

TESLİM ZAMANLARININ DİKKATE ALINDIĞI 1,5 BOYUTLU KESME VE ANA MALZEME SEÇİMİ PROBLEMİ İÇİN BİR MATSEZGİSEL ALGORİTMA

Emine DUYSAK¹, İrem DÜLGER², Nihal Saliha YILDIZ³, Sıla GÜMÜŞ⁴, Tuğba SARAÇ^{5*}

Eskişehir Osmangazi, Üniversitesi Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, Meşelik Kampüsü 26480 ESKİŞEHİR

¹ORCID No: <https://orcid.org/0000-0002-9089-0494>

²ORCID No: <https://orcid.org/0000-0003-2409-1982>

³ORCID No: <https://orcid.org/0000-0002-1402-1406>

⁴ORCID No: <https://orcid.org/0000-0001-9633-8310>

⁵ORCID No: <https://orcid.org/0000-0002-8115-3206>

Anahtar Kelimeler	Öz
Matsezigisel algoritma, 1,5 boyutlu kesme ve ana malzeme seçimi problemi, Oluklu mukavva, Çok amaçlı programlama	Kesme ve ana malzeme seçimi problemleri kâğıt, metal, cam ve tekstil gibi endüstriler için oldukça önemli problemlerdir. Kesme işleminin etkin yapılamaması sonucunda oluşacak fireler hem işletmeler için önemli bir maliyete sebep olmakta hem de çevreye zarar verebilmektedir. Bu nedenle literatürde kesme problemini konu alan çalışmaların önemli bir kısmı firelerin enküçülenmesi ya da kullanılacak ana malzeme miktarının enküçülenmesi üzerine odaklanmaktadır. Ve kesilecek parçaların ana malzemeye nasıl yerleştirildiğini gösteren kesme planları oluşturulurken parçaların teslim zamanları genellikle ihmal edilmektedir. Oysa gerçek hayatta müşteriye ürünlerin zamanında teslim edilebilmesi en az firenin azaltılması kadar önem taşımaktadır. Bu nedenle çoğu kez büyük firelere neden olsalar bile teslim zamanı yaklaşan parçalara öncelik verilmesi gerekmektedir. Bu çalışmada, kullanılacak ana malzemenin enküçülenmesi amacının yanı sıra, kesilecek parçaların teslim zamanlarının da dikkate alındığı kesme ve ana malzeme seçimi problemi ele alınmıştır. Problemin motivasyon kaynağı bir oluklu mukavva fabrikasında yaşanan oluklu bobinlerinden dikdörtgen oluklu mukavvaların kesilmesi problemidir. Farklı bobin enlerinin var olması nedeniyle oluklu mukavvaların nasıl kesileceğinin belirlenmesinin yanı sıra ana malzemenin seçimi de söz konusudur. Problemin çözümü için bir matsezigisel algoritma geliştirilmiştir. Geliştirilen algoritma ile elde edilen çözümler uygulamanın yapıldığı işletmenin çizelgesi ile karşılaştırılmış ve daha başarılı bir çizelge elde edilmiştir.

A MATHEURISTIC ALGORITHM FOR THE 1.5-DIMENSIONAL CUTTING AND ASSORTMENT PROBLEM WITH DUE DATES

Keywords	Abstract
Matheuristic Algorithm, 1.5-Dimensional Cutting and Main Material Selection Problem, Corrugated Cardboard, Multi-Objective Programming.	Cutting and assortment problems are fundamental problems for the paper, metal, glass, and textile industries. The waste due to the inefficient cutting process causes a high cost for businesses and can damage the environment. Therefore, most studies on the cutting problem in the literature focus on minimizing the waste or the amount of stock to be used. And when creating cutting plans that show how the parts to be cut are placed in the stock, delivery times of the pieces are often neglected. However, delivering the products to the customers on time is as essential as reducing waste in real life. For this reason, even if they cause significant losses, priority should be given to the parts with approaching delivery time. In this study, besides minimizing the stock to be used, the problem of cutting and selecting the main material, in which the delivery times of the parts to be cut, are also considered. The motivation for the problem is cutting rectangular corrugated cardboard from corrugated coils in a corrugated cardboard factory. Due to the availability of different coil widths, besides determining how to cut corrugated cardboards, the choice of the stock is also a matter. A matheuristic algorithm has been developed to solve the considered problem. The solutions obtained from the developed algorithm were compared with the schedule of the enterprise where the application was made, and more successful schedule was obtained.

Araştırma Makalesi

Research Article

Başvuru Tarihi : 17.12.2021

Submission Date : 17.12.2021

Kabul Tarihi : 05.08.2022

Accepted Date : 05.08.2022

*Sorumlu yazar; e-posta: tsarac@ogu.edu.tr

1. Giriş

Cam, kâğıt, metal, tekstil gibi birçok sektördeki rekabet koşulları firmaların fire maliyetlerini azaltmaya yönelik tutum sergilemelerine ve kesme problemleriyle çözümleri üzerinde çalışmaların artmasına yol açmaktadır. Kesme problemlerini etkin bir şekilde çözebilen firmalar, iyi tasarlanmış kesme planları ile firelerini azaltabilir, makina hazırlık sürelerini kısaltabilirler. Ancak sadece firelere odaklanıldığında, ürünlerin teslim tarihleri dikkate alınmadığında, teslim tarihi çok uzak olan parçalar önceden üretilerek stokta bekleyebilir ya da daha kötüsü teslim tarihi çok yaklaşmış ürünler zamanında üretilenemeyerek müşteriye gecikmeli olarak teslim edilebilirler. Bu nedenle kesme planları oluşturulurken ürün teslim zamanlarının dikkate alınması oldukça önemlidir.

Kesme problemi ilk olarak 1939'da Kantorovich (1939) tarafından formüle edilmiştir. 1990 yılında Dyckhoff (1990) yaptığı yayın taraması çalışmasında bu problemler için bir sınıflandırma sunmuştur. Kesme problemlerinin en temel özelliği boyutudur. Metal çubuklar gibi sadece bir boyutu dikkate alınacak parçaların kesilmesi 1 boyutlu, dikdörtgen levhalardan dikdörtgen parçaların kesilmesi 2 boyutlu ve bir kamyonu kolilerinin yerleştirilmesi ise 3 boyutlu kesme problemine örnektir. 1,5 boyutlu kesme problemi için ise bir kâğıt rulosundan dikdörtgen kâğıt parçaların kesilmesi örnek verilebilir. Burada kesilecek ürünlerin her iki boyutu da dikkate alınmak zorunda iken, rulo uzunluğu çok büyük olduğundan veya bir rulo bittiğinde kolayca ikinci ruloya geçilebildiğinden ana malzemenin boyu sonsuz varsayılabilir ve bu nedenle kesme planları oluşturulurken 1 boyutlu kesme probleminde olduğu gibi kesilecek parçaların enleri toplamının bobin enine sığması kısıtı göz önünde bulundurulur ancak öte yandan parçaların boylarının tamamen göz ardı edilmesi de mümkün değildir. Bu nedenle bu problem hem 1 boyutlu hem de 2 boyutlu kesme probleminden farklılaşmaktadır. Literatürde 1,5 boyutlu kesme problemleri üzerine çok fazla çalışma bulunmamaktadır.

Savsar ve Cogun (1994) 1,5 boyutlu kesme problemi, depolama alanı problemi ve makine bekleme problemlerini birlikte ele almışlardır. Ana malzeme seçimini içermeyen bir doğrusal programlama modeli geliştirmişlerdir. Saraç ve Özdemir (2003) çok amaçlı 1,5 boyutlu kesme ve ana malzeme seçimi problemi için bir genetik

algoritma önermişlerdir. Gasimov vd. (2007) çok amaçlı 1,5 boyutlu kesme problemi için konik skalerleştirme yöntemini önermişlerdir. Zheng vd. (2008), 1,5 boyutlu kesme problemi için iki aşamalı bir çözüm yaklaşımı önermişlerdir. İlk aşamada 1,5 boyutlu kesme problemini 1 boyutlu kesme problemine dönüştürmüşler ve sezgisel bir yöntem ile bir ilk çözüm elde etmişlerdir. Ardından ikinci aşamada parçacık sürü optimizasyonu yöntemi ile çözümü iyileştirmişlerdir. Bayır (2012), 1,5 boyutlu kesme probleminde hangi parçanın hangi sıra ve hangi açı ile kesileceğini genetik algoritma ile belirlemiştir. Han ve Chang, (2015), 1,5 boyutlu kesme problemine dinamik programlama temelli bir çözüm yaklaşımı önermişlerdir. Saraç ve Sağır (2021), 1,5 boyutlu kesme problemi için kesme planlarının önceden türetilmesine gerek duymayan bir matematiksel model önermişlerdir. Bu çalışmada parça çeşidi ve şerit sayısı kısıtlı 1,5 boyutlu kesme problemi için kesme planlarını da türeten bütünlük bir matematiksel model geliştirilmiştir.

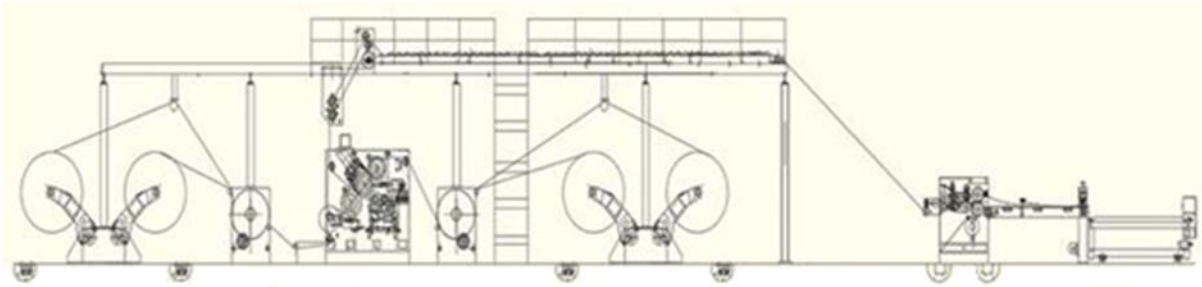
Literatürde yer alan 1,5 boyutlu çalışmalar göz önünde bulundurulduğunda bu çalışmanın farklı yönleri izleyen şekilde sıralanabilir: (1) Literatürdeki kesme problemlerinde genellikle kesilecek parçaların teslim zamanları göz ardı edilmektedir. Ancak bu şekilde elde edilen bir çözüm teslim zamanı yaklaşmış parçaların öncelikle kesilmesini garanti edememektedir. Bu çalışmada erişilebilen literatürden farklı olarak kesme planları oluşturulurken teslim zamanı yakın olanlara öncelik verilmiştir. (2) Erişilebilen literatürde ana malzeme miktarı sınırsız varsayılmıştır. Ancak gerçek hayatta ana malzeme miktarları stoklarla sınırlıdır. Bu çalışmada eldeki ana malzeme miktarı göz önünde bulundurulmuş ve her kesme işleminden sonra da güncellenmiştir. (3) Erişilebilen literatürde kullanılan çözüm yöntemleri incelendiğinde ele alınan problemin matsezigisel algoritma ile çözülmemiş olduğu görülmektedir. Bu çalışmada çözüm yöntemi olarak bir matsezigisel algoritma geliştirilmiştir.

Bu çalışmanın izleyen bölümünde ele alınan problemin tanımı ve önerilen matematiksel model, üçüncü bölümde geliştirilen matsezigisel algoritma, dördüncü bölümde deneysel çalışmalar ve uygulama son bölümde ise sonuç ve öneriler sunulmuştur. Bu çalışmada araştırma ve yayın etiğine uyulmuştur.

2. Ele Alınan Problemin Tanımı ve Önerilen Matematiksel Model

Bu çalışmada, bir oluklu mukavva fabrikasında yaşanan oluklu mukavva bobinlerinden dikdörtgen oluklu mukavvaların kesilmesi problemi ele alınmıştır. Problemin gözlendiği fabrika, perakende hazır ambalaj gereksinimlerine uygun olarak yiyecek, içecek, parfüm ve deterjan üreticileri için oluklu mukavva ambalajlar tasarlamakta ve üretmektedir. Oluklu mukavva ve

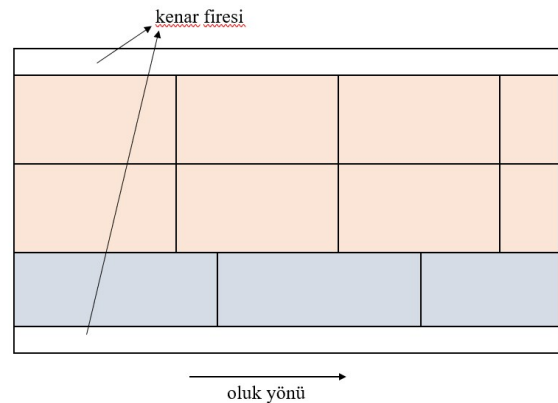
ambalajlar, oluklu makinasında üretilmektedir. Oluklu makinası, oluklu mukavva üretimini gerçekleştirirken öncelikle kağıtları yüksek buhar basıncında nemlendirerek kâğıda istenilen özelliklerde dalga verebilmek ve tutkallamak için yumuşatır. Kâğıt plakalar şekillendirildikten sonra ise neminden arındırılır ve kurutma işlemine tabi tutulur. Oluklu mukavva makinası ana hatları ile Şekil 1’de verilmiştir.



Şekil 1. Oluklu Mukavva Makinası

Uygulamanın yapıldığı fabrikada kullanılan oluklu makinasında da üretim benzer şekilde gerçekleştirilmektedir; öncelikle oluklu mukavvanın katmanlarını oluşturacak kâğıt bobinleri oluklu makinasına girer, makinede ısı ve buharla yumuşatılan ara kâğıt istenilen ondüle şeklini alır ve ondüle tepelerine yapıştırıcı sürülerek ve ön ısıtıcılarda ısıtılan dış kağıtlara preslenerek yapışması sağlanır ve bu şekilde oluklu mukavva elde edilmiş olur. Daha sonra oluklu mukavva istenilen en, boy ve kenar firesi dikkate alınarak kesilir ve oluklu mukavva levhaları elde edilir. Oluklu mukavva üretiminde kullanılan kağıtlar, yardımcı malzemelere ve dalga cinsine göre değişkenlik göstermektedir. Oluklara dik olan kesitte görülen ondüle, şekli nedeniyle dalga adıyla tanımlanır ve yüksekliğine, boyuna, bir metredeki sayısına göre sınıflandırılır. İşletmede A, B, C, D ve E olmak üzere 5 farklı dalga boyunda oluklu mukavva üretilebilmektedir. Ayrıca tek dalga, çift dalga ve üç dalga olacak şekilde farklı kombinasyonlarda oluklu mukavva üretimi mevcuttur. Oluklu mukavvayı oluşturacak dış, iç, ara kağıtların gramaj, cins ve özellikleri, kutu kalitesiyle doğrudan ilişkili olmaları sebebiyle, oldukça önemlidir ve bu sebeple müşteri tarafından belirlenmektedir. Kesme planları oluşturulurken sadece aynı kâğıt kombinasyonu ve

aynı dalga boyuna sahip ürünler aynı kesme planında yer alabilirler. Ayrıca oluklu mukavva makinasının teknik özellikleri nedeniyle kesme planında en fazla iki çeşit ürün olabilir ve enden en çok 8 adet ürün yerleştirebilir. Örnek bir kesim Şekil 2’de gösterilmiştir.



Şekil 2. Oluklu Mukavva Kesimi

Bu problemde, kesilecek ana malzeme oluklu mukavva bobinidir. Bobinin boyu çok uzundur ve bittikçe yeni bobin ilavesi ile kesme işlemine ara vermeden devam etmek mümkündür. Bu nedenle

kesilen parçalar dikdörtgen olmasına rağmen, kesme planları oluşturulurken öncelikle dikkate alınması gereken ana malzemenin enidir bu nedenle problem 2 boyutlu değil 1,5 boyutludur. Öte yandan kesme planının boyunu belirlerken ise parçaların boyu dikkate alındığından problem 1 boyutlu olarak da kabul edilemez. Kâğıdın su yönü denilen lifleri boyunca kesilmesi gerektiği için döndürme mümkün değildir. Ele alınan problemin amacı, bir boyutu sabit diğer boyutu açık olan dikdörtgen şeklindeki bir ana malzemeye, kesilecek parça kümesindeki tüm parçaları, fireyi enküçükleyecek ve teslim zamanlarını da dikkate alacak şekilde atamaktır.

Uygulamanın yapıldığı fabrikada ele alınan problemin çözümü için sistematik bir çözüm yaklaşımı kullanılmamaktadır. Dolayısıyla her zaman fireyi en küçükleyecek ya da ürünlerin müşteriye zamanında teslim edilebilmesini sağlayacak kesme planları oluşturulamamaktadır.

Günümüzde kâğıt endüstrisinde oluşan fire miktarı yüksek maliyetlere sebep olmaktadır. Örnek vermek gerekirse, yılda 40.000 ton kâğıt kullanan bir işletme için %2,5'lük bir kenar firesi, 1.000 ton kâğıdın çöpe atılması anlamına gelir ve yılda en az 325.000 \$'lık bir kayıp demektir, bu nedenle bu çalışmada oluşacak firenin enküçüklenmesi amaçlanmıştır. Firenin enküçüklenmesi, doğal olarak fire maliyetlerini de azaltacaktır. Ayrıca firma kesme planlarını oluştururken teslim zamanlarını da dikkate almamaktadır. Bu nedenle, seçilen parçalar teslim zamanlarından çok önce üretilmektedir ve bu da yarı mamullerin birikmesine ve depo alanının verimli kullanılmamasına yol açmaktadır ya da teslim zamanlarından daha sonra üretilerek müşterilere gecikmeli olarak teslim edilebilmektedir.

Problemin çözümünde siparişe göre aynı kâğıt kombinasyonuna ve dalga boyuna sahip olan ürünler sınıflandırılmış ve her sınıf için problem ayrı ayrı çözülmüştür. Bu sınıflandırma sayesinde matematiksel modele aynı kâğıt kombinasyonu ve dalga cinsine sahip ürünlerin aynı kesme planında yer alabileceğine dair bir kısıt eklenmesine gerek kalmamıştır.

Bu çalışmada önerilen çözüm yaklaşımında kullanılacak matematiksel model (M) sadece bir ana malzeme seçerek, bu ana malzemenin eni ve boyunu aşmadan, oluklu mukavva makinasının özelliklerini dikkate alarak, talep edilen ürünlerden teslim zamanı yaklaşmış olanlarına öncelik verecek ve toplam fireyi enküçükleyecek

şekilde nasıl kesileceğini belirlemektedir. Matematiksel model geliştirilirken, tüm parçaların kesilmesine yetecek kadar ana malzemenin stokta olduğu varsayılmıştır. Önerilen matematiksel modelde kullanılacak indisler, parametreler, karar değişkenleri, kısıtlar ve amaç fonksiyonları aşağıda verilmiştir.

İndis Kümeleri:

$N = \{1,2,\dots,n\}$; Ürün kümesi

$M = \{1,2,\dots,m\}$; Ana malzeme (bobin) çeşidi kümesi

$V = \{1,2,\dots,v\}$; Kesme planı kümesi

İndisler:

i ürün indisi. $i \in N$

j bobin indisi. $j \in M$

k kesme planı indisi. $k \in V$

Parametreler:

e_i^u : i . ürünün eni.

b_i^u : i . ürünün boyu.

e_j^b : j . bobinin eni.

b_j^b : j . bobinin boyu.

t_i : i . ürünün talebi.

v_i^u : i . ürün kesilebilir durumda ($t_i > 0$) ise 1, diğer durumda 0.

v_j^b : j . bobin kullanılabilir durumda ($b_j^b > 0$) ise 1, diğer durumda 0.

d_i : i . ürünün teslim zamanı.

c : kesme planında yer alabilecek en fazla ürün çeşidi ($c=2$)

s : bir kesme planının eninde yer alabilecek en çok ürün (şerit) sayısı ($s=8$)

∂ : mecburi kenar firesi.

β : kesme planının boyunu temsil eden sayı. (β parametresi, kesme planı türetilirken, amaç fonksiyonunda yer alan fire için gerçeği temsil edebilecek yaklaşık bir değer hesaplanmasında kullanılmaktadır ve talebi henüz tamamlanmamış ürünlerden ($v_i^u = 1$) enbüyüğünün boyuna eşit kabul edilmiştir. $\beta = \frac{enb}{\sum_{i|v_i^u=1} b_i^u}$).

Karar Değişkenleri:

x_i : kesme planının enine, i . üründen yerleştirilecek miktar (*adet*).

y_i : kesme planında i . üründen var ise 1, diğer durumlarda 0.

z_j : j . bobin seçildiyse 1 diğer durumlarda 0.

(M):

Kısıtlar:

$$\sum_{i=1}^n x_i \leq s \quad (1)$$

$$\sum_{i=1}^n e_i^u x_i + \partial \leq \sum_{j=1}^m e_j^b z_j \quad (2)$$

$$x_i \geq y_i \quad \forall i \quad (3)$$

$$x_i \leq s y_i \quad \forall i \quad (4)$$

$$\sum_{i=1}^n y_i \leq c \quad (5)$$

$$\sum_{j=1}^m z_j = 1 \quad (6)$$

$$y_i \leq v_i^u \quad \forall i \quad (7)$$

$$z_j \leq v_j^b \quad \forall j \quad (8)$$

$$x_i \geq 0 \text{ ve tamsayı} \quad \forall i \quad (9)$$

$$y_i \in \{0,1\} \quad \forall i \quad (10)$$

$$z_j \in \{0,1\} \quad \forall j \quad (11)$$

Amaç Fonksiyonları:

$$\text{enk } f_1 = \beta \left(\sum_{j=1}^m e_j^b z_j - \sum_{i=1}^n e_i^u x_i \right) \quad (12)$$

$$\text{enk } f_2 = \sum_{i=1}^n d_i y_i \quad (13)$$

(1) numaralı kısıt, en fazla s sıra kesim yapılmasını garanti etmektedir. (2) numaralı kısıt, mecburi kenar firesi dahil olmak üzere seçilen ürünlerin toplam eninin seçilen bobin eninden büyük olamayacağını ifade etmektedir. (3) ve (4) numaralı kısıtlar x_i ve y_i karar değişkenlerinin

ilişki kısıtlarıdır. (5) numaralı kısıt, en fazla c adet farklı ürünün aynı kesme planında yer alabileceğini garanti etmektedir. (6) numaralı kısıt, sadece 1 bobinin seçileceğini ifade etmektedir. (7) numaralı kısıt, talebi karşılanmış ürünlerin seçilmesini engeller. (8) numaralı kısıt, sadece kullanılabilir durumda olan bobinlerin seçilmesine izin verir. (9)-(11) numaralı kısıtlar karar değişkenlerine ait işaret ve tam sayı kısıtlarıdır. İlk amaç (12), alan cinsinden kenar fireleri toplamını en küçükmektir. Burada $(\sum_{j=1}^m e_j^b z_j - \sum_{i=1}^n e_i^u x_i)$ ifadesi santimetre cinsinden kenar firesine karşı gelmektedir. Bu değeri alana dönüştürebilmek için kesme planının boyuna ihtiyaç duyulmaktadır. Kesme planına seçilebilecek parçalardan ($v_i^u = 1$) boyu en büyük olan, kesme planının temsili boyu (β) olarak kullanılmaktadır. İkinci amaç (13) ise kesme planına seçilecek ürünlerin teslim zamanları toplamını en küçükmektir.

İki amaç fonksiyonunu tek bir amaç fonksiyonuna dönüştürürken ağırlıklı toplam yönteminden yararlanılmıştır. Ağırlıklı toplam yönteminde amaç fonksiyonları ağırlıklarla çarpılarak toplanmaktadır. Birleştirilmiş amaç fonksiyonu (14) numaralı denklemde verilmiştir.

$$\begin{aligned} \text{enk } z &= w_1 \left(\frac{\beta (\sum_{j=1}^m e_j^b z_j - \sum_{i=1}^n e_i^u x_i) - I_1}{N_1 - I_1} \right) \\ &+ w_2 \frac{\sum_{i=1}^n d_i y_i - I_2}{N_2 - I_2} \end{aligned} \quad (14)$$

Burada w_1 ve w_2 sırasıyla birinci ve ikinci amaç fonksiyonlarının ağırlıklarıdır. Ele alınan problem için ağırlık değerleri uzman görüşleri doğrultusunda sırasıyla 0,9 ve 0,1 olarak belirlenmiştir. I_1 ve I_2 , (M) modelinin birinci ve ikinci amaç fonksiyonlarının tek amaç olarak dikkate alınarak çözülmesi ile elde edilmiş sırasıyla birinci ve ikinci amaç fonksiyonlarının ideal değerleridir. N_1 , (M) modelinin birinci amaç fonksiyonunun tek amaç olarak dikkate alınması ve (M) modeline $f_2 \leq I_2$ ek kısıtının eklenmesi ile elde edilmiş, birinci amaç fonksiyonunun nadir değeridir. N_2 ise, (M) modelinin ikinci amaç fonksiyonunun tek amaç olarak dikkate alınması ve (M) modeline $f_1 \leq I_1$ ek kısıtının eklenmesi ile elde edilmiş, ikinci amaç fonksiyonunun nadir değeridir. İdeal ve nadir değerler f_1 ve f_2 amaç fonksiyonlarının normalleştirilmesinde kullanılmıştır.

4. Önerilen Matsezgisel Algoritma

Matsezgisel algoritmalar, sezgisel yöntemlerle matematiksel yöntemlerin üstün yönlerinin bir araya getirilmesi amacıyla geliştirilen algoritmalarlardır. Bu çalışmada geliştirilen matematiksel model (M) ile eldeki bobinler ve talebi tamamlanmamış ürünler dikkate alınarak en küçük toplam fire ve en küçük toplam teslim zamanlarına sahip ürünler seçilerek bir kesme planı türetilir. Algoritma, hangi bobinin seçileceğini ve bu bobinden talebi tamamlanmamış ürünlerin hangilerinden kaç adet kesileceğini (M) modelini kullanarak belirler. Üretilen kesme planındaki ürünlerin kalan talebi ve kullanılabilir bobin miktarı güncellenir. Bu işlem tüm ürünlerin talebi karşılanıncaya kadar tekrarlanır. Önerilen algoritmanın adımları aşağıda verilmiştir.

Adım1. (M) modelini çöz. Seçilen bobin çeşidini ($z_j = 1$) ve kesme planında kullanılacak ürünleri ($y_i = 1$) belirle.

Adım2. Kesme planının boyu (b^k), seçilen ($y_i = 1$) ürünlerden boyu (b_i^u) en büyük olanına eşittir. $b^k = \max_{i|y_i=1} b_i^u$.

Adım3. Seçilen i . ürününün, kesme planına boydan kaç adet sığdığını (o_i^k) belirlemek üzere kesme planının boyunu (b^k) ilgili ürünün boyuna (b_i^u) böl, sonuç tamsayı değil ise aşağıya yuvarla. $o_i^k = \lfloor \frac{b^k}{b_i^u} \rfloor$.

Adım4. Seçilen ($y_i = 1$) ürünler için, kesme planında i . üründen toplam kaç adet olduğunu (σ_i) hesapla. $\sigma_i = o_i^k x_i$.

Adım5. Seçilen ($y_i = 1$) ürünler içinden talebini, kesme planındaki sayısına (σ_i) böldüğümüzde en küçük değeri alanı seç ve kesme planından kaç adet kullanılacağını (σ^k) hesapla. $\sigma^k = \min_i \left\lfloor \frac{t_i}{\sigma_i} \right\rfloor$

Adım6. Eğer $\sigma^k \geq \frac{b_j^b}{b^k}$ ise (seçilen bobinin boyu planlanan kesme planı sayısı için kısa demektir), kullanılacak kesme planı sayısını $\sigma^k = \left\lfloor \frac{b_j^b}{b^k} \right\rfloor$ olarak güncelle.

Adım7. İlgili kesme planında her üründen toplamda kaç adet kesildiğini (φ_i) hesapla. $\varphi_i = \sigma_i \sigma^k$. Kesilen ürün adetlerini talepten çıkararak talepleri güncelle. $t_i = t_i - \varphi_i$.

Eğer bir ürünün talebi karşılanmışsa ($t_i \leq 0$) ise, $v_i^u = 0$ yap ve talebi karşılanan ürünün sonraki aşamalarda model tarafından seçilmesini engelle.

Adım8. Kullanılan bobin miktarını çıkararak bobin boyunu güncelle. $b_j^b = b_j^b - b^k \sigma^k$. Eğer herhangi bir bobin çeşidinden elde kalmadı ise ($b_j^b = 0$) ya da talebi sıfırlanmayan ürünlerden en küçük boya sahip olan boydan küçük ise $v_j^b = 0$ yap ve biten bobinin model tarafından seçilmesini engelle.

Adım9. $\sum_i v_i^u > 0$ ise *Adım1*'e git, $\sum_i v_i^u = 0$ ise DUR.

5. Deneysel Sonuçlar

Önerilen matsezgisel algoritma GAMS 24.1.3 ile kodlanmış ve çözücü olarak CPLEX kullanılmıştır. Tüm testler Intel (R) Core (TM) i7- 5700HQ CPU@2.70 GHz işlemcisi, 8 GB belleği ve Windows 10 işletim sistemine sahip olan bir bilgisayarda yapılmıştır.

5.1. Test Problemleri

Öncelikle, 5 adet ürün ve 5 adet bobin içeren bir örnek problem oluşturulmuştur. Bobin en ve boyları Tablo 1'de, ürün en, boy, talep miktarları ve gün cinsinden teslim zamanları ise, Tablo 2'de verilmiştir.

Tablo 1

Örnek Problem İçin Bobin En (e_j^b) ve Boyları (b_j^b)					
j	1	2	3	4	5
e_j^b	1.150	1.200	1.250	1.300	1.375
b_j^b	316.800	316.800	125.000	125.000	125.000

Tablo 2

Örnek Problem İçin Ürün En (e_i^u), Boy (b_i^u), Talep (t_i) Miktarları ve Teslim Zamanları (d_i)					
i	1	2	3	4	5
e_i^u	275	425	550	365	411
b_i^u	512	610	325	625	990
t_i	600	400	450	1.000	800
d_i	3	5	0	6	7

Mecburi kenar firesi 29cm.'dir. Örnek problem önerilen matsezgisel algoritma kullanılarak çözülmüş ve elde edilen kesme planları, kesme

planlarının hangi ürünleri içerdiği ve fire miktarları Tablo 3'te verilmiştir.

Tablo 3

Örnek Problem İçin Türetilen Kesme Planları

kesme planı	Kesme planı adedi	bobin eni	plandaki ürünler	üretilen ürün adedi	kenar firesi (cm)	toplam alan firesi (cm ²)
kesme planı 1	200	1.250	2 4	400 200	6	750.000
kesme planı 2	225	1.150	3	450	21	1.535.625
kesme planı 3	150	1.150	1	600	21	1.612.800
kesme planı 4	267	1.150	4	801	26	4.338.750
kesme planı 5	267	1.300	5	801	38	10.044.540

Tablo 3'ten görülebileceği gibi, (M) modeli ile ilk kesme planı için 1.250 enindeki bobin seçilmiştir. Kesme planında 2 ve 4 numaralı ürünler yer almıştır. Kesme planının enine, 2 numaralı üründen 2 adet ve 4 numaralı üründen 1 adet yerleştirilmiştir. $2 \times 425 + 365 + 29 = 1244$ enden $29 + 6 = 35$ cm fire oluşmuştur. Mecburi fire olan 29 cm çıkarıldığında kenar firesi 6 cm.'dir. Kesme planının boyu $enb\{610,625\} = 625$ 'tir. Seçilen ürünlerden birinin talebinin tamamen karşılanabilmesi için talepler kesme planında yerleştirilen ürün adetlerine bölünür. 2. ürünün talebin karşılanabilmesi için $400/2 = 200$ adet, 4. ürünün talebinin karşılanabilmesi için ise $1.000/1 = 1.000$ adet ilk kesim planından üretilmesi gerekmektedir. Elde edilen sonuçlardan en küçük değeri alan kesme planı adedini (boyunu) belirler. Kesme planı adedi $enk\{200,1.000\} = 200$ 'dür. Kesme planı sayısını etkileyen bir diğer etmen ise bobinin boyudur. Seçilen kesme planı için gereken toplam bobin boyu stokta olan bobin boyundan büyük ise kesme planı adedi $\left\lfloor \frac{b_j^b}{b^k} \right\rfloor$ (toplam bobinin boyu/kesme planının boyu) olarak güncellenir. İlk

kesme planından kullanılacak kesme planının boyu $625 \times 200 = 125.000$ 'dir. 1.250 enindeki bobinin boyuna eşit olduğu için kesme planı adedi değişmez. Kesme planı 1 ile ilgili tüm bilgiler netleştikten sonra, kesme planında yer alan ürünlerin talepleri ve kullanılan bobinin kalan miktarı güncellenir. Talebi tamamlanan ürünler ve boyları sıfırlanan bobinlerin tekrar seçilmesi engellenir. Bu durumda ikinci ürün ve 1.250 enindeki bobin tekrar seçilmemeleri için listeden çıkarılır. Güncel veriler ile yeni bir kesme planı seçimi yapılır. Örnek problem için çözüm süresi 0,105 saniyedir.

Önerilen matsezgisel algoritmanın, daha büyük boyutlu problemlerde ve farklı s ve c değerleri için de kısa sürede ve başarılı çözümler üretilip üretilmeyeceğini test etmek amacıyla, rassal olarak 50, 100 ve 150 işli problemler türetilmiştir. Bu problemler hem $s=8$ $c=2$ hem de $s=16$ $c=4$ değerleri için çözülmüş ve elde edilen sonuçlar Tablo 4'de sunulmuştur. Tüm problemlerin çözümünde $w_1=0,9$ $w_2=0,1$ ağırlık değerleri kullanılmıştır.

Tablo 4

Büyük Boyutlu Problemlerin Test Sonuçları

ürün adedi	$s=8$ $c=2$			$s=16$ $c=4$		
	f_1	f_2	t (s)	f_1	f_2	t (s)
50	708.099.796	1.657	6,006	264.561.690	1.889	11,572
100	242.718.879	4.172	54,704	148.991.557	4.234	39,312
150	1.266.437.100	8.126	108,185	499.758.876	8.449	132,287

Tablo 4'ten de görülebileceği gibi 150 iş içeren büyük boyutlu problemler bile önerilen algoritma ile kabul edilebilir süreler içinde çözülebilmektedir.

5.2. Bir oluklu mukavva fabrikasında uygulama

Uygulamanın yapıldığı oluklu mukavva fabrikasında yaşanan problem geliştirilen yöntem ile çözülmüştür. Elde edilen sonuçlar, firma tarafından kullanılan kesme planlarıyla elde edilen sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Firmadan alınan aynı dalga boyuna sahip 18 ürüne ait parametre değerleri Tablo 5'te, bobin bilgileri ise Tablo 6'da verilmiştir.

Tablo 5

Firmanın Ürün Bilgileri

i	e_i^u	b_i^u	t_i	d_i
1	2.554	3.130	9.667	10
2	776	2.278	10.500	13
3	1.814	2.764	3.500	7
4	1.814	2.764	6.835	11
5	800	2.466	3.729	15
6	2.692	2.990	9.667	18
7	1.054	2.590	8.200	15
8	754	1.818	1.124	20
9	1.338	3.066	1.942	16
10	460	2.042	30.023	28
11	766	1.954	6.601	2
12	2.460	1.952	150	0
13	2.460	1.990	15.000	7
14	1.522	3.050	2.502	7
15	1.580	2.310	15.000	9
16	1.452	1.804	6.800	14
17	1.200	2.482	7.200	15
18	1.522	3.050	2.871	15

Tablo 6

Firmanın Kullandığı Bobinlerin En ve Boyları

j	1	2	3	4	5	6	7	8
e_j^b	3.740	4.100	4.500	4.600	4.800	5.000	5.200	5.500
b_j^b	8×10^6	8×10^6	8×10^6	8×10^6	8×10^6	8×10^6	8×10^6	8×10^6

Firmanın verilen ürünler ile oluşturduğu kesme planları ve geliştirilen yöntem ile oluşturulan kesme planları ve fire miktarları sırasıyla Tablo 7 ve Tablo 8'de verilmiştir. Kesme planlarında 58cm'lik mecburi kenar firesi toplam fireye dahil edilmemiştir.

Amaçlar doğrultusunda yapılan karşılaştırmada firmanın oluşturduğu kesme planlarının toplam fire alanı 3.579.726.944 cm² iken geliştirilen yöntem ile oluşturulan kesme planlarının toplam fire alanı ise 1.853.605.144 cm² bulunmuştur. Fire miktarı toplamda 1.726.121.800 cm² azaltılmıştır, yaklaşık %48'lik bir iyileşme sağlanmıştır. Bu sonuç, firmanın bir dalga boyuna ait günlük verileri kullanarak elde edilmiştir. Önerilen çözüm yöntemi ile bu küçük örnek için bile büyük bir iyileşme sağlanmış olması, uzun vadede

kullanıldığında firmaya daha da büyük ölçekli kazançlar sağlayabileceğini göstermektedir.

Sonuçlar kesme planlarında yer alan ürünlerin teslim tarihleri açısından karşılaştırıldığında, firmanın çözümünde son üretilen 5 kesme planının hepsinde teslim zamanlarının 2, 0, 7, 7, 9 gibi küçük teslim tarihlerine sahip olduğu göze çarpmaktadır. Oysa önerilen algoritma ile elde edilen çözümde fire amacı daha öncelikli olmasına ve toplam alan firesinin enküçüklenmesine 0,9 ağırlık verilmiş olmasına rağmen küçük teslim zamanlarına sahip işlere mümkün olduğunca öncelik verildiği görülmektedir.

Firmanın oluşturduğu kesme planları ile önerilen matsezigisel algoritmayla üretilen kesme planları karşılaştırıldığında, bazı kesme planlarının (örn:Tablo 7'deki 1 numaralı kesme planı ile Tablo 8'deki 16 numaralı kesme planı) aynı ürünlere sahip olduğu görülebilir. Önerilen yöntemin oluşturduğu kesme planlarının, firmanın

kullanıldığı kesme planları ile benzerlik göstermesi yöntemin gerçek bir problem için kullanılabileceğini ve uygulanabilir olduğunu göstermektedir. Önerilen yöntem ile tüm kesme planlarının oluşturulması ise sadece 0,741 saniye sürmüştür. Algoritmanın çözüm kalitesinin yanı sıra, çözüm süresinin de kısa olması kullanım açısından firmaya avantaj sağlamaktadır.

Tablo 7

Firmanın Oluşturduğu Kesme Planları

<i>kesme planı</i>	<i>bobin</i>	<i>plandaki ürünler</i>	<i>teslim zamanları</i>	<i>kenar firesi (cm)</i>	<i>toplam alan firesi (cm²)</i>
<i>kesme planı 1</i>	5.200	1	10	34	514.434.280
<i>kesme planı 2</i>	5.500	2	13	10	34.170.000
<i>kesme planı 3</i>	5.500	3	7	0	0
<i>kesme planı 4</i>	5.500	4	11	0	0
<i>kesme planı 5</i>	5.500	5	15	138	423.218.400
<i>kesme planı 6</i>	5.500	16	14	58	838.312.280
<i>kesme planı 7</i>	5.500	6	18	172	730.587.200
<i>kesme planı 8</i>	5.200	7	15	32	65.405.824
<i>kesme planı 9</i>	5.000	8	20	4	23.827.200
<i>kesme planı 10</i>	4.800	9	16	0	0
<i>kesme planı 11</i>	5.500	10	28	80	147.409.760
<i>kesme planı 12</i>	5.000	11	15	22	3.220.800
<i>kesme planı 13</i>	5.000	12	0	22	328.350.000
<i>kesme planı 14</i>	4.800	13	7	176	447.691.200
<i>kesme planı 15</i>	4.800	14	7	2	23.100.000
		15	9	750	3.579.726.944

Tablo 8

Önerilen Matsezgisel ile Oluşturulan Kesme Planları

<i>kesme planı</i>	<i>bobin</i>	<i>plandaki ürünler</i>	<i>teslim zamanları</i>	<i>kenar firesi (cm)</i>	<i>toplam alan firesi (cm²)</i>
<i>kesme planı 1</i>	5.500	3	7	0	0
<i>kesme planı 2</i>	5.500	4	11	0	0
<i>kesme planı 3</i>	4.800	7	15	0	0
<i>kesme planı 4</i>	4.800	15	9	2	18.891.180
<i>kesme planı 5</i>	4.500	2	13	0	0
<i>kesme planı 6</i>	4.800	9	16	0	0
<i>kesme planı 7</i>	4.800	10	28	0	0
<i>kesme planı 8</i>	4.800	14	7	0	0
<i>kesme planı 9</i>	4.800	10	28	0	0
<i>kesme planı 10</i>	3.740	18	15	0	0
<i>kesme planı 11</i>	3.740	2	13	2	12.446.992
<i>kesme planı 12</i>	4.500	16	14	2	12.446.992
<i>kesme planı 13</i>	4.500	11	2	6	7.831.632
<i>kesme planı 14</i>	4.600	16	14	4	3.428.200
<i>kesme planı 15</i>	4.600	8	20	4	3.428.200
<i>kesme planı 16</i>	4.800	18	15	4	3.428.200
<i>kesme planı 17</i>	4.800	5	15	10	23.007.780
<i>kesme planı 18</i>	4.800	11	2	10	23.007.780
<i>kesme planı 19</i>	5.200	11	2	10	42.194.000
<i>kesme planı 20</i>	5.200	17	15	10	42.194.000
<i>kesme planı 21</i>	5.000	12	0	22	3.220.800
<i>kesme planı 22</i>	5.000	13	7	22	328.350.000
<i>kesme planı 23</i>	5.000	17	15	20	42.700.000
<i>kesme planı 24</i>	5.200	18	15	20	42.700.000
<i>kesme planı 25</i>	5.200	1	10	34	514.434.280
<i>kesme planı 26</i>	5.200	6	18	58	838.312.280
<i>kesme planı 27</i>	5.500	6	18	58	838.312.280
<i>kesme planı 28</i>	4.800	18	15	176	18.788.000
				366	1.853.605.144

6. Sonuç ve Öneriler

Kesme ve ana malzeme seçimi problemi birçok endüstri için büyük öneme sahiptir. Kesme işlemi sonucunda oluşan fireler maliyete sebep olduğu gibi çevreye de zarar vermektedir. Bu çalışmada bir oluklu mukavva fabrikasında yaşanan kesme problemi ele alınmıştır. Ele alınan problemde toplam firenin en küçüklenmesi ve kesme planlarının teslim zamanı yaklaşan ürünlere öncelik verecek şekilde oluşturulması amaçlanmıştır. Problemin çözümü için matsezgisel bir algoritma geliştirilmiştir. Önerilen matsezgisel algoritmada kullanılmak üzere kesme planına seçilen ürünlerin teslim zamanı toplamını ve fire miktarlarını en küçükleyen çok amaçlı bir matematiksel model geliştirilmiştir. Önerilen matsezgisel algoritmada ürün taleplerinin yanı sıra

eldeki bobin miktarları da dikkate alınmıştır. Uygulamanın yapıldığı firmanın 18 adet ürün çeşidi ve 8 adet bobin çeşidinin yer aldığı problem, geliştirilen çözüm yaklaşımı ile çözülmüştür. Elde edilen sonuçlar ile firmanın mevcut fire miktarı kıyaslanmıştır. Firmanın toplam fire miktarında %48'lik bir azalma sağlanmıştır.

Teşekkür

Bu çalışmanın her aşamasında verdiği bilgiler ve desteği için uygulamanın yapıldığı firmanın üretim planlama sorumlusu Ali BAYAÇ' a teşekkür ederiz.

Çıkar Çatışması

Yazarlar tarafından herhangi bir çıkar çatışması beyan edilmemiştir.

Yazarların Katkıları

Emine DUYSAK, literatür taraması, matematiksel modelin ve matsezigisel algoritmanın geliştirilmesi, deneysel çalışmaların ve uygulamanın gerçekleştirilmesi, makalenin yazımı, İrem DÜLGER, literatür taraması, matematiksel modelin ve matsezigisel algoritmanın geliştirilmesi, deneysel çalışmaların ve uygulamanın gerçekleştirilmesi, makalenin yazımı, Nihal Saliha YILDIZ, literatür taraması, matematiksel modelin ve matsezigisel algoritmanın geliştirilmesi, deneysel çalışmaların ve uygulamanın gerçekleştirilmesi, makalenin yazımı, Sıla GÜMÜŞ, literatür taraması, matematiksel modelin ve matsezigisel algoritmanın geliştirilmesi, deneysel çalışmaların ve uygulamanın gerçekleştirilmesi ve Tuğba SARAÇ, makalede ele alınan problemin ve çözüm yaklaşımının ana fikrinin oluşturulmasında, matematiksel modelin ve matsezigisel algoritmanın geliştirilmesi, makalenin yazımı konularında katkı sağlamışlardır.

Kaynaklar

Bayır, F. (2012). *Kesme problemine sezgisel bir yaklaşım* (Doktora Tezi). İstanbul Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü, İstanbul. Erişim Adresi : <http://nek.istanbul.edu.tr:4444/ekos/TEZ/50641.pdf>

Dyckhoff, H. (1990). A typology of cutting and packing problems. *European Journal of Operational Research*, 44, 145-159. Doi: [https://doi.org/10.1016/0377-2217\(90\)90350-K](https://doi.org/10.1016/0377-2217(90)90350-K)

Han, Y. T. & Chang, S. Y. (2015). A subset sum approach to coil selection for slitting. *International Journal of Industrial Engineering-Theory, Applications and Practice*, 22 (3), 343-353. Retrieved from <http://journals.sfu.ca/ijietap/index.php/ijie/article/view/1573>

Kantorovich, L. V. (1939). The mathematical method of production planning and organization. *Management Science*, 6 (4), 366-422.

Gasimov, R., Sipahioglu, A. & Saraç T. (2007). A multi-objective programming approach to 1.5-

dimensional assortment problem. *European Journal of Operational Research*, 179, 64-79. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2006.03.016>

Saraç, T. & Özdemir, M. S. (2003). A genetic algorithm for 1.5 dimensional assortment problems with multiple objectives. *Lecture Notes in Artificial Intelligence*, 2718, 41-51. Doi: https://doi.org/10.1007/3-540-45034-3_5

Saraç, T. & Özdemir, M. S. (2021), Mixed-integer programming models for 1.5-dimensional cutting problem with technical constraints. *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 36 (1), 291-302. Doi: <https://doi.org/10.17341/gazimmfd.681190>

Savsar, M. & Cogun, C. (1994). Analysis and modeling of a production line in a corrugated box factory. *International Journal of Production Research*, 32 (7), 1571-1589.

Zheng L. Q., Xiong H. & Li D. W. (2008). Using Two-Stage Method to Solve 1.5-Dimensional Cutting Stock Problem. *2008 3rd International Conference on Innovative Computing Information and Control*, 483-483, Dalian, China. Doi: <https://doi.org/10.1109/ICICIC.2008.591>