



ÜÇ BOYUTLU MERMER KESME PROBLEMİ İÇİN BİR TAM SAYILI DOĞRUSAL PROGRAMLAMA MODELİ*

AN INTEGER LINEAR PROGRAMMING MODEL FOR THE THREE-DIMENSIONAL MARBLE CUTTING PROBLEM

Gökhan YILMAZ¹, Yusuf ŞAHİN²



1. Arş. Gör. Dr., Süleyman Demirel Üniversitesi, İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi, Ekonometri Bölümü, yilmazgokhan@sdu.edu.tr, <https://orcid.org/0000-0002-7835-1797>
2. Doç. Dr., Burdur Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi, İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi, İşletme Bölümü, ysahin@mehmetakif.edu.tr, <https://orcid.org/0000-0002-3862-6485>

Makale Türü Article Type
Araştırma Makalesi Research Article

Başvuru Tarihi Application Date
16.12.2022 12.16.2022

Yayına Kabul Tarihi Admission Date
13.03.2023 03.13.2023

DOI
<https://doi.org/10.30798/makuiibf.1220059>

* XVIII. Uluslararası Ekonometri Yöneylem Araştırması ve İstatistik Sempozyumu'nda özet bildirisi olarak sunulmuştur. 05 – 07 EKİM 2017, Trabzon/Türkiye

Öz

Ocaqlardan küp şeklinde çıkarılan mermer bloklar fabrikalarda birtakım kesim işleminden geçmektedir. Bu bloklar kesilerek ilk önce mermer plakalar üretilmektedir. Daha sonra bu plakalardan mermer fayanslar elde edilerek kesim işlemi sonlanmaktadır. Her blokun kesim planı müşterilerin talep ettiği ürünlerin ölçülerine göre oluşturulmaktadır. Bu nedenle her blok için farklı kesim planı belirlenmektedir. Kesim planı oluşturulurken mermer bloklardan maksimum düzeyde ürün elde edilmesine odaklanılmaktadır. Bu çalışmada, mermer blokların kullanım oranının maksimize edilmesi için kesim planı oluşturan bir tam sayılı doğrusal programlama modeli önerilmiştir. Bu model gerçek bir mermer fabrikasının üretim sürecinde kullanılmıştır. Model ile oluşturulan kesim planları sonucunda %15,73'lük bir atık oranıyla müşteri talepleri karşılanmıştır.

Anahtar Kelimeler: Mermer Kesme Problemi, Tam Sayılı Doğrusal Programlama, Atık Minimizasyonu.

Abstract

The marble blocks extracted from the quarries in the form of cubes go through a number of cutting processes in the factories. Marble slabs are produced first by cutting these blocks. Then, marble tiles are obtained from these slabs, and the cutting process is completed. The cutting plan for each block is created according to the dimensions of the products demanded by the customers. Therefore, a different cutting plan is determined for each block. While creating the cutting plan, the focus is on obtaining the maximum product from marble blocks. In this study, an integer linear programming model that creates a cutting plan is proposed to maximize the utilization rate of marble blocks. This model was used in the production process of a real marble factory. As a result of the cutting plans created with the model, customer demands were met with a waste rate of 15.73%.

Keywords: Marble Cutting Problem, Integer Linear Programming, Waste Minimization.

EXTENDED SUMMARY

Research Problem

In this study, the three-dimensional marble cutting problem is discussed. Marble blocks of different dimensions, extracted from the quarries, are brought to the factory. These blocks are cut with a SD (Saw Disc) machine to satisfy customer demands, and marble slabs are produced. Then, these slabs are cut into different lengths and turned into marble tiles. Wastes are generated while obtaining slabs from marble blocks and marble tiles from these slabs. These wastes reduce the block usage rate. In this study, an integer linear programming model that creates a cutting plan is proposed to maximize the utilization rate of marble blocks.

Research Questions

Can an integer linear programming model be developed for the block cutting plan that will maximize the block utilization rate?

Literature Review

Stock-cutting problems have been extensively researched because of their importance in many industrial processes. These problems contain different features according to the application under consideration (Rodrigues et al., 2023). Stock cutting problems in the literature are generally two-dimensional cutting problems. Some of these problems are; fabric (Eroğlu and Orbak, 2020; Tsao et al., 2022), sheet metal (Petunin and Stylios, 2016; Plankovskyy et al., 2020; Diyaley and Chakraborty, 2022), glass (Aksu and Durak, 2016; Durak and Aksu, 2017) and leather (Brás et al., 2010; Alves et al., 2012) cutting problems. Few studies have been found regarding the marble cutting problem. Kahraman (2011) and Özfirat (2012) determined the cutting design of marble blocks and marble planes with an integer programming model in a real-life marble processing factory in order to minimize the amount of waste marble. Baykasoğlu and Özbel (2021), based on the efficiency of the cutting equipment and the effective use of marble blocks, the one-dimensional marble cutting problem was investigated. They proposed a mixed integer linear programming model for the small-size shear problem. For large-size problems, they used the stochastic distribution search method.

Methodology

Within the scope of the study, an integer linear programming (ILP) model is proposed to maximize the utilization of marble blocks. In the objective function of the proposed model, the difference between the volume of the produced plates and the volume of the cut plates is trying to be maximized. There are constraints on the height of the cut block, the number of cut plates, and the amount of demand.

Results and Conclusions

This study focuses on the waste marble problem, which is one of the most important problems in the marble industry. Marbles coming from the quarries to the factories in blocks go through some cutting processes to satisfy customer demands. The cutting process for blocks consists of two stages. In

the first stage, the blocks are cut into slabs. In the second stage, these slabs are cut and tiles are obtained. The model proposed within the scope of the study was applied to the production process of a marble factory, and cutting plans were created that provide a waste rate of 15.73%. The developed model was used in a small-scale production process. In order to prove the effectiveness of the model, it will be useful to use it in larger production processes. It is thought that heuristic and metaheuristic methods can be used in large-scale production processes in future studies.

1. GİRİŞ

Doğal taş, topraktan çıkarılan ve inşaat, dekorasyon ve çevre düzenlemesinde kullanılan malzemeleri ifade eder. Granit, mermer, kireçtaşı, kumtaşı ve arduvaz gibi taşlar ilkel çağlardan beri çeşitli mimari ve dekoratif uygulamalarda kullanılan inşaat malzemeleridir. Doğada kendiliğinden oluşan bu taşlar, dayanıklılıklarının yanı sıra doğal güzellikleri, benzersiz renk ve desen çeşitleri nedeniyle oldukça değerlidir.

Doğal taş sektöründe, malzemelerin çıkarılması, işlenmesi ve dağıtımı gibi birçok faaliyet yürütülmektedir. Ocaklardan çıkarılan doğal taşların inşaat, dekorasyon ve çevre düzenlemesinde kullanılabilmesi için kesme, şekillendirme ve bitim işlemleri uygulanır. Bu sektör birçok ülkede istihdam ve ekonomik büyümenin en önemli lokomotiflerinden biridir. Jeolog, mühendis, taş ocağı işçileri, taş kesiciler ve bitiriciler ile satış ve pazarlama profesyonelleri dahil olmak üzere çok çeşitli alanlarda istihdam sağlar. Aynı zamanda doğal taşların çıkarılması ve işlenmesi için kullanılan ekipman ve aletleri üreten ve tedarik eden şirketler de bu sektörün bir bileşenidir.

Doğal taş sektörü faaliyetlerinin çevreye duyarlı olmasının yanı sıra iş güvenliğini ve yerel toplulukların haklarını koruyacak şekilde yürütülmesi amacıyla devlet kurumları tarafından yasa ve yönetmelikler hazırlanmıştır (Orhan ve Arık, 2019). Bu yasa ve yönetmelikler doğal taş sektöründe faaliyet gösteren işletmelerin maliyetlerini artırmaktadır. İşletmeler bu maliyet artışının üstesinden gelmek için verimliliği artırmak amacıyla dijitalleşme ve otomasyon gibi yeni teknolojilere uyum sağlamaya çalışmaktadır (Gazi vd., 2012).

Kireçtaşı veya dolomitten ısı ve basınç işlemiyle oluşan metamorfik bir kaya olan mermer (Siegesmund ve Török, 2011) doğal taş endüstrisinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Estetik güzelliği, dayanıklılığı ve çok yönlü kullanım alanı nedeniyle değerli olan bu taş inşaat, dekorasyon ve peyzaj uygulamaları için popüler bir seçenek olarak tercih edilmektedir. Mermer, döşeme, tezgâh, duvar kaplama, merdiven, şömine çevresi, anıtsal binalar, heykeller ve diğer mimari detaylar için kullanılmaktadır (Menningen vd., 2018). Ayrıca dekorasyon sektöründe mobilya, vazo ve diğer ev dekor eşyalarında kullanım alanı bulmaktadır.

Mermer endüstrisi, taş ocağından mermerin bloklar halinde çıkarılması, kesimi, cilalanması ve bitirme dahil olmak üzere çeşitli üretim aşamalarından oluşur. Taş ocağından çıkarma işlemi, büyük mermer bloklarının toprak altından çıkarılması faaliyetidir. Bu bloklar daha sonra özel alet ve ekipmanlar kullanılarak plaka ve fayans gibi daha küçük parçalara ayrıldıkları işleme tesislerine (mermer fabrikaları) taşınır. Kesilen plaka ve fayanslar cilalanarak pürüzsüz ve parlak bir yüzey oluşturulur (Traverso vd., 2010).

Dünyada toplam 15 milyar m³ mermer rezervinin olduğu tahmin edilmektedir. Bu rezervin yaklaşık 5 milyar m³'ü Türkiye'de bulunmaktadır (Ticaret Bakanlığı, 2021). Bu nedenle Türkiye'nin doğal taş üretimi ve ihracatında mermer önemli bir konumdadır. Türkiye'nin 2010-2021 yılları arasında gerçekleştirdiği mermer ihracat miktarı (kg) ve değeri (\$) Tablo 1'de verilmiştir. Mermer ihracatı temel olarak ham blok ve plaka mermer ile işlenmiş mermerden oluşmaktadır. Yıllık ham blok ve plaka ihracat miktarı ortalama 5,3 milyar kg iken, işlenmiş mermer ortalama 2,3 milyar kg civarındadır. Yıllık ham blok ve plaka ihracat değeri ortalama 880 milyon \$ iken, işlenmiş mermer ortalama 912 milyon \$ civarındadır.

Tablo 1. Mermer İhracatı

Yıl	Miktar (kg)		Değer (\$)	
	Ham Blok ve Plaka	İşlenmiş Mermer	Ham Blok ve Plaka	İşlenmiş Mermer
2010	5.026.020.471	1.413.183.626	670.449.770	670.502.638
2011	5.247.033.749	1.486.508.862	719.843.392	717.750.430
2012	5.816.743.644	1.628.516.791	902.753.856	780.913.094
2013	6.428.573.611	1.803.732.509	1.139.307.033	910.069.001
2014	5.560.252.502	1.847.741.692	990.659.065	968.039.965
2015	4.898.957.831	1.739.141.838	883.923.234	868.940.662
2016	4.869.254.266	1.775.763.132	871.714.560	801.807.210
2017	6.118.746.755	1.870.476.846	1.112.260.553	795.468.955
2018	5.675.178.021	1.964.144.839	953.905.192	804.573.160
2019	5.060.681.000	6.605.718.000	869.589.790	1.696.076.592
2020	4.026.046.119	2.380.806.577	672.969.053	883.140.012
2021	4.815.636.000	2.711.727.000	798.668.243	1.051.496.801
Ortalama	5.295.260.331	2.268.955.143	882.170.312	912.398.210

Kaynak: Maden Tetkik ve Arama Müdürlüğü, 2022

Üretim prosesleri sırasında ortaya çıkan atık mermer miktarının fazlalığı sektörün en önemli sorunlarının başında gelmektedir. Mermer atıklarının farklı alanlarda kullanılması sağlanarak bu sorun hafifletilmeye çalışılmaktadır (Hebhoub vd., 2011; Marvila vd., 2019; Bilgin vd., 2012; Akbulut ve Güner, 2007). Ancak bu tarz çözümler atık mermer sorununu ortadan kaldırmamaktadır. Kısıtlı mermer kaynaklarının daha verimli kullanılabilmesi için matematiksel yöntemlerden yararlanılması daha etkin sonuçlar verecektir. Bu çalışmada, mermer bloklarından plaka ve fayans üretilirken ortaya çıkabilecek atık miktarının minimizasyonuna odaklanılmıştır. Bunu sağlamak için bir tam sayılı doğrusal programlama modeli önerilmektedir. Modelin amacı atık miktarını en aza indirecek kesim planını belirlemektir. Çalışmanın ikinci bölümünde mermer kesim problemi ayrıntılı olarak açıklanmaktadır. Üçüncü bölümde matematiksel model önerisi, dördüncü bölümde uygulama, son bölümde ise sonuç ve öneriler yer almaktadır.

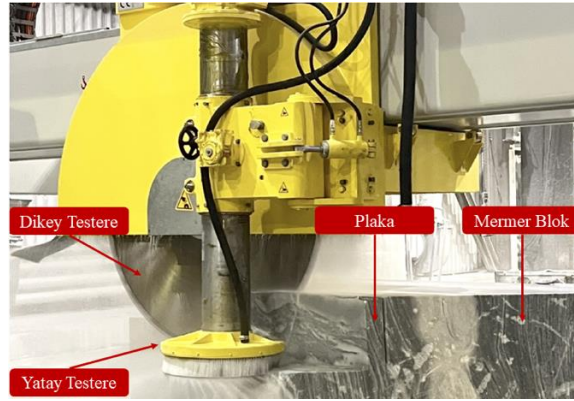
2. MERMER KESME PROBLEMİ

Ocaklardan mermer fabrikalarına gelen ham mermer bloklarına çeşitli kesim işlemleri uygulanarak nihai ürünlere dönüştürülür. Mermer blokları genellikle küp vb. şekillerde olmaktadır. Fabrikalardaki mermer kesim işlemi talep olması durumunda yapılan bir faaliyettir. Talep edilen

ürünlerin toplam hacmine göre ulaşılması en kolay mermer blokları kesim işlemine alınır. Mermer bloklarından ilk önce plakalar elde edilmektedir. Bu plakaların yüksekliği ve eni müşteri taleplerine göre belirlenmektedir. Daha sonra bu plakalar talep edilen uzunluklarda kesilerek nihai ürünler elde edilir.

Mermer bloklarının kesiminde katrak ve SD (Saw Disc) olarak bilinen iki tip makine kullanılmaktadır. Bu çalışmada SD makinelerindeki kesim süreci ele alınmıştır. SD makinelerinde yatay ve dikey testereler bulunmaktadır. Bu testerelerin konumları elde edilecek plakaların yüksekliğine ve enine göre ayarlanmaktadır. SD makinesinde mermer blok kesimi Şekil 1’de gösterilmiştir.

Şekil 1. SD Makinesinde Mermer Blok Kesimi



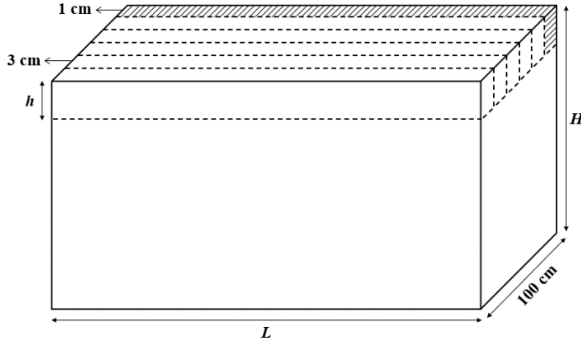
Kaynak: MKS Makina, 2022a

SD makinesine yerleştirilen mermer blokunun kesimine en üstten başlanarak plakalar elde edilmektedir. Testerelerin konumları istenilen plakanın yüksekliğine ve enine göre ayarlandıktan sonra kesilen katman bitmeden testerelerin konumları değiştirilmemektedir. Ancak sonraki katmana geçilirken testerelerin konumları yeniden ayarlanabilmektedir. Bu şekilde tüm blok kesilene kadar işlem devam etmektedir (Ersoy ve Yeşilkaya, 2013). Daha sonra bloklardan elde edilen plakalar talep edilen ürünlerin (fayans) uzunluklarına göre kesilerek nihai ürünler elde edilmektedir. Müşteri talepleri karşılandıktan sonra kalan plakalar ise stoka kaldırılmaktadır.

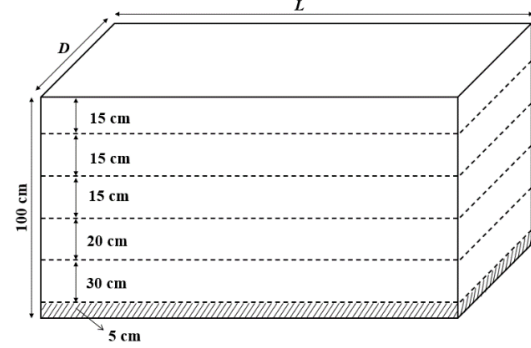
Mermer fabrikalarının ham maddesi olan bloklar mümkün olduğu kadar verimli kullanılmalıdır. Bunu sağlayabilmek için ise blok kesim işlemleri sırasında ortaya çıkan atık miktarı en aza indirilmelidir. Bloklardan plaka üretme sürecinde iki tür atık meydana gelir. Birinci atık türü blokların en kısmında (Atık 1), ikincisi ise yükseklik kısmında (Atık 2) ortaya çıkmaktadır. Örneğin, L cm uzunluğunda, H cm yüksekliğinde ve 100 cm eninde bir mermer blokunun kesilmesine karar verilmiş olsun. Blokun en üst katmanından L cm uzunluğunda, h cm yüksekliğinde ve 3 cm eninde plakalar kesilmesi durumunda 33 adet plaka elde edilebilir. Blokun bu katmanında L cm uzunluğunda, h cm yüksekliğinde ve 1 cm ($100 - 33 \cdot 3 = 1$) eninde atık meydana gelir. Atık 1 olarak ifade edilen bu durum Şekil 2’de gösterilmiştir. Yine L cm uzunluğunda, 100 cm yüksekliğinde ve D cm eninde mermer blokunun kesilmesine karar verilmiş olsun. Blok yüzeyi sırasıyla 15, 15, 15, 20 ve 30 cm

yüksekliklerinde plakalar üretecek şekilde kesim yapılması durumunda toplam plaka yüksekliği 95 cm olacak ve 5 cm atık ortaya çıkacaktır. Atık 2 olarak ifade edilen bu durum Şekil 3'te gösterilmiştir.

Şekil 2. Atık 1 Gösterimi



Şekil 3. Atık 2 Gösterimi

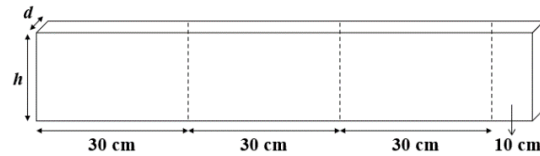


Bloklardan plakalar elde edildikten sonra fayans üretim sürecine geçilmektedir. Plakalar talep edilen fayansların uzunluklarına göre kesilmektedir. Plakaların kesim işlemi Şekil 4'te gösterilmiştir. Plakalar kesilirken plakanın uzunluğundan kaynaklanan atık (Atık 3) meydana gelmektedir. Atık 3 örneği; 100 cm uzunluğa, h cm yüksekliğe ve d cm ene sahip bir plaka, 30 cm uzunluğa, h cm yüksekliğe ve d cm ene sahip bir fayans üretmek için kesilsin. Bu plakadan 3 adet fayans elde edilebilir. Plakanın uzunluk kısmında 10 cm'lik ($100 - 3 \cdot 30 = 10$) atık meydana gelmektedir. Bu durum Şekil 5'te gösterilmiştir.

Şekil 4. Plaka Kesimi



Şekil 5. Atık 3 Gösterimi



Kaynak: MKS Makina, 2022b

Stok kesme problemleri, birçok endüstriyel süreçteki önemleri nedeniyle yoğun bir şekilde araştırılmıştır. Bu problemler, ele alınan uygulamaya göre farklı özellikler içerir (Rodrigues vd., 2023). Literatürde yer alan stok kesme problemleri genel olarak iki boyutlu kesim problemleridir. Bu problemlerden bazıları; kumaş (Eroğlu ve Orbak 2020; Tsao vd., 2022), metal levha (Petunin ve Stylios, 2016; Plankovskyy vd., 2020; Diyaley ve Chakraborty, 2022), cam (Aksu ve Durak, 2016; Durak ve Aksu, 2017) ve deri (Brás vd., 2010; Alves vd., 2012) kesme problemleridir. Mermer kesme problemiyle ilgili olarak az sayıda çalışmaya rastlanmıştır. Kahraman (2011) ve Özfırat (2012), atık mermer

miktarını minimize etmek için gerçek hayattaki bir mermer işleme fabrikasında, mermer blok ve mermer düzlemlerin kesim tasarımını tam sayılı programlama modeliyle belirlemiştir. Baykasoğlu ve Özbel (2021), kesme ekipmanı verimliliği ve mermer blokların etkin kullanımı temel alınarak tek boyutlu mermer düzlem kesme problemi incelenmiştir. Küçük boyutlu kesme problemi için bir karma tam sayılı doğrusal programlama modeli önermiştir. Büyük boyutlu problemler için ise stokastik dağılım arama yöntemini kullanmıştır. Bu çalışmada ise, mermer bloktan elde edilen ürün miktarının hacimsel olarak maksimize edilmesi için üç boyutlu kesim problemini iki boyuta indirgeyen bir tam sayılı programlama modeli önerilmiştir. Takip eden bölümde önerilen matematiksel modelin ayrıntılarına yer verilmektedir.

3. MATEMATİKSEL MODEL ÖNERİSİ

Bu bölümde, üç boyutlu mermer kesim problemi için önerilen matematiksel modelde kullanılan notasyonlarla birlikte modelin detayları açıklanmıştır. Model geliştirilirken bloklarda herhangi bir kırık, çatlak ve boşluk olmadığı varsayılmıştır. Ayrıca su yolu göz ardı edilerek kesim yönü sabit kabul edilmiştir. Modelde kullanılan notasyonlar Tablo 4’te verilmiştir. Modelin amaç fonksiyonu Denklem (1)’de, kısıtları ise Denklem (2-5)’te ifade edilmiştir.

Tablo 4. Modelde Kullanılan Notasyonlar

Kümeler:

I Blok kümesi

J Fayans kümesi

Parametreler:

bu_i i . bloğun uzunluğu

by_i i . bloğun yüksekliği

be_i i . bloğun eni

fu_j j . fayansın uzunluğu

fy_j j . fayansın yüksekliği

fe_j j . fayansın eni

T_j j . fayans talep miktarı

Karar Değişkenleri:

X_{ij} i . bloktan j . fayans yüksekliğinde elde edilecek birim plaka sayısı

Y_{ij} i . bloktan j . fayans için elde edilen plakaların kesilme sayısı

Amaç Fonksiyonu:

$$\text{Max} \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} \left(bu_i fy_j fe_j \left\lfloor \frac{be_i}{fe_j} \right\rfloor X_{ij} - bu_i fy_j fe_j Y_{ij} \right) \quad (1)$$

Kısıtlar:

$$\sum_{j \in J} fy_j X_{ij} \leq by_i \quad \forall i \in I \quad (2)$$

$$\left\lfloor \frac{be_i}{fe_j} \right\rfloor X_{ij} - Y_{ij} \geq 0 \quad \forall i \in I, \forall j \in J \quad (3)$$

$$\sum_{i \in I} \left[\frac{bu_i}{fu_j} \right] Y_{ij} = T_j \quad \forall j \in J \quad (4)$$

$$X_{ij}, Y_{ij} \in \mathbb{Z}^+ \cup \{0\} \quad (5)$$

Denklem (1)'de ifade edilen amaç fonksiyonunda, üretilen plakaların hacmi ile kesilen plakaların hacmi arasındaki fark maksimize edilmeye çalışılmıştır. Böylece atık oranının minimize edilmesi sağlanmış olacaktır. Denklem (2), *i*. bloktan elde edilecek birim plakaların toplam yüksekliğinin *i*. blok yüksekliğinden fazla olmasını engelleyen kısıttır. Denklem (3)'te yer alan kısıt ile fayans üretmek için kesilecek plaka sayısının toplam plaka sayısından fazla olmaması sağlamaktadır. Denklem (4), müşterilerin talep ettiği miktarda fayans üretilmesini garanti eder. Denklem (5) ise modelin karar değişkenlerinin pozitif tamsayı veya sıfır değerlerini alabileceğini gösteren işaret koşuludur.

4. UYGULAMA

Bu çalışmada bir mermer fabrikasındaki blok kesim süreci ele alınmıştır. Fabrikaya üç farklı boyutta 2500'er adet mermer fayans talebi gelmiştir. Bu talebin karşılanabilmesi için talep edilen fayansların toplam hacmine eşit veya daha büyük hacme sahip mermer bloklarının kesilmesi gerekmektedir. Kesilecek mermer blokları ulaşılması en kolay bloklar arasından seçilmektedir. Gelen taleplerin boyut (cm) ve miktar (adet) bilgileri Tablo 2'de, kesilmesine karar verilen blokların boyut (cm) bilgileri ise Tablo 3'te verilmiştir. Talep edilen fayansların toplam hacmi 30 m³, kesilecek blokların toplam hacmi ise 36,37 m³'tür.

Tablo 2. Talep Bilgileri

Fayans No	Uzunluk	Yükseklik	En	Talep
Fayans 1	60	20	2	2500
Fayans 2	60	30	2	2500
Fayans 3	50	40	3	2500

Tablo 3. Blok Bilgileri

Blok No	Uzunluk	Yükseklik	En
Blok 1	210	180	152
Blok 2	285	170	184
Blok 3	290	165	160
Blok 4	290	130	140
Blok 5	297	197	150

Blokların kesim planı fabrikada çalışan personel tarafından belirlenmektedir. Görevli personel atık miktarını minimize edecek blok kesim planını yaparken basit hesaplamalar kullanmaktadır. Bu hesaplamalar atık miktarının minimizasyonunu garanti etmemektedir. Bu nedenle, blokların daha verimli kullanılabilmesi için bir önceki bölümde detayları anlatılan tam sayılı programlama modeli önerilmiştir. Bu model GAMS 22.5 programında çözülmüştür.

Modelin çözülmesiyle blokların kesim planı ve talep edilen fayansların üretimi için kesilecek plakalar belirlenmiştir. Blokların yüzey kesim planları Şekil 6’da ifade edilmiştir. Fayans üretimi için kesilecek plaka sayıları, stoka kaldırılacak plaka sayıları ve bloklardan elde edilen toplam plaka sayıları Tablo 5’te, her bir bloktan elde edilen fayans sayıları ise Tablo 6’da verilmiştir. Bloklar matematiksel model ile elde edilen plana göre kesildiğinde blokların kullanım oranı Tablo 7’de ayrıntılı olarak sunulmuştur.

Tablo 7’de yer alan sonuçlar incelendiğinde, 36,37 m³’lük blokların 30 m³’lük kısmı müşteri talebini karşılamak için kullanılırken, geriye kalan 6,37 m³’ün 0,65 m³’lük kısmı stoka kaldırılarak daha sonra gelecek talepler için kullanılacaktır. 5,72 m³’lük kısım ise hiçbir ürüne dönüşmeyen atık miktarını oluşturmaktadır. Böylece kesilen blokların atık oranı %15,73 olarak hesaplanmıştır. Bu oran sonraki üretim aşamalarında kesilecek blokların ve talep edilen fayansların ebatlarına göre değişkenlik gösterebilir.

Şekil 6. Blokların Yüzey Kesim Planları

Blok 1	Blok 2	Blok 3	Blok 4	Blok 5
Plaka 2	Plaka 1	Plaka 1	Plaka 1	Plaka 2
Plaka 2	Plaka 2	Plaka 1	Plaka 1	Plaka 3
Plaka 3	Plaka 3	Plaka 1	Plaka 2	Plaka 3
Plaka 3	Plaka 3	Plaka 1	Plaka 2	Plaka 3
Plaka 3	Plaka 3	Plaka 1	Plaka 2	Plaka 3
		Plaka 2		
		Plaka 2		

Tablo 5. Plaka Sayıları

Blok No	Kesilecek Plaka Sayıları			Stok Plaka Sayıları			Toplam Plaka Sayıları		
	Plaka 1	Plaka 2	Plaka 3	Plaka 1	Plaka 2	Plaka 3	Plaka 1	Plaka 2	Plaka 3
Blok 1	0	152	150	0	0	0	0	152	150
Blok 2	92	92	183	0	0	0	92	92	183
Blok 3	393	160	0	7	0	0	400	160	0
Blok 4	140	210	0	0	0	0	140	210	0
Blok 5	0	49	197	0	26	3	0	75	200
Toplam	625	663	530	7	26	3	632	689	533

Tablo 6. Fayans Sayıları

Blok No	Fayans 1	Fayans 2	Fayans 3
Blok 1	0	456	600
Blok 2	368	368	915
Blok 3	1572	640	0
Blok 4	560	840	0
Blok 5	0	196	985
Toplam	2500	2500	2500

Tablo 7. Blok Kullanım Oranı

Blok No	Toplam Hacim	Fayans Hacmi	Stok Hacmi	Atık Hacmi	Atık (%)
Blok 1	5,75	5,24	0,00	0,50	8,77
Blok 2	8,91	7,70	0,00	1,22	13,65
Blok 3	7,66	6,08	0,08	1,50	19,57
Blok 4	5,28	4,37	0,00	0,91	17,24
Blok 5	8,78	6,62	0,57	1,59	18,12
Toplam	36,37	30,00	0,65	5,72	15,73

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada mermer sektörünün en önemli problemlerinden olan atık mermer sorununa odaklanılmıştır. Ocaklardan bloklar halinde fabrikalara gelen mermerler müşteri taleplerini karşılamak için birtakım kesim işleminden geçmektedir. Blokların kesim süreci iki aşamadan oluşmaktadır. Birinci aşamada bloklar plakalar halinde kesilmektedir. İkinci aşamada ise bu plakalar kesilerek fayanslar elde edilmektedir. Bu kesim süreçlerinde blok kullanım oranının maksimize edilmesi için bir tam sayılı doğrusal programlama modeli geliştirilmiştir. Bu sayede hem plaka hem de fayans üretim sürecinde ortaya çıkacak atık miktarını en aza indirecek kesim planı oluşturulmaya çalışılmıştır. Geliştirilen model, bir mermer fabrikasının üretim sürecine uygulanmış ve %15,73'lük atık oranı sağlayan bir kesim planı oluşturulmuştur. Geliştirilen model hacimsel olarak küçük bir üretim sürecinde kullanılmış olup, modelin etkinliğinin kanıtlanabilmesi için daha büyük hacimli üretim süreçlerinde kullanılması faydalı olacağı değerlendirilmektedir. Gelecekte yapılacak çalışmalarda, önerilen matematiksel modelin büyük boyutlu üretim süreçlerinde sezgisel ve metasezgisel yöntemler kullanılarak çözülebileceği düşünülmektedir.

KAYNAKÇA

- Akbulut, H., ve Gürer, C. (2007). Use of aggregates produced from marble quarry waste in asphalt pavements. *Building and environment*, 42(5), 1921-1930.
- Aksu, D. T., Durak B. (2016). A dynamic programming algorithm for the online cutting problem with defects and quality grades. *IFAC-PapersOnLine* 49(12), 17-22.
- Alves, C., Bras, P., Valerio de Carvalho, J. M., ve Pinto, T. (2012). A variable neighborhood search algorithm for the leather nesting problem. *Mathematical Problems in Engineering*, 2012.
- Baykasoğlu, A., ve Özbel, B. K. (2021). Modeling and solving a real-world cutting stock problem in the marble industry via mathematical programming and stochastic diffusion search approaches. *Computers ve Operations Research*, 128, 105173.
- Bilgin, N., Yeprem, H. A., Arslan, S., Bilgin, A., Günay, E., ve Marşoglu, M. (2012). Use of waste marble powder in brick industry. *Construction and Building Materials*, 29, 449-457.
- Brás, P., Alves, C., de Carvalho, J. V., ve Pinto, T. (2010). Exploring new constructive algorithms for the leather nesting problem in the automotive industry. *IFAC Proceedings Volumes*, 43(17), 225-230.
- Diyaley, S., ve Chakraborty, S. (2022). Metaheuristics-based nesting of parts in sheet metal cutting operation. *Operational Research in Engineering Sciences: Theory and Applications*, 5(2), 1-16.
- Durak, B., Aksu, D. T. (2017). Dynamic programming and mixed integer programming based algorithms for the online glass cutting problem with defects and production targets. *International Journal of Production Research*, 55(24), 7398-741.
- Eroğlu, D. Y., Orbak, A. Y. (2020). Simulated Annealing Algorithm and Implementation Software for Fabric Cutting Problem. *Textile and Apparel*, 30(1), 10-19.

- Ersoy, M., ve Yeşilkaya, L. (2013). Choice of marble block cutting machine by using Analytic Hierarchy Process (AHP) method. *International Journal of Information Technology and Business Management*, 19(1), 67-80.
- Gazi, A., Skevis, G., ve Founti, M. A. (2012). Energy efficiency and environmental assessment of a typical marble quarry and processing plant. *Journal of cleaner production*, 32, 10-21.
- Hebhoub, H., Aoun, H., Belachia, M., Houari, H., ve Ghorbel, E. (2011). Use of waste marble aggregates in concrete. *Construction and Building Materials*, 25(3), 1167-1171.
- Kahraman, B. (2011). Three dimensional cutting problem: an integer programming approach. *Mathematical and Computational Applications*, 16(1), 105-112.
- Maden Tetkik ve Arama Müdürlüğü (2022). Erişim adresi: <https://www.mta.gov.tr/v3.0/bilgi-merkezi/maden-dis-ticaret>
- Marvila, M. T., Alexandre, J., de Azevedo, A. R., ve Zanelato, E. B. (2019). Evaluation of the use of marble waste in hydrated lime cement mortar based. *Journal of Material Cycles and Waste Management*, 21(5), 1250-1261.
- Menningen, J., Siegesmund, S., Lopes, L., Martins, R., ve Sousa, L. (2018). The Estremoz marbles: an updated summary on the geological, mineralogical and rock physical characteristics. *Environmental earth sciences*, 77(5), 1-31.
- MKS Makina (2022 a). Erişim adresi: <https://www.mks.com.tr/tr/urun/blok-kesme-este-st-makinesi-.html#>
- MKS Makina (2022 b). Erişim adresi: <https://www.mks.com.tr/tr/urun/kafa-kesme-boy-ebatlama-makinesi-.html>
- Orhan, H., ve Arık, F. (2019). Doğal taşların işletme mevzuatı ve çevre dostu uygulama örnekleri. *Mavi Gezegen Popüler Yerbilim Dergisi*, 26, 14-25.
- Özfirat, P. M. (2012). An integer programming approach for the three-dimensional cutting planning problem of marble processing industry. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 59(9), 1057-1064.
- Petunin, A. A., ve Stylios, C. (2016). Optimization models of tool path problem for CNC sheet metal cutting machines. *IFAC-PapersOnLine*, 49(12), 23-28.
- Plankovskyy, S., Tsegelnyk, Y., Shypul, O., Pankratov, A., ve Romanova, T. (2020). Cutting irregular objects from the rectangular metal sheet. In *Integrated Computer Technologies in Mechanical Engineering* (pp. 150-157). Springer, Cham.
- Rodrigues, C. D., Cherri, A. C., ve de Araujo, S. A. (2023). Strip based compact formulation for two-dimensional guillotine cutting problems. *Computers & Operations Research*, 149, 106044.
- Siegesmund, S., ve Török, Á. (2011). Building stones. In *Stone in Architecture* (pp. 11-95). Springer, Berlin, Heidelberg.
- Ticaret Bakanlığı (2021). Erişim adresi: <https://ticaret.gov.tr/data/5b87000813b8761450e18d7b/Do%C4%9Fal%20Ta%C5%9Flar%20Sekt%C3%B6r%20Raporu%202021.pdf>
- Traverso, M., Rizzo, G., ve Finkbeiner, M. (2010). Environmental performance of building materials: life cycle assessment of a typical Sicilian marble. *The international journal of life cycle assessment*, 15(1), 104-114.
- Tsao, Y. C., Delicia, M., ve Vu, T. L. (2022). Marker planning problem in the apparel industry: Hybrid PSO-based heuristics. *Applied Soft Computing*, 123, 108928.