

KISITLAR TEORİSİ YAKLAŞIMI İLE SÜREÇ ANALİZİ VE ÜRÜN KARMASI OPTİMİZASYONU*

Product Mix Optimization and System Analyze With The Theory of Constraints Approach

Nazire ÖZKE
Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı

Zahide Figen ANTMEN
Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı

ÖZET

Firmaların pazar payını ve karlılıklarını arttırabilmeleri için, her üretim sisteminde en az bir tane kısıtlı kaynak olduğunu ve bu kısıtlı kaynağa yönelik çözüm bulunması gerektiğini savunan kısıtlar teorisi, oldukça önemli bir yönetim disiplindir. Sistemdeki darboğazın tespit edilip yönetilmesi ile birlikte üretim sürecindeki beklentiler ortadan kalkacağı için ürünler zamanında üretilip müşteriye sunulabilecektir. Ayrıca üretim hattındaki darboğaz kaynağın verimliliği arttırılacağı için maliyetler azalacak, böylece firma karlılık hedefine ulaşabilecektir.

Bu çalışmanın amacı kısıtlar teorisinin beş adımlı sürekli iyileştirme süreci ile sistemdeki kısıtlı kaynaklar varlığında optimum ürün karması belirlemektir. Bu çerçevede metal işleme sektöründe faaliyet gösteren bir işletmedeki çoklu darboğaz probleminin çözümüne yönelik araştırma yapılmıştır. Yapılan uygulama ile sistemdeki kaynakların kapasite kullanım oranları incelenerek darboğazlar tespit edilmiş ve optimal ürün karması belirlenmiştir. Alternatif olarak belirlenen senaryo ile yeni bir algoritma önerilmiş ve elde edilen sonuçlar mevcut durumla karşılaştırılmıştır. Ele alınan problem tamsayı doğrusal programlama modeli olarak ifade edilmiş ve GAMS.ide programı ile çözülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Kısıtlar Teorisi, Darboğaz, Ürün Karması, Doğrusal Programlama

ABSTRACT

Theory of constraints is a very important management discipline which argues that there is at least one limited resource in each production system and a solution should be found for this limited resource in order to increase the market share and profitability of firms. As the bottleneck in the system is identified and managed, the productions will be produced on time and presented to the customer, since the waitings in the production process will be eliminated. Moreover, costs will be reduced as the efficiency of the bottleneck in the production line will be increased, thus the company can reach its profitability target.

The aim of this study is to determine the optimum product mix under the presence of limited resources in the system with the five-step continuous improvement process of the theory of constraints. Within this framework, research has been conducted to solve the multiple bottleneck problems in a company

* Aynı Başlıklı Yüksek Lisans Tezinden Üretilmiştir.

operating in the metal processing industry. In the application, by analyzing capacity utilization rates of the resources bottleneck resources in the system were identified and the optimal product mix was determined. A new algorithm was proposed with the alternative scenario and the results were compared with the current situation. The problem was stated as an integer linear programming model and solved by optimization package program called GAMS.ide.

KeyWords:Theory Of Constraints, Bottleneck, Product Mix, Linear Programming

Giriş

Rekabet piyasasında önemi her geçen gün biraz daha artan üretim süreçlerinin yönetimi, minimum maliyet, maksimum memnuniyet düzeyinde müşteri beklentilerini karşılamak zorundadır. Potansiyel müşterilerin talepleri karşılanırken ürünlerin zamanında ve hızlı bir şekilde üretilmesi gerekmekte, bunun için de üretim sürecinde ortaya çıkabilecek kısıtların belirlenerek üretim sürecinin verimli hale getirilmesi gerekmektedir.

Uluslararası literatürde Theory of Constraints (Kısıtlar Teorisi) olarak adlandırılan bu yaklaşım 1980'li yıllarda Dr. Eliyahu M. Goldratt tarafından geliştirilmiş bir metodolojidir. Bu yöntemde göre üretim sürecinin tamamına vurgu yapılarak, her sistemde darboğaz teşkil eden kaynaklar olduğu ve bu kaynakların işletmenin performansını belirlediği görüşü ileri sürülmektedir (Ünal, Tanış ve Küçüksavaş, 2007).

Bu çalışma ile işletmelerin kârlılıklarını arttırılabilmesi ve rekabet üstünlüğü sağlayabilmesi için, bir üretim işletmesi için kısıtlar teorisi yaklaşımı altında optimal ürün karmasının belirlenmesi amaçlanmıştır, bu çerçevede yapılan uygulama ile üretim sürecinde ortaya çıkan kısıtların giderilmesinin işletme maliyetlerini ve kaynak kullanımını nasıl etkilediği incelenmiştir. Mevcut üretim sürecindeki kısıtlar dikkate alınarak belirlenen ürün karması ile önerilen alternatif sistem modeli tamsayı doğrusal programlama modeli olarak çözülmüş ve sonuçlar karşılaştırılmıştır.

Literatür Taraması

Antmen ve Erik (2019), çalışmalarında kısıtlar teorisi ile klasik başa baş analizini entegre ederek ele alınan işletmenin mevcut kapasitesini ne kadar verimle kullandığını incelemiştir; işletmede tespit edilen darboğaz kaynaklara göre üretim planı oluşturmuştur.

Saha ve Mohana (2018), tarafından yapılan çalışmada TOC yaklaşımı esas alınarak tarımsal üretim sektöründe performans iyileştirmesi hedeflenmiştir. Çalışmanın amacı Drum-buffer-rope yöntemi ile üretim verimliliğini ve yatırım getirisini arttırmak olarak belirlenmiştir.

Pacheco ve diğerleri (2018), şirketlerin rekabet gücünü arttırmak için kısıtlar teorisi ve yalın üretim yaklaşımlarını entegre eden yeni modeller geliştirmeyi amaçlayan bir gündem üzerine çalışmıştır. Bu kapsamda her iki modelin güçlü ve zayıf yanları ile uygulamalardaki boşlukları belirten eleştirel ve karşılaştırmalı bir analiz yapılmıştır.

Tsai (2018), tekstil sektöründe karbon emisyonları, enerji geri dönüşümü ve atıkların yeniden kullanımı ile ilgili çevresel konular ele alınmış; Kısıtlar Teorisi (TOC) ve Faaliyet Tabanlı Maliyetlendirme (ABC) bileşimi üzerinde çalışılmıştır. Bu kapsamda optimal ürün karması belirleyerek kar maksimizasyonu sağlamak için matematiksel bir programlama modeli önerilmiştir.

Mabin, Babington ve diğerleri (2017), tipik olarak sınırlı bir bütçe dahilinde hizmet talebini karşılama gereksinimi ile mücadele eden devlet hastanelerindeki darboğazları tespit etmek ve çözüm seçeneklerini araştırmak için Kısıtlar Teorisi yaklaşımını kullanmışlardır. Seçilen bir devlet hastanesinde verilen hizmet için akış diyagramları oluşturulmuş ve bekleyen hasta sayısının fazla olduğu bölümler belirlenmiştir.

Golmohammadi (2015), otomotiv sektöründe faaliyet gösteren bir işletmede DBR(drum-buffer-rope) sistemi ile mevcut üretim planlama performansı araştırılmıştır. Yavaş çalışarak darboğaz oluşturan kaynağı tespit etmek için üretim hattı Arena’da simüle edilmiştir.

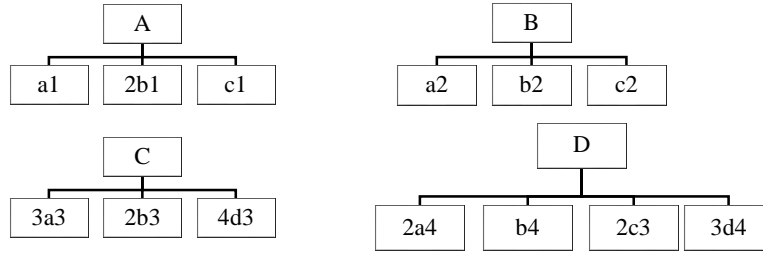
Sheshaayee ve Vijaykumar (2015), tarafından yapılan çalışmada hızlı yazılım geliştirme (agile software) tekniklerinin uygulama sürecindeki potansiyel kısıtları belirleme ve ortadan kaldırma üzerine araştırma yapılmıştır.

Materyal ve Metot

Bu bölümde çalışmanın amacı ve yöntemi ile ürün karması optimizasyonu hakkında bilgi verilmiştir. Yapılan uygulama, çalışmanın amacına bağlı olarak 5 ana adımdan oluşmaktadır. . Bunlardan ilki ele alınan işletmedeki ana ürün gupları için birim işlem sürelerinin hesaplanması, ikincisi firmanın üretim maliyetlerinin hesaplanması, üçüncüsü üretim sisteminin analizi ve darboğazların tespit edilmesi, dördüncüsü kısıtlı kaynaklara göre üretim önceliklerinin ve optimal ürün karmasının belirlenmesi, beşincisi ise alternatif senaryo önerisi ile karlılık analizi olarak belirlenmiştir.

Materyal

Yapılan çalışma, bir sanayi kuruluşunun ihtiyacından yola çıkılarak üretilmiştir. İhtiyaca konu olan aktivite, kısıtlar teorisi kapsamında üretim işletmesindeki darboğaz kaynakların tespit edilip iyileştirilmesi, optimum ürün karmasının belirlenmesi ve maliyetlerin azaltılması yoluyla karlılığın artırılması olarak belirlenmiştir. Çalışma kapsamında incelenen işletmede A,B,C ve D olmak üzere dört farklı ürün üretilmektedir. Bu ürünler çok parçalıdır ve değişik üretim birimlerinde işlem görüp daha sonra montajı yapılarak “set” olarak nitelendirilen ana ürün ortaya çıkmaktadır. Söz konusu ürünlere ait ürün ağaçları Şekil 1’de görüldüğü gibidir.



Şekil 1. Ürün ağaçları

Tablo 1’de 6 aylık bir süreç esas alınarak müşterilerden gelen talepler doğrultusunda yapılan ve montajlanmak üzere ana ürünleri oluşturan alt parçalara ait üretim bilgileri bulunmaktadır.

Tablo 1. Alt parçalara ait 6 aylık üretim bilgileri

ALT PARÇALARA AİT ÜRETİM BİLGİLERİ							
Ürün Kodu/Ay	Ocak	Şubat	Mart	Nisan	Mayıs	Haziran	Toplam
a1	10000	9800	9500	9600	10000	9000	57900
a2	7500	7000	7200	7300	7100	7000	43100
a3	24000	24600	24300	23700	25200	24000	145800
a4	13000	14000	14800	13800	13600	14000	83200
b1	20000	19600	19000	19200	20000	18000	115800
b2	7500	7000	7200	7300	7100	7000	43100
b3	16000	16400	16200	15800	16800	16000	97200
b4	6500	7000	7400	6900	6800	7000	41600
c1	10000	9800	9500	9600	10000	9000	57900
c2	22500	21000	21600	21900	31300	21000	139300
c3	13000	14000	14800	13800	13600	14000	83200
d3	32000	32800	32400	31600	33600	32000	194400
d4	19500	21000	22200	20700	20400	21000	124800

Metot

Bu çalışmada ilgili firmanın üretim sürecindeki darboğazların tespit edilmesi ve ürün karmasının oluşturulması problemine çözüm yaklaşımı olarak kısıtlar teorisi, bulanık mantık ve tamsayı doğrusal programlama yöntemleri kullanılmıştır.

Rastgele olan belirsizlik halleri için, istatistik veya matematik yöntemlerinin kullanılması uygun olmamakta; bu tür belirsizlikler bulanık (fuzzy) olarak tanımlanmakta ve modellenmektedir. Bu yaklaşım kapsamında firmadan alınan

geçmiş 6 aylık müşteri talepleri, Ortalama En Büyük Üyelik Yöntemi ile durulaştırılmış ve kesin sayılara dönüştürülmüştür.

Uygulamada işletmeden alınan veriler kısıtlar teorisi yaklaşımı altında analiz edilmiş, geleneksel ve geliştirilmiş algoritma esaslı olmak üzere iki ayrı ürün karması hazırlanmıştır. Optimum üretim önceliklerine sahip olduğu düşünülen ürün karmasının olurlu çözümünün olup olmadığını test etmek amacıyla GAMS.ide programında tamsayı doğrusal programlama modeli kurulmuş ve test edilmiştir.

Bulgular ve Tartışma

Talepler dönemsel olarak belirsiz olduğu ve kesin sayılarla ifade edilemediği için üçgensel bulanık sayılar kullanılmıştır. Tablo 2'de üçgensel bulanık talep değerleri verilmiştir.

Tablo 2. Üçgensel üyelik fonksiyonu şeklinde ifade edilen talep değerleri

1. Üçgensel Üyelik Fonksiyonu			2. Üçgensel Üyelik Fonksiyonu		
a1	a2	a3	a1	a2	a3
7650	7681	9650	7681	11439	11500
5950	6282	7183	6282	8037	8625
20145	22604	24300	22604	25574	28980
11050	13284	13867	13867	14059	17020
15300	18583	19300	19300	19234	23000
5950	6764	7183	7183	7475	8625
13430	15929	16200	16200	16130	19320
5525	6039	6933	6933	7687	8510
7650	9068	9650	9650	9888	11500
17850	19822	23217	23217	22625	35995
11050	11275	13867	13867	16308	17020
26860	30226	32400	32400	33997	38640
16575	19253	20800	20800	21733	25530

Ancak modelin çözümü için durulaştırma ile bulanık sayılar kesin sayılara dönüştürülmelidir. Durulaştırma işlemi için Ortalama En Büyük Üyelik yöntemi kullanılmıştır. Bu yöntemle göre küme $A = (a_1, a_2, a_3)$ olmalıdır. Bulanık mantık bu noktada bir α katsayısına bağlı olarak a_2 ye yakın değerlerin, bu değere yüklenen anlam ile temsil edileceğini varsaymaktadır. Bu çerçevede iki ayrı üçgensel üyelik fonksiyonu oluşturulmuştur. 1.üçgensel üyelik fonksiyonunda; her bir ürüne ait 6 aylık müşteri talepleri içerisinde en küçük olan talep değerinin 0,85 katı a_1 ; ilgili ürüne ait 6 aylık taleplerin ortalaması a_3 ; a_1 ile a_3 arasında kalan ve rassal olarak

belirlenen talep değeri ise a_2 olarak tanımlanmıştır. İkinci üyelik fonksiyonunda; her bir ürüne ait 6 aylık müşteri taleplerinin ortalaması a_1 ; her bir ürüne ait 6 aylık taleplerin maksimumunun 1,15 katı a_3 ; a_1 ile a_3 arasında kalan ve rassal olarak belirlenen talep değeri ise a_2 olarak tanımlanmıştır. Ortalama En Büyük Üyelik Yöntemi ile durulaştırılmış a^* değerlerine dönüştürülmüştür. Bu yöntemle göre;

a_1^{α} ve a_3^{α} sayıları a_2 normal değerinin komşuluğunu oluşturan aralığın alt ve üst sınır değerleridir. a_1^{α} ve a_3^{α} değerleri aşağıdaki formüller yardımıyla bulunmuştur. α değeri bulanık mantık yaklaşımına göre kesim katsayısı olarak ifade edilir ve uygulamadaki değeri 0,5 olarak alınmıştır.

$$a_1^{\alpha} = \alpha(a_2 - a_1) + a_1 \quad (1)$$

$$a_3^{\alpha} = a_3 - (a_3 - a_2)\alpha \quad (2)$$

Tablo 3. Üçgensel üyelik fonksiyonlarına göre hesaplanan tahmini talep değerleri

Ürün Kodu	Tahmin	Ürün Kodu	Tahmin
a1	9575	b4	6942
a2	7217	c1	9575
a3	24375	c2	22483
a4	13883	c3	13883
b1	19150	d3	32500
b2	7217	d4	20825
b3	16250		

Ayda 20 gün, günde tek vardiya ve her vardiyada 8 saat çalışan işletmenin aylık çalışma süresi, işletmenin mevcut kapasitesi olarak anılacak olup, toplam süre $20 \cdot 8 \cdot 60 = 9.600$ dakikadır. Bu durumda her bir ana ürün için, işlem gördüğü makinelerin aylık çalışma süreleri (teorik olarak) ve ortalama talep miktarları dikkate alınarak birim işlem süreleri hesaplanmıştır.

Firmada sipariş maliyet sistemi uygulandığı varsayılmaktadır. Genel üretim giderleri oranı direkt işçilik saatine göre hesaplanmaktadır. Direkt işçilik giderleri, mamulün üretiminde doğrudan çalışan işçilere ödenen ücretlerdir. Genel üretim giderleri ise üretimle ilgili direkt hammadde ve direkt işçilik dışında kalan giderlerdir. Çapak alma makinesi 9.600 dakika kapasitesi ile talep için gerekli olan 11.424 dakikayı karşılayamamaktadır. Gruplama makinesi ise 9.600 dakika kapasitesi ile talep için gerekli olan 14.270 dakikayı karşılayamamaktadır. Böylece üretim sürecindeki darboğazlar, **çapak alma ve gruplama makineleri** olarak belirlenmiştir.

Tam Sayılı Lineer Programlama İle Çözüm

Ele alınan problem bu aşamada bir optimizasyon problemi şeklinde ifade edilir. Optimizasyon çalışmasındaki karar değişkenleri A, B, C ve D ürünlerinin üretim miktarlarıdır. Amaç fonksiyonu çıktının maksimize edilmesini sağlar. Amaç

fonksiyonundaki her bir değişkenin katsayısı ürün başına süreç katkılarıdır. Modeldeki kısıtlar kaynak, kapasite ve müşterilerden gelen talep kısıtlarıdır.

Tüm bu verilere uygun olarak geliştirilen tam sayılı matematiksel model, GAMS paket programının CPLEX çözücüsü kullanılarak çözülmüş ve en uygun sonuç bulunmuştur. Problemin matematiksel modeli kurulmadan önce kullanılacak kısaltmalar aşağıdaki şekilde tanımlanmıştır.

Notasyon ve Parametreler

i: ürünler (i=1,2,3,4)

m: makineler (m=1,2,3,.....20)

C(i,m): i.ürünün m. makinede gördüğü işlem süresi

S(i): i.ürünün süreç katkısı

K(m): m.makinenin kapasite kısıtı

T(i): i. ürün için müşteri talebi

Karar Değişkenleri

X(i): i. üründen üretilmesi gereken miktar (i=1,2,3,4)

Amaç Fonksiyonu

$$\text{MaxZ} = y = \sum_{i=1}^4 S(i) * X(i) \dots \dots \dots (1)$$

Kısıtlar

$$\sum_{i=1}^4 \sum_{m=1}^{20} C(i, m) * X(i) \leq K(m) \dots \dots \dots (2)$$

$$X(i) \leq T(i) \dots \dots \dots (3)$$

$$X(i) \geq 0 \dots \dots \dots (4)$$

$$y \geq 0 \dots \dots \dots (5)$$

Modelde

(1) ile numaralandırılmış amaç fonksiyonunda çıktı miktarının maksimize edilmesi hedeflenmektedir.

(2) ile numaralandırılmış kısıt ürünlerin makinedeki toplam fiili işlem sürelerinin makine kapasitesini geçemeyeceğini ifade eden kapasite kısıtlarıdır.

(3) ile numaralandırılmış kısıt üretilecek ürün miktarlarının müşteri talebinin altında kalamayacağını ifade eden talep karşılama kısıtıdır.

(4) ile numaralandırılmış kısıt üretilen ürün sayısının sıfırdan büyük veya eşit olacağını,

(5) ile numaralandırılmış kısıt ise y değişkeninin sıfırdan büyük veya eşit olacağını ifade etmektedir.

Problem GAMS paket programı kullanılarak çözümlendiğinde elde edilen sonuç, A=3125 birim, B= 2250 birim, C=4500 birim, D=1722 birim ve toplam süreç çıktısı 73.072 TL olarak hesaplanmıştır.

Sonuç ve Öneriler

Kısıtlar teorisi altında ürün karması optimizasyonu, üretim süreci içerisindeki darboğaz kaynakların tespit edilmesinin ardından, ürünlerin süreç katkılarının ve üretim önceliklerinin belirlenmesini sağlayan ve böylece kısıtlı kaynak varlığında en yüksek karı elde eden bir karar verme mekanizmasıdır. Bu mekanizma sayesinde ürün yelpazesi geniş olan ve üretim sürecinde birden fazla kaynakta kısıtı olan işletmeler, üretim akışındaki verimlilik ve karın azalmasını efektif bir yolla engelleme imkânı bulurlar.

Bütün işletmeler pazar paylarının genişleyebilmesi ve karlılığın artırılması için müşterilere sunulan ürünlerin çeşitliliğini arttırmak isterler. Ancak bu durum beraberinde mevcut ürün akışında değişiklikler meydana getirecek ve üretim sürecindeki kaynakların darboğaz haline gelmesine sebep olacaktır. Bu çerçevede bir imalat firmasında yapılan uygulama ile firmanın üretim sürecindeki mevcut kapasite kısıtı altında ürün karması optimizasyonunun karlılığına etkisi ortaya konulmuştur. Firmada üç tür olay çalışması yapılmıştır. İlk olarak firmanın mevcut üretim ve muhasebe sistemi ortaya konulmuştur. İkinci aşamada ise kısıtlar teorisi kapsamında sistemdeki kısıtlar tespit edilmiş ve sonrasında ürün karması optimizasyonu için geleneksel ile geliştirilmiş algoritma sonuçları karşılaştırılmıştır. Üçüncü aşamada ise kısıtlı kaynakların daha etkin ve verimli bir şekilde kullanılmasını sağlamak ve darboğazı ortadan kaldırmak amacıyla alternatif sistem modeli önerilmiştir. Önerilen ek mesai sisteminin, kısıtlı ortamda üretilecek optimal ürün karmasından da karlı bir üretim şekli sunduğu tespit edilmiştir. Elde edilen sonuçların, tüm şartlar altında varılabilecek olan en yüksek ürün karması ve çıktı sonuçlarına yakınlığını test edebilmek amacıyla, GAMS paket programında tam sayılı doğrusal programlama olarak çözülmüş ve aynı ürün karması sonuçlarına ulaşılmıştır. Yapılan araştırmalar ve uygulama kapsamında bu ve benzeri birçok üretim işletmesinde ürün karması optimizasyonunun oldukça faydalı sonuçlar sağladığı görülmüştür.

Bu çalışmayla, uygulama yapılan firmanın kapasite ve talep kısıtları üzerinde durulmuştur. Ancak işletmelerin bunların dışında, yönetsel, pazar, işgücü vb. pek çok kısıtları vardır. Bundan sonra yapılacak çalışmalarda bu gibi kısıtlar üzerinde durularak firma kârına olan etkisi incelenebilir. Kısıtlar teorisinin ve süreç muhasebesinin kullanılabileceği diğer potansiyel alanlardan birisi olarak, ürün maliyeti hesaplamaları yapılabilir.

Kaynaklar

- Antmen, F.Z., ve Erik A., 2019. Kısıtlar Teorisi Kavramının Başa baş Analizi ile Birlikte Değerlendirilmesi ve Uygulaması
- Amin, M., Saha, K., Mohana, T., 2018. Performance Improvement of Jute Industries Using Theory Of Constraints(TOC), European Journal of Advances in Engineering and Technology, 2018, 5(5):303-311
- Golmohammadi, D., 2015. A Study Of Scheduling Under The Theory Constraints, International Journal of Production Economics, Volume 165, 38-50.

- Ünal, E.N., Tanış, V. N., ve Küçüksavaş, N., 2007. Kısıtlar Teorisi ve Süreç Muhasebesinin Yönetim ve Muhasebe Açısından Önemi, Çukurova Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi, 23-35.
- Pacheco, D.,Pergher, I., Junior, J., Vaccaro, G., 2018. Exploring The Integration Between Lean and The Theory Of Constraints In Operations Management, International Journal Of Lean Six Sigma.
- Tsai, W.H., 2018. Green Production Planning and Control for the Textile Industry by Using Mathematical Programming and Industry 4.0 Techniques, Department of Business Administration, National Central University, 300, Jhongda Rd., Jhongli, Taoyuan 32001, Taiwan.
- Mabin, V.J.,& Balderstone, S.J., 2000. The World Of The Theory Of Constraints: A Review Of The International Literature. Boca Raton, FL:ST.Lucie Press/APICS Series on Constraints Management.
- Sheshaayee, A. and Vijaykumar, H., 2015. Identifying Bottlenecks in Agile Software Development Using Theory Of Constraints Principles, Indian Journal Of Science and Technology, Vol 8(29).