalar arası 10 eşit aralığa bölünerek her bir ε değeri için EKY ile (zayıf) Pareto noktalar elde edilmiştir. Çalışmada ilk amaç fonksiyonu C_{enb} fonksiyonu kısıta alınıp toplam gecikme amaç fonksiyonu enküçülenmiştir. EKY'de Pareto yüzeyi örneklemek için ε değerleri, $\varepsilon_t = f_1^- + (\frac{f_1^- - f_1^*}{10} * t)$, $t = 0,1,2,...,10$, şeklinde hesaplanmıştır [39]. EKY'nin amaç fonksiyonu $Enk f_2 = \sum_{i=1}^n T_i$ olarak olmak üzere birinci amaç fonksiyonu $f_1 = C_{enb} \leq \varepsilon_t$, $\forall t$ olacak şekilde modelin ana kısıtlarına eklenerek 11 farklı ε değeri için çözüm araştırılmıştır.

3. Deneysel Sonuçlar

Çalışmanın bu bölümünde geliştirilen iki matematiksel model, Gams/Cplex yazılımı yardımıyla çözülmeye çalışılmıştır. Deneysel çalışmada iki modelden ATY ve EKY ile elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır. Bu deneyler iki aşamada yapılmıştır. Birinci aşamada örnek problem üzerinde geliştirilen iki modelin karşılaştırılması anlatılmıştır. İkinci aşamada ise rassal oluşturulan test problemleri üzerinden önerilen modeller için çok amaçlı yöntemlerle elde edilen sonuçlar, karşılaştırmalı olarak verilmiştir.

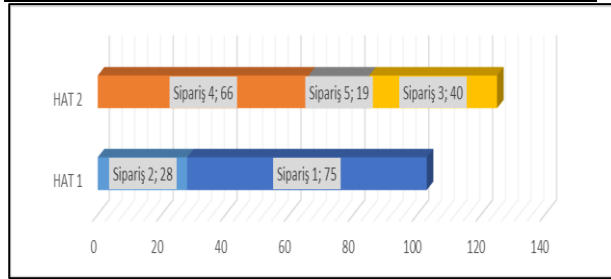
3.1 Örnek paralel üretim hattı çizelgeleme problemi ve çözümü

Örnek problemde iki üretim hattı ve beş sipariş olduğu varsayılmıştır. Örnek problemdeki işlem süreleri, hazırlık süreleri ve teslim süreleri saat olarak Tablo

2’de verilmiştir. Örnek problemdeki veriler işletmede bulunan siparişlerden rastgele seçilerek alınmıştır. Örnek problem verilerine dayalı Model 1 ve Model 2’nin $w_1 = w_2 = 0,5$ amaç fonksiyonu ağırlıkları için ATY modelleri, Gams 37 / Cplex eniyileme paket programı kullanılarak çözülmüştür. Her iki modelden elde edilen çizelgeler ve tamamlanma süreleri (C_{enb}), Şekil 3 ve Şekil 4’te Gantt diyagramı ile gösterilmiştir.

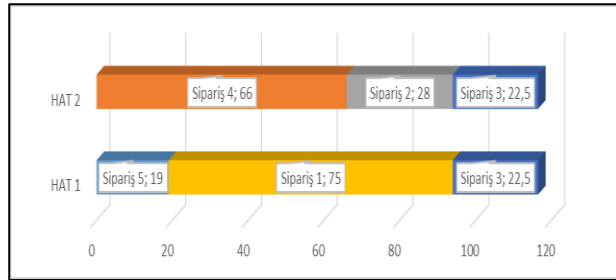
Tablo 2. Örnek Problem Verileri

Sipariş No	İşlem Süresi p_{ik} (saat)	Hazırlık Süresi s_{ik} (saat)	Teslim Süresi d_i (saat)
1	70	5	100
2	20	8	95
3	35	5	140
4	60	6	80
5	15	4	85



Şekil 4. Örnek problemin Model 1 için ATY eniyi çözümüne ait Gantt Diyagramı

Model 1’in sonuçlarına bakacak olursak C_{enb} süresi 125 saat ve toplam gecikme süresi ise 3 saat olarak bulunmuştur. 3 numaralı sipariş termin süresine yetişemeyip gecikmeye neden olmuştur.



Şekil 5. Örnek problemin Model 2 için ATY eniyi çözümüne ait Gantt Diyagramı

Model 2’nin ATY ile eniyi çözümüne karşı gelen C_{enb} değeri 116,5 ve toplam gecikme süresi, 0 olarak bulunmuştur. Model 2’nin ATY ile eniyi çözümünde 3. siparişin bölünmesi sayesinde herhangi bir gecikme olmamıştır. Bu durumda siparişlerin bölünmesi, hem siparişlerin enbüyük tamamlanma zamanında hem de toplam gecikme süresinde iyileşme sağlamıştır. Ayrıca modelde hedeflenildiği gibi de siparişlerin enbüyük bölünme oranı olan 0.4 altında bölünme yapılmadan 3. sipariş 0.5 oranında hatlara bölünmüştür. Gams/Cplex çözücüsü, her iki modelin eniyi çözümünü yaklaşık sürelerde bulmuştur.

3.2 Test problemleri ve sonuçları

Test problemleri, rassal olarak türetilmiştir. İşlem süreleri (p_{ik}), hazırlık süresi ve teslim süresi literatürde de belirtildiği gibi düzgün dağılıma göre hesaplanmıştır. İşlem süresi için [1,100] aralığı, hazırlık süresi için [1,30] aralığı ve teslim süresi için müşteri tarafından verilebilecek değerler olduğundan dolayı [1,200] aralığında düzgün dağılıma göre rassal değerler atanmıştır.

Türetilen her bir test problemine ait Model 1 ve Model 2, ATY ve EKY için GAMS/CPLEX’te modellenmiş ve çözülmüştür. Herbir test problemine ait ideal ve nadir noktaları tespit edilmiş olup pareto yüzeyde gösterimi sağlanarak amaç fonksiyonlarına göre karşılaştırılmıştır. Tüm testler Intel® Core™ i5-4460U CPU @3,20 GHz işlemcisi, 4GB Ram olan bir bilgisayardan yapılmıştır. Modelin çözüm süresi 10800 saniye ile sınırlandırılmıştır. Tablo 3’de Test problemlerinin Boyutları gösterilmiştir.

Tablo 3. Test Problemlerinin Boyutları

Test Problemi	n	m
TP-1	6	2
TP-2	6	4
TP-3	7	2
TP-4	7	4
TP-5	8	2
TP-6	8	4
TP-7	9	2
TP-8	9	4

Test Problemleri için Model 1 ve Model 2’ye ait ATY ve EKY modellerinin eniyi çözümleri, GAMS/CPLEX’de araştırılmıştır. Siparişlerin bölünme durumunun olması ve çizelgeleme modellerinin NP-zor doğası gereği ancak küçük boyutlu test problemlerinde eniyi çözüme erişilebilmiştir. Her test probleminde ATY için 11 farklı amaç fonksiyonu ağırlığı ve EKY için 11 farklı ϵ değeri için hesaplama yapılmıştır.

Tablo 4. TP1 için ATY ile Model 1 ve Model 2 için bulunan eniyi amaç fonksiyonu değerlerinin karşılaştırılması

Model 1					Model 2		
w_1	w_2	f_1	f_2	Süre (sn)	f_1	f_2	Süre (sn)
1	0	141	132	0,88	135,18	62	0,9
0,9	0,1	141	44	1,00	135,18	44	1,4
0,8	0,2	141	44	1,00	135,18	44	1,6
0,7	0,3	141	44	1,00	135,18	44	2,3
0,6	0,4	141	44	0,91	135,18	44	2,9
0,5	0,5	141	44	1,02	135,18	44	4,1
0,4	0,6	141	44	1,09	135,18	44	12,5
0,3	0,7	141	44	0,73	135,18	44	8,7

0,2	0,8	141	44	0,93	135,18	44	6,8
0,1	0,9	141	44	0,78	135,18	44	21,1
0	1	141	44	0,65	141	44	23,0

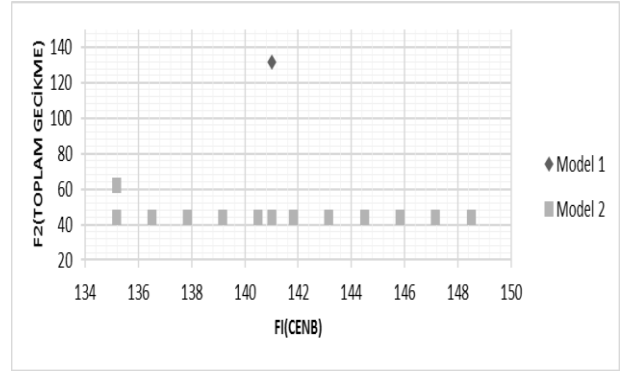
Tablo 4'teki sonuçlara bakıldığında İşlerin bölünme durumuna karşı gelen Model 2'den elde edilen sonuçların amaç fonksiyonu değerlerinde iyileşmeye sebep olduğu gözükmemektedir. Örneğin Tablo 4'te $w_1=1$ ve $w_2=0$ ağırlıkları için enbüyük tamamlanma süresi (f_1), Model 1'de 141 iken Model 2'de 135,18'e düşmektedir. Aynı şekilde toplam gecikme süresi de 132'den 62'ye düşmektedir ve diğer ağırlıklar için elde edilen değerlere bakıldığında Model 1'e göre Model 2'de enbüyük tamamlanma süresinde bir iyileşmenin olduğu gözükmemektedir. Ayrıca Model 2, Model 1'e göre çoğunlukla daha uzun çözüm süresine ihtiyaç duymaktadır.

Model 1 ve Model 2'nin 0-1 tamsayı değişkenlere sahip olmasından dolayı dışbükey olmayan uygun çözüm alanına sahiptir. EKY yöntemi, teorik olarak ATY'ye göre Pareto yüzeyde daha çok noktaya ulaşabildiği için test problemlerinin çözümünde kullanılmıştır. Model 1 ve Model 2 için EKY ile TP1 problemi için elde edilen sonuçlar Tablo 5'te verilmiştir. EKY ile Model 1 için elde edilen amaç fonksiyonu değerleri, Tablo 4'te ATY ile elde edilen değerlerin aynısıdır. Ancak Model 2 için hepsi zayıf Pareto nokta olmakla birlikte EKY ile daha çok sayıda nokta elde edilmiştir.

Tablo 5. TP1 için EKY ile Model 1 ve Model 2 için bulunan eniyi amaç fonksiyonu değerlerinin karşılaştırılması

Model 1				Model 2		
t	f1	f2	Süre (sn)	f1	f2	Süre (sn)
0	141	132	0,88	135,18	62	0,9
1	141	44	1,00	136,51	44	2,3
2	141	44	1,00	137,84	44	3,0
3	141	44	1,00	139,17	44	3,8
4	141	44	0,91	140,50	44	3,8
5	141	44	1,02	141,83	44	10,0
6	141	44	1,09	143,16	44	4,4
7	141	44	0,73	144,49	44	7,1
8	141	44	0,93	145,82	44	14,8
9	141	44	0,78	147,15	44	2,5
10	141	44	0,65	148,5	44	23,0

TP1 için Tablo 4 ve Tablo 5'te bulunan noktaların grafiği Şekil 5'te verilmiştir. Model 2'den elde edilen noktalar açık gri kare sembolü ile Model 1'den elde edilen noktalar koyu gri eşkenar dörtgen ile gösterilmiştir.



Şekil 6. TP1 için ATY ve EKY ile elde edilen noktaların grafiği

TP2 için ATY ile Model 1 ve Model 2 için bulunan eniyi amaç fonksiyonu değerlerinin karşılaştırılması, Tablo 6'da verilmiştir. TP 2 için Model 2'den ATY kullanılarak Model 1'e göre her iki amaç fonksiyonu için de daha iyi sonuçlar bulunmuştur. Model 2'nin ATY ile çözümü için gerekli süre, Model 1'e göre oldukça uzundur.

Tablo 6. TP2 için ATY ile Model 1 ve Model 2 için bulunan eniyi amaç fonksiyonu değerlerinin karşılaştırılması

Model 1					Model 2		
w1	w2	f1	f2	Süre (sn)	f1	f2	Süre (sn)
1	0	137	113	0,66	127,0	28,5	258
0,9	0,1	137	61	1,27	127,0	28,5	255
0,8	0,2	137	61	1,19	127,0	28,5	98
0,7	0,3	137	61	1,00	127,0	28,5	140
0,6	0,4	137	61	1,09	127,0	28,5	104
0,5	0,5	137	61	1,50	134,3	19,5	105
0,4	0,6	137	61	1,45	134,3	19,5	112
0,3	0,7	137	61	1,26	134,3	19,5	104
0,2	0,8	137	61	1,15	134,3	19,5	144
0,1	0,9	137	61	1,088	134,3	19,5	75
0	1	137	61	1,19	134,3	19,5	125

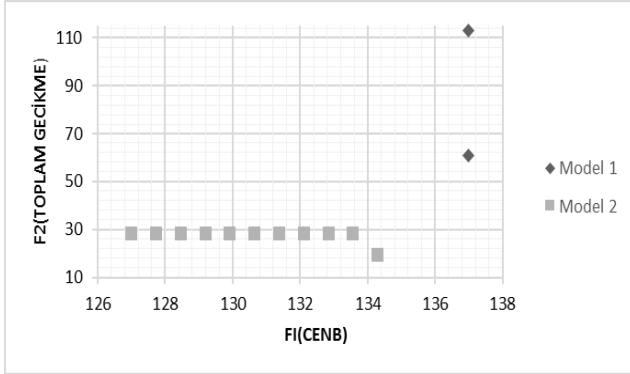
TP2 için EKY ile elde edilen sonuçların karşılaştırması Tablo 7'de verilmiştir. ATY ile EKY'den benzer sürelerde aynı zayıf Pareto noktalar bulunmuştur. Ancak Model 2 için EKY ile ATY'ye göre daha çok zayıf Pareto nokta bulunmuştur. Model 2'nin çözüm süresi olarak EKY, ortalama olarak ATY'den daha azdır.

Tablo 7. TP2 için EKY ile Model 1 ve Model 2 için bulunan eniyi amaç fonksiyonu değerlerinin karşılaştırılması

Model 1				Model 2		
t	f1	f2	Süre (sn)	f1	f2	Süre (sn)
0	137	113	0,66	127,0	28,5	131,0
1	137	61	1,27	127,7	28,5	69,0
2	137	61	1,19	128,4	28,5	109,9
3	137	61	1,00	129,1	28,5	204,7
4	137	61	1,09	129,9	28,5	74,2
5	137	61	1,50	130,6	28,5	76,7

6	137	61	1,45	131,3	28,5	75,2
7	137	61	1,26	132,1	28,5	73,6
8	137	61	1,15	132,8	28,5	123,8
9	137	61	1,08	133,5	28,5	76,4
10	137	61	1,19	134,3	19,5	90,0

TP2 için Tablo 6 ve 7’de verilen noktaların grafiği, Şekil 6’da verilmiştir. Model 2’den elde edilen noktaların, Model 1’den elde edilenlere baskınlığı daha net gözükmemektedir.



Şekil 7. TP2 için ATY ve EKY ile elde edilen noktaların grafiği

TP3 için ATY ve EKY ile bulunan sonuçlar, Tablo 8 ve Tablo 9’da verilmiştir. Tablo 8’de verilen ATY sonuçlarına bakıldığında Model 2’den elde edilen amaç fonksiyonu değerlerinin, Model 1’den elde edilenlere baskın olduğu söylenemez. Ancak Tablo 9’da verilen EKY sonuçlarına bakıldığında t’nin 5 ve daha büyük değerleri için Model 2, Model 1’e göre her iki amaç fonksiyonu için de daha iyi değerler üretmiştir. Model 2, TP1 ve TP2’de olduğu gibi Model 1’e göre çok daha fazla çözüm süresine ihtiyaç duymuştur. TP3’te farklılık Model 2’nin EKY ile çözüm süresinin ATY’ye göre oldukça düşük olmasıdır.

Tablo 8. TP3 için ATY ile Model 1 ve Model 2 için bulunan eniyi amaç fonksiyonu değerlerinin karşılaştırılması

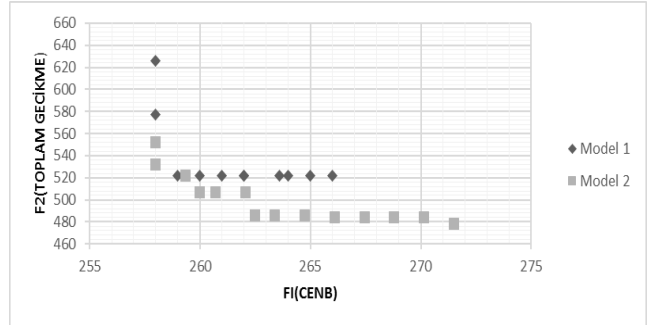
Model 1					Model 2		
w1	w2	f1	f2	Süre (sn)	f1	f2	Süre (sn)
1	0	258	577	6,50	258,0	577,0	4250
0,9	0,1	258	532	5,05	258,0	532,0	4124
0,8	0,2	258	532	5,8	258,0	532,0	2624
0,7	0,3	258	532	5,5	258,0	532,0	3038
0,6	0,4	258	532	5,6	258,0	532,0	3024
0,5	0,5	259	522	5,7	260,00	507,00	2988
0,4	0,6	259	522	6,5	262,50	485,50	2690
0,3	0,7	259	522	6,6	262,50	485,50	2514
0,2	0,8	259	522	8,1	262,50	485,50	3510
0,1	0,9	259	522	8,0	262,50	485,50	2564
0	1	266	522	5,25	271,50	478,00	4176

Tablo 9. TP3 için EKY ile Model 1 ve Model 2 için bulunan eniyi amaç fonksiyonu değerlerinin karşılaştırılması

Model 1				Model 2		
t	f1	f2	Süre (sn)	f1	f2	Süre (sn)
0	258	577	6,5	258	577	1182
1	258,8	532	6,2	259,35	522	250

2	259,6	522	6,1	260,70	507	192
3	260,4	522	6,2	262,05	507	107
4	261,2	522	6,2	263,4	486	127
5	262	522	6,3	264,75	485,5	859
6	262,8	522	5,7	266,1	484,5	911
7	263,6	522	6,3	267,45	484,5	807
8	264,4	522	6,2	268,80	484,5	799
9	265,2	522	6,0	270,15	484,5	1082
10	266	522	5,3	271,5	478	2710

TP3 test problemi verileri için Model 1 ve Model 2’den elde edilen ve Tablo 8 ve 9’da verilen noktaların grafiği Şekil 7’te gösterilmiştir. TP 3 için Model 2’den elde edilen noktaların bazıları, Model 1’den elde edilen noktalara baskın olmakla birlikte tümüyle Model 2 daha iyidir diyemeyiz.



Şekil 8. TP3 için ATY ve EKY ile elde edilen noktaların grafiği

TP4 için Model 1 ve Model 2’de ATY ve EKY ile aynı ağırlık ve ϵ değerleri için çözüm yapılmıştır. Şekil 8’de TP4 için elde edilen noktalar gösterilmiştir. Model 2’den elde edilen noktalar, Model 1’den elde edilen tüm noktalara baskındır.

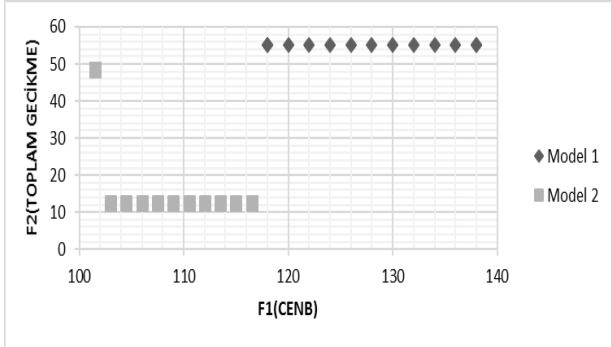
Tablo 10. TP4 için ATY ile Model 1 ve Model 2 için bulunan eniyi amaç fonksiyonu değerlerinin karşılaştırılması

Model 1					Model 2		
w1	w2	f1	f2	Süre (sn)	f1	f2	Süre (sn)
1	0	118	55	6,00	101,50	48,50	4602
0,9	0,1	118	55	6,00	102,50	12,50	2603
0,8	0,2	118	55	6,00	102,50	12,50	2485
0,7	0,3	118	55	6,00	102,50	12,50	2087
0,6	0,4	118	55	6,00	102,50	12,50	2372
0,5	0,5	118	55	6,00	102,50	12,50	2450
0,4	0,6	118	55	6,00	102,50	12,50	2412
0,3	0,7	118	55	6,00	102,50	12,50	2387
0,2	0,8	118	55	6,00	102,50	12,50	2425
0,1	0,9	118	55	6,00	102,50	12,50	5108
0	1	138	55	6,00	116,50	12,50	6103

Tablo 11. TP4 için EKY ile Model 1 ve Model 2 için bulunan eniyi amaç fonksiyonu değerlerinin karşılaştırılması

Model 1				Model 2		
t	f1	f2	Süre(sn)	f1	f2	Süre(sn)
0	118	55	6,00	101,50	48,50	4602

1	120	55	6,00	103,00	12,5	1465
2	122	55	6,00	104,50	12,5	1650
3	124	55	6,00	106,00	12,5	1453
4	126	55	6,00	107,50	12,5	1560
5	128	55	6,00	109,00	12,5	2401
6	130	55	6,00	110,50	12,5	2510
7	132	55	6,00	112,00	12,5	2610
8	134	55	6,00	113,50	12,5	2415
9	136	55	6,00	115,00	12,5	2787
10	138	55	6,00	116,50	12,5	6103



Şekil 9. TP4 için ATY ve EKY ile elde edilen noktaların grafiği

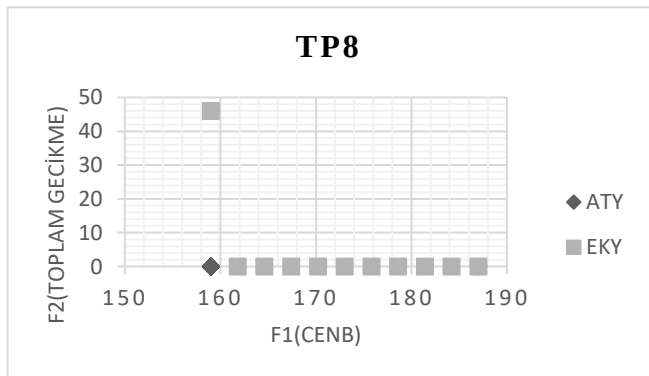
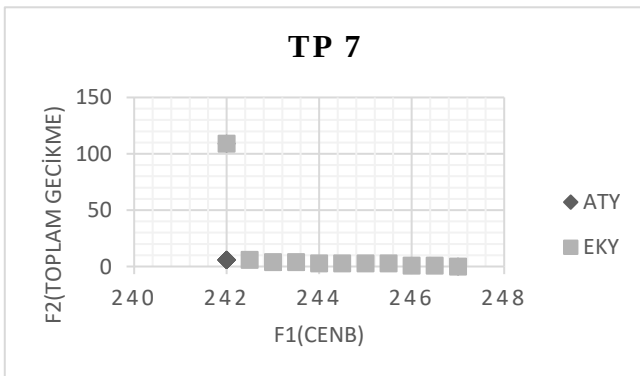
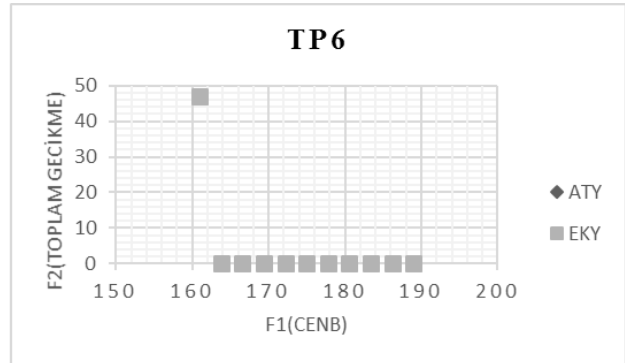
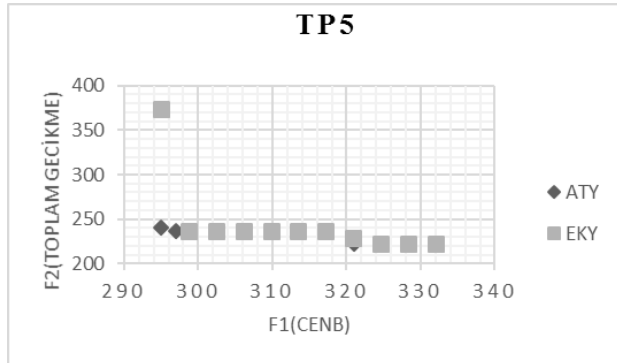
TP5, TP6, TP7 ve TP8’de ise Model 2 için eniyi çözüm, GAMS/CPLEX yardımıyla 10800 saniyede bulunamamıştır. Model 1 için eniyi çözümler bulunup,

Tablo 8’de ideal ve nadir çözüm noktaları ve Şekil 9’da ATY ve EKY ile bulunan noktaların karşılaştırmaları gösterilmiştir.

Tablo 12. TP5, TP6, TP7 ve TP8 için bulunan ideal ve nadir noktalar

	TP5	TP6	TP7	TP8
f_1^*	295	161	138	159
f_1^-	332	189	116,5	187
f_2^*	374	47	55	46
f_2^-	222	0	12,5	0

Şekil 9’daki grafiklerden EKY ile Pareto yüzeyde daha çok noktanın elde edildiği gözükmemektedir. Bununla birlikte EKY ile elde edilen noktaların çoğunluğu zayıf Pareto nokta, bir amaç fonksiyonu değerine göre diğer Pareto noktalardan en az birisine eşit diğer amaç fonksiyonu değerine göre daha büyük olan noktalardır. Ayrıca TP5’te ATY ile elde edilen noktaları aşağıdan destekleyen kesikli çizgi ile gösterilen doğru parçasının üstünde EKY ile elde edilen noktalar vardır. Bu noktaların ATY ile elde edilmesi mümkün değildir. Bu yönüyle EKY’nin ATY’ye teorik olarak üstünlüğü uygulamada da gözükmemektedir.



Şekil 10. TP5,TP6, TP7 ve TP8 ‘de Model 1 için ATY ve EKY ile elde edilen noktaların Karşılaştırılması

4. Tartışma ve Sonuç

Bu çalışmada konfeksiyon işletmesinde ilişkisiz paralel üretim hattı çizelgeleme probleminde son

işin tamamlanma zamanının ve toplam gecikme süresinin eşzamanlı olarak enküçüklemesi amaçlanmıştır. Konfeksiyon işletmelerinde ilişkisiz paralel üretim hattı çizelgelemenin çok amaçlı

optimizasyon açısından incelendiği ilk çalışmalar arasında yer almaktadır. Literatürde işlerin bölünmesi ile ilgili az sayıda çalışma bulunmasına rağmen, bu çalışmada iş bölünmesi detaylı olarak modellenmiş ve test edilmiştir. Bunun için iki model geliştirilmiştir.

Birinci modelde siparişlerin bölünemediği varsayılmıştır. İkinci modelde ise siparişlerin en fazla ikiye bölünebildiği durum ele alınmıştır. İkinci modelde siparişlerin üretim hatlarına bölünmesi sağlanarak hem toplam gecikme süresinin hem de siparişlerin tamamlanma süresinin azaltılması amaçlanmıştır. Literatürde konfeksiyon işletmesinde ilişkisiz paralel üretim hattı çizelgelemenin çok amaçlı yöntemlerle kıyaslanıp bölünme durumunu inceleyen çalışmaya rastlanmamıştır. Çok az sayıda olsa da işlerin bölünmesi ile ilgili çalışmalar yapılmıştır. Çalışmada iki amaçlı model önerisi ve iki farklı çok amaçlı optimizasyon yöntemiyle kıyaslamalar yapılmıştır. Konfeksiyon işletmesinde önerilen modelleri üzerinde ATY ve EKY yöntemlerinin etkinliğini değerlendiren bir çalışma olması açısından yenilikçi bir yaklaşım sunmaktadır.

Bu yönleriyle çalışma, hem ilişkisiz paralel üretim hattı çizelgeleme probleminin çözümü hem de iş bölünmesinin etkilerini analiz etmesi açısından literatüre önemli katkılar sunmaktadır. Aynı zamanda çalışmanın literatürdeki diğer makalelerden farkı paralel makine çizelgeleme problemi paralel üretim hattı çizelgeleme olarak geliştirilmiştir. Bu sayede ise konfeksiyon işletmesinde daha hızlı ve kesin olan bir sipariş çizelgesi oluşturulmuştur. İşlerin bölünmemesi ve bölünebilir olması durumları Pareto yüzey yardımıyla karşılaştırılmış ve Tamamlanma süresi ile Toplam gecikme süresi amaçlarının ödünleşimleri analiz edilebilmektedir. Önerilen iki amaçlı modellerin test edilmesi için on adet rassal test problemi türetilmiştir. Türetilen test problemleri, çok amaçlı programlamada yaygın olarak kullanılan ATY ve EKY yöntemleri ile onbir ağırlık ve ε değeri ile çözülmüştür. Elde edilen sonuçlar, Model 1 ve Model 2 için karşılaştırılmıştır. Model 2'nin amaç fonksiyonlarında önemli iyileştirmeler sağladığı görülmüştür. Ayrıca, Model 2'nin eniyi çözümü 10800 saniyede bulunamayan TP5 ve daha büyük boyutlu test problemlerinde Model 1'den elde edilen sonuçlar, ATY ve EKY için karşılaştırılmıştır. EKY'nin hem ATY'den daha fazla Pareto noktası örnekleyebildiği hem de ATY'nin bulamayacağı noktaları verdiği gözlemlenmiştir. Çalışmada çözülen test problemleri, küçük boyutlu problemler olmasının nedeni, ilişkisiz paralel üretim hattı çizelgeleme probleminin, NP-Zor sınıfında yer almasıdır. GAMS/Cplex çözücüsü, Model 2 kullanıldığında TP5 ve daha büyük boyutlu; TP3 kullanıldığında TP8'den daha büyük boyutlu problemlerde eniyi çözümü 10800 saniyede

bulamamıştır. Çalışmanın devamında daha büyük boyutlu problemlerin çözülmesi için sezgisel veya meta-sezgisel yöntemler kullanarak literatüre katkı sağlanması düşünülmektedir. Ayrıca önerilen iki amaçlı modeller, daha farklı çok amaçlı eniyileme yöntemleriyle kıyaslanabilir.

Etik Beyanı/Declaration of Ethical Code

Bu çalışmada, "Yükseköğretim Kurumları Bilimsel Araştırma ve Yayın Etiği Yönergesi" kapsamında uyulması gerekli tüm kurallara uyulduğunu, bahsi geçen yönergenin "Bilimsel Araştırma ve Yayın Etiğine Aykırı Eylemler" başlığı altında belirtilen eylemlerden hiçbirinin gerçekleştirilmediğini taahhüt ederiz.

Kaynakça

- [1] P. Özfirat M., Üretim çizelgeleme, Manisa: Celal Bayar Üniversitesi Rektörlük Matbaası, 2013, pp. 1-2.
- [2] T. Saraç ve B. Tutumlu, "İşlerin bölünebildiği ilişkisiz Paralel Makine Çizelgeleme problemi için iki amaçlı bir matematiksel model," *Journal of the Faculty of Engineering and Gazi University*, cilt 37:4, pp. 2293-2307, 2022.
- [3] H. Liu, "A multi-swarm approach to multi-objective flexible job-shop scheduling problems," *Fundamenta Informaticae*, pp. 465-489, 2009.
- [4] M. L. Pinedo, *Scheduling: Teory, Algorithms, and Systems*, Springer, 2016.
- [5] P. Brucker, *Scheduling Algorithms*, Springer, 2001.
- [6] A. Allahverdi, C. Ng, T. Cheng ve M. Kovalyov, "A survey of scheduling problems with setup times or costs," *European Journal of Operational Research*, cilt 187, no. 3, pp. 985-1032, 2006.
- [7] C. O. İ. Ö. Emrah B. Edis, "Paralel makinelerde işlerin ve makine operatörlerinin birlikte çizelgelenmesi problemine çözüm yaklaşımları," *Gazi Üniv. Müh. Mim. Fak. Der.*, cilt 27, no. 3, pp. 527-535, 2012.
- [8] Eroğlu Y. Duygu, H. C. Özmutlu ve S. A. Köksal, "A genetic algorithm for the unrelated parallel machine scheduling problem with job splitting and sequence-dependent setup times - loom

- scheduling," *TEKSTİL ve KONFEKSİYON*, 29(1), pp. 67-72, 2014.
- [9] F. Villa, E. Vallada ve L. Fanjul-Peyro, "Heuristic algorithms for the unrelated parallel machine scheduling problem with one scarce additional resource," *Expert Systems With Applications*, no. 93, pp. 28-38, 2018.
- [10] G. Kılıç, "Sıra Bağımlı İlişkisiz Paralel Makine Çizelgeleme Problemi İçin Yeni Bir Sezgisel Algoritma Önerisi," *Pamukkale Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Doktora Tezi İşletme Ana Bilim Dalı*, 2023.
- [11] Ç. Şenbay, "Bir iplik fabrikasında siparişlerin çizelgelenmesi," *ESOGÜ Müh Mim Fak Derg.* 2021, 29(1), pp. 64-76, 2021, .
- [12] W.-C. Yeh, P.-J. Lai, W.-C. Lee ve M.-C. Chuang, "Parallel-machine scheduling to minimize makespan with fuzzy," *Information Sciences*, no. 269, pp. 142-158, 2014.
- [13] M. Kılıç , *Bir Tekstil Firmasının Boyahane Bölümünde Paralel Makine Çizelgeleme Problemi İçin Bir Matematiksel Model Önerisi ve Farklı Çizelgeleme Kurallarının Karşılaştırılması*, Konya: Necmettin Erbakan Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı, 2021.
- [14] C. Wang, C. Liu, Z.-h. Zhang ve L. Zeng, "Minimizing the total completion time for parallel machine scheduling," *Computers & Industrial Engineering*, cilt 97, pp. 170-182, 2016.
- [15] S.-S. A. v. Bakır M., "Bağılantısız paralel parti üretimi yapan makine çizelgeleme probleminin karışık-tamsayılı programlama ile çözümü," *Gazi Üniversitesi Politeknik dergisi*, 2021.
- [16] T. Saraç ve B. Tutumlu, "İlişkisiz paralel makine çizelgeleme probleminde eniyi makine sayısının belirlenmesi için bir doğrusal tamsayılı matematiksel model ve çözüm yaklaşımları," *Journal of the faculty of Gazi University*, cilt 37(1), pp. 329-345, 2022.
- [17] J.-P. Arnaout, "A worm optimization algorithm to minimize the makespan on unrelated parallel machines with sequence-dependent setup times," *Annals of Operations Research*, no. 285, pp. 273-293, 2020.
- [18] L. P. Cota, F. G. Guimar, F. B. d. Oliveira ve M. J. F. Souza, "An Adaptive Large Neighborhood Search with Learning Automata for the Unrelated Parallel Machine Scheduling Problem," *IEEE*, 2017.
- [19] L. R. d. Abreu ve B. d. A. Prata, "A genetic algorithm with neighborhood search procedures for unrelated parallel machine scheduling problem with sequence-dependent setup times," *Journal of Modelling in*, cilt Vol.5, no. No.3, pp. 809-828, 2019.
- [20] W.-L. Wang, H.-Y. Wang, Y.-W. Zhao, L.-P. Zhang ve X.-L. Xu, "Parallel machine scheduling with splitting jobs by a hybrid differential evolution algorithm," *Computers & Operations Research*, cilt 40, pp. 1196-1206, 2012.
- [21] M. B. Yıldırım, B. Küçük ve T. Kesintürk, "Paralel makineli bir üretim sisteminin karınca koloni," %1 içinde *Yöneylem Araştırması ve Endüstri Mühendisliği 28. Ulusal Kongresi*, İstanbul, 2008.
- [22] E. Akyol ve T. Saraç, "Paralel Makina Çizelgeleme Problemi için bir Karma Tamsayılı Programlama Modeli: Ortak Kaynak Kullanımı," *Fen Bilimleri Dergisi Part C:Tasarım ve Teknoloji*, pp. 109-126, 2017.
- [23] P. Tapkan, L. Özbakır, S. Kulluk ve B. Telcioğlu, "Modelling and solving railway crew rostering problem," *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, cilt 33, no. 3, pp. 953-965, 2018.
- [24] S. Kaya ve İ. H. Karaçizmeli, "Hazırlık Zamanlı Ortak Teslim Tarihli Özdeş Paralel Makine Çizelgeleme Problemlerinin Çok Amaçlı Çözümü," *Harran Üniversitesi Mühendislik Dergisi*, pp. 205-213, 2018.
- [25] H. Soleimani, H. Ghaderi, P.-W. Tsai ve N. Zarbakhshnia, "Scheduling of unrelated parallel machines considering sequence-related setup time, start time-dependent deterioration, position-dependent learning and power consumption minimization," *Journal of Cleaner Production*, cilt 249, 2020.
- [26] D. M. Carvalho ve M. V. Nascimento, "Hybrid metaheuristics to solve the integrated lot sizing and scheduling problem on parallel machines with sequence-dependent and non-triangular setup," *European Journal of Operational Research*, no. 296, pp. 158-173, 2022.

- [27] Z. Ceylan, R. E. Karan, Ç. Bakırcı ve S. Sabuncu, "Sıra Bağımlı Hazırlık Süreli Tek Makine Çizelgeleme Problemi: Beyaz Eşya Sektöründe Bir Uygulama," *International Journal of Multidisciplinary Studies and Innovative Technologies*, cilt 3, no. 1, pp. 14-21, 2019.
- [28] A. Ostovaria, L. Benyoucef, H. H. Benderbal ve X. Delorme, "Economic Sustainable RMS: Lp-metric vs Epsilon Constraint Socio-Economic Sustainable RMS: Lp-metric vs Epsilon Constraint," *Procedia Computer Science*, cilt 232, pp. 456-464, 2024.
- [29] E. Caniyılmaz, B. Benli ve M. S. İlkay, "An artificial bee colony algorithm approach for unrelate parallel machine scheduling with processing set restrictions, job sequence-dependent setup times, and due date," *Int J Adv Manuf Technol*, cilt 77, p. 2105-2115, 2015.
- [30] Y.-H. Kim ve R.-S. Kim, "Insertion of new idle time for unrelated parallel machine scheduling with job splitting and machine breakdowns," *Computers & Industrial Engineering*, no. 147, 2020.
- [31] J. Lee ve H. Kim, "A heuristic algorithm for identical parallel machine scheduling: splitting jobs, sequence-dependent setup times, and limited setup operators," *Flexible Services and Manufacturing Journal*, cilt 33, pp. 992-1026, 2021.
- [32] E. Çalışkan, S. K. İşleyen ve H. Çerçioğlu, "A mixed integer mathematical model for loading problem in seru manufacturing systems and matheuristic solution approach," *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, cilt 36, no. 2, pp. 793-806, 2021.
- [33] D. Li, J. Wang, R. Qiang ve R. Chiong, "A hybrid differential evolution algorithm for parallel machine scheduling of lace dyeing considering colour families, sequence-dependent setup and machine eligibility," *International Journal of Production Research*, cilt 59, no. 9, pp. 2722-2738, 2021.
- [34] I. Mourtos, S. Vatikiotis ve G. Zois, "Scheduling Jobs on Unrelated Machines with Job Splitting and Setup Resource Constraints for Weaving in Textile Manufacturing," *Hal Open Science*, pp. 424-434, 2023.
- [35] G. A. Chua, A. Ravindran, J. R. L. Senga ve S. Viswanathan, "Job scheduling for maximum revenue on uniform, parallel machines with major and minor setups and job splitting," *Computers & Industrial Engineering*, cilt 178, 2023.
- [36] E. Duran, C. Öztürk ve M. A. Örnek, "Combinatorial optimization methods for yarn dyeing," *Flexible Services and Manufacturing Journal*, 2024.
- [37] M. Elyasi, Y. S. Selçuk, O. Ö. Özener ve E. Çoban, "Imperialist competitive algorithm for unrelated parallel machine scheduling," *Computers & Industrial Engineering*, cilt 110086, no. 190, 2024.
- [38] Z. Lv, Y. Zhao, H. Kang, Z. Gao ve Y. Qin, "An Improved Harris Hawk Optimization Algorithm for Flexible Job Shop Scheduling Problem," *Compters, Materials & Continua*, 2024.
- [39] Miettinen, Nonlinear Multiobjective Optimization, Almanya: Springer Science & Business Media, 1999, 1998.
- [40] T. L. Saaty, Multicriteria Decision Making: The Analytic Hierarchy Process, New York: McGraw-Hill, 1980.
- [41] L. Zadeh, "The Concept of a Linguistic Variable and its Application to Approximate Reasoning-I," cilt 8, no. 199-249, 1975.