

ECZACIBAŞI HİJYEN ÜRÜNLERİ ÜRETİM VE ENVANTER PLANLAMA SİSTEMİ TASARIMI

Umutcan AYASANDIR, Emrullah AYBEK, Fatih CANBAZ, Utku ERDOĞAN, Eray GÜREL, İsmail Serdar BAKAL *, Zeynep Pelin BAYINDIR

Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, Ankara
uayasandir@gmail.com, aybek.emrullah@gmail.com, metufatih@gmail.com, utku.erdgn@gmail.com, gureleray@gmail.com, isbakal@metu.edu.tr, bpelin@metu.edu.tr

Geliş Tarihi: 24.11.2015; Kabul Ediliş Tarihi: 20.12.2015

ÖZ

Bu çalışmada, Eczacıbaşı Hijyen Ürünleri fabrikası için müşteri servis seviyesini en çoklayan ve toplam maliyeti en azlayan bir üretim ve envanter planlama sistemi tasarlanmıştır. Tasarlanan sistemin, dinamik bir yapıda üretim planlama kararlarını vermesi, ani siparişlere karşı esneklik göstermesi ve envanter seviyelerini en uygun durumda tutması hedeflenmektedir. Çözüm yaklaşımı iki aşamalı olarak kurgulanmıştır. Birinci aşamada, ürünlerin üretim hatlarına ataması yapılmakta, üretim adet ve zamanları belirlenmektedir. Taşeron üretim kararları da birinci aşamada belirlenmektedir. İkinci aşamada, her hat için, birinci aşamadan gelen ürünler, gerçek kurulum süreleri kullanılarak haftalık çizelgelenmektedir. Ayrıca, tedarik süresi, talep değişkenliği gibi belirsizlikleri göz önünde bulunduran bir emniyet stoğu belirleme metodu ve satış aşamasında öncelikli müşterileri gözeten bir envanter tahsis yöntemi önerilmiştir. Çözüm yaklaşımı, sayısal çalışmalar ile sınanmış ve mevcut uygulama ile karşılaştırılmıştır. Firma için önerilen performans ölçülerinde belirgin iyileşmeler gözlemlenmiştir.

Anahtar Sözcükler: Üretim planlama, çizelgeleme, emniyet stoğu, müşteri servis seviyesi

ECZACIBASI HYGIENE PRODUCTS PRODUCTION AND INVENTORY PLANNING SYSTEM DESIGN

ABSTRACT

In this study, we design a production and inventory planning system which maximizes customer service level and minimizes total production related costs for Eczacibasi Hygiene Products factory. The system will make production planning decisions in a dynamic environment and be flexible enough to handle unexpected orders while keeping inventories at reasonable levels. We propose a two-stage solution approach for this problem. In the first stage, products are assigned to production lines and weekly production quantities are determined. Outsourcing decisions are also made in this stage. Then, for every production line, weekly schedule is obtained by using sequence dependent setup times. Furthermore, considering uncertainties such as demand fluctuations and lead times, a new safety stock calculation method is implemented. In addition, a threshold level for quantity of sales is determined for each customer, in order to safely allocate some of inventory to prioritized customers. Findings are tested and compared to the current performance of the factory by numerical studies and significant improvements are observed in performance measures.

Keywords: Production planning, scheduling, safety stock, customer service level

* İletişim yazarı

35. Yöneylem Araştırması ve Endüstri Mühendisliği Ulusal Kongresi Öğrenci Proje Yarışması'nda üçüncülük ödülü kazanan çalışmanın ilgili öğretim üyelerinin katkılarıyla düzenlenmiş halini EM Dergisi yayın politikası doğrultusunda yayımlıyoruz.

1. GİRİŞ

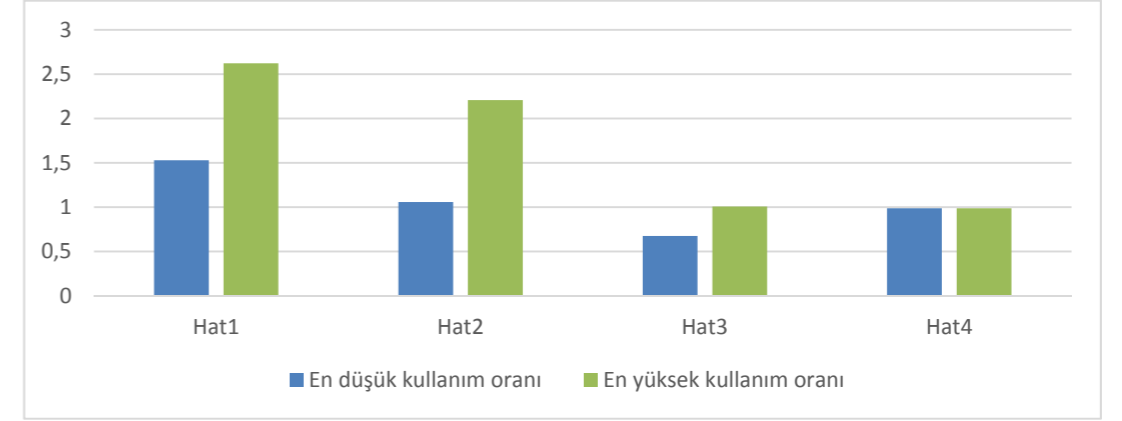
Eczacıbaşı Holding, temel olarak yapı, sağlık, tüketim ürünleri alanında, ulusal ve uluslararası pazarlara yönelik olarak çalışan bir sanayi kuruluşları topluluğudur. 1994 yılında Ataman Ecza tarafından kurulan İstanbul Kıracı'taki hijyen ürünleri fabrikası, 2012 yılında Eczacıbaşı Holding tarafından alınarak Eczacıbaşı Hijyen Ürünleri adını almıştır. Bebek bakımı, çocuk bakımı, günlük bakım, kişisel bakım, ev bakımı ve hasta bakımı alanlarında ürünler üreten Eczacıbaşı Hijyen Ürünleri Türkiye'de ve dünyanın pek çok ülkesinde sektörünün önde gelen kuruluşları arasında yer almaktadır. Her ay beş ayrı ürün ailesinden ortalama 200 aktif stok tutma biriminin planlaması, üretimi ve satışı yapılmaktadır. Üretim, firmaya ait tesisteki 14 üretim hattında ve fason firmalar tarafından stoğa yönelik yapılmaktadır. Eczacıbaşı, Hijyen Ürünleri müşterilerini zincir, toptancı, medikal ve ihracat olmak üzere müşteri özelliklerine göre dört kanalda sınıflandırılmıştır.

Müşteri memnuniyetini yüksek tutmayı hedefleyen şirket, bu kapsamda müşterilerden gelen talepleri zamanında karşılamaya büyük önem vermektedir. Mevcut durumda şirket, hedefi olan ay bazında ortalama %94 Tip-1 Servis seviyesi karşılanamamaktadır. Bunun yanı sıra, şirketin aylık üretim miktarlarını belirlemede kullandığı emniyet stoğu belirleme yönteminin de iyileştirilmesi gerekmektedir. Firma, aylık belirlenen üretim miktarlarını hafta ve gün bazında planlara dönüştüren daha iyi bir çizelgeleme sistemine ihtiyaç duymaktadır. Ayrıca firma için belli müşterilerin siparişleri önceliklidir ve bu müşterilerin servis seviyelerinin yüksek olması istenmektedir. Ancak, mevcut durumda hedef servis seviyesi tanımlanırken ve gerçekleşen servis seviyeleri değerlendirilirken stratejik müşteri önceliklendirmesi dikkate alınmamaktadır. Bu kapsamda şirket, müşteri taleplerini tam ve zamanında karşılayıp servis seviyesini yükseltecek bir sisteme ihtiyaç duymaktadır. Bunlara ek olarak, kapasitenin kısıtlı olması ve sistemin yoğun rekabet barındıran dinamik yapısı projenin önemini artırmaktadır.

2. MEVCUT DURUM ANALİZİ

Şirket, mevcut üretim kapasitesi ile servis seviyelerini yükseltmeyi amaçlamaktadır. Her ürün yalnızca kendisi için özelleşmiş üretim hatlarında üretilmektedir. Yapılan incelemelerde, bazı üretim hatlarında darboğaz olduğu gözlemlenmiştir. Ürünlerin bazıları için üretim hattı alternatifleri bulunmamakta, bu ürünler sadece tek bir hatta üretilmektedir. Her hat için ürünlerin başlangıç envanterleri de dikkate alınarak, o hatta mutlaka üretilmesi gereken ürünlerin toplam üretim zamanı toplam zamana oranlanarak, hattın olası en düşük kullanım oranı bulunmuştur. Hattın en yüksek kullanım oranı ise o hatta üretililecek tüm ürünlerin toplam üretim zamanının hat kapasitesine oranı olarak ifade edilmiştir. Gözlemlerimiz, ay bazında bir hatta üretilmesi gereken ürünlerin toplam üretim zamanının hat kapasitesini aşabildiğini, dolayısıyla hesaplanan kullanım oranlarının birden büyük olabildiğini göstermiştir. Ürünler arası kurulum zamanı ortalama bir değer alınarak yapılan hesaba göre, örnek olarak seçilen 2014 yılı Haziran ayı verileri Şekil 1'deki grafiği ortaya koymaktadır. Şekilden de görülebileceği gibi, özellikle birinci hatta kapasite, sadece ve mutlaka bu hatta üretilmesi gereken ürünler için bile yetersizdir. Kurulum zamanı ortalama alındığından kullanım oranı bire çok yakın olan hatların durumu da kritik olarak değerlendirilmiştir. Stok tutma birimi bazında üretimin en az %52'sinin bu hatlar üzerinde yapıldığı görülmüştür. Dolayısıyla kapasite, düşük servis seviyelerinin önemli sebeplerinden biri olarak görülmekte; etkin çizelgeleme gereksinimini ortaya koymaktadır.

Mevcut sistemde ürünlerin ABC analizi yapılarak emniyet stok gün sayısı belirlenmekte ve buna dayanarak emniyet stoğu hesaplanmaktadır. Bu yöntemle talep değişkenliği, tedarik süresi gibi parametreler göz ardı edilmekte, sadece maliyete dayalı bir emniyet stoğu hesaplanmaktadır. Ürünlerin aylık üretim adetleri planlanırken bu emniyet stoğu kullanılmaktadır. Bir ayda üretilmesi gereken miktar, tahmin edilen aylık talep miktarının emniyet stoğuyla toplamının envanter miktarından farkı olarak belirlenmektedir. Hesaplanan aylık üretim miktarları, ürünlerin mevcut stokları ve talep tahminleri göz önünde bulundurularak haftalara

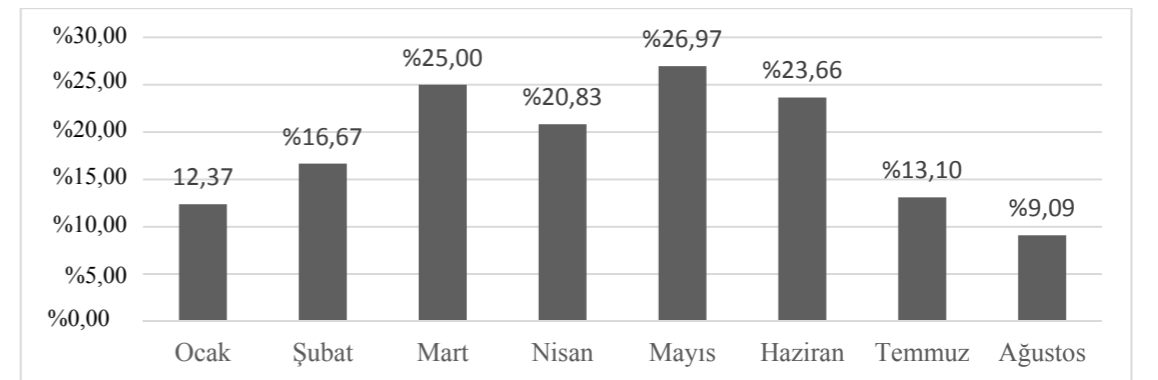


Şekil 1. Üretim Hatlarının 2014 Haziran Ayı En Düşük ve En Yüksek Kullanım Oranları

bölünmektedir. Mevcut stoğun tahmine oranı düşük olan ürünlere öncelik verilmekte, bunların üretimleri ilk haftalara atanmaktadır. Ancak hat kapasiteleri şirket için büyük bir kısıt olduğundan bu plana çoğunlukla uyulamamaktadır. Elde edilen haftalık üretim adetleri, operatörlerin görüşlerine başvurularak hafta içinde sıralanmaktadır. Bunu yapan operatör, üretim için gerekli solüsyon hazırlama sürelerini, hat temizleme sürelerini ve malzeme değişim sürelerini göz önünde bulundurmaya çalışmaktadır. Ancak bu çizelgeleme yaklaşımı, ürünlerin servis seviyelerini hedeflenen düzeye getirememektedir. Yapılan incelemelerde, bazı ürünlerin üretim miktarlarının gerçekleşen taleplerinden fazla olmasına rağmen düşük servis seviyelerinde buldukları gözlemlenmiştir. Hedef servis seviyesi %94 olarak alınmış ve

sekiz aylık veri üzerinde bahsedilen sorun incelenmiştir. Şekil 2'de, ay bazında üretimin talepten fazla olduğu durumlarda düşük servis seviyelerine sahip ürünlerin yüzdeleri verilmiştir.

Firma, farklı müşteri kanallarının taleplerine farklı önem vermektedir. Bir müşteri kanalının karşılanamayan talepleri firmanın saygınlığını etkilemekte ve uzun vadede kayıp satışlara sebep olmaktadır, diğer müşteri kanalının talebi daha esnek zamanlarda karşılanabilmektedir. Talep tahminine dayalı stoğa yönelik üretim yapılmasına rağmen öncelikli müşteriler teslimi belirli bir zamanda yapılmak üzere yüksek miktarlı özel siparişler verebilmektedir. Bu müşterilere verilen önem gereği bu özel siparişler de karşılanmaktadır. Bu siparişler sistemde darboğaza sebep olmakta ve ay başında



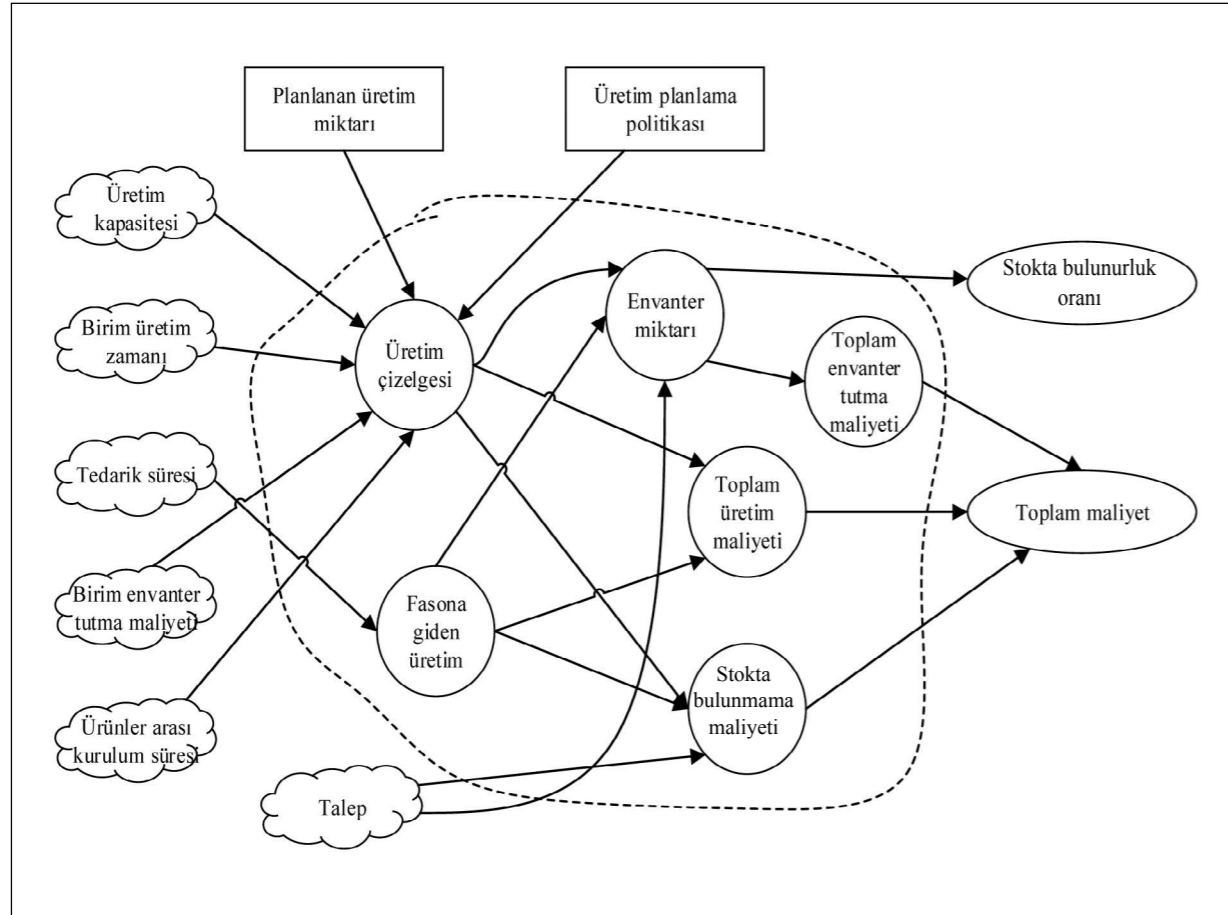
Şekil 2. 2014 Yılı Ocak-Ağustos Aylarında Üretimi Geç Yapılan Ürünlerin Tüm Ürünler İçindeki Yüzdeleri

yapılan üretim planından sapmalara yol açmaktadır. İncelemeler sonucu, üretim planından sapılmayan ürünlerin ve özel sipariş ürünlerinin ikisinin de istenen Tip-1 servis seviyesine ulaşamadığı görülmüştür. Sadece plan harici gelen ürünler incelendiğinde, bu ürünlerin 2014 yılının sekiz ayı (Ocak-Ağustos) boyunca yaklaşık %33'ünün servis seviyelerinin hedeflenenden düşük olduğu gözlemlenmiştir. Bu da, şirketin şu anki politikasının gözden geçirilmesi gerektiğini göstermektedir.

3. PROBLEM TANIMI

Yapılan incelemeler sonucu; talep değişkenliğini, teslimat süresini, üretim kapasitesini, envanter miktarını ve kurulum zamanını göz önünde bulundurarak, öncelikli müşteri bazlı stokta bulunurluğu ençoklayan ve

toplam maliyeti enazlayan bir üretim planlama sistemi hedeflenmiştir. Problem tanımı doğrultusunda sistem, Şekil 3'te verilen etki diyagramı ile modellenmiştir. Üretim kapasitesi, birim üretim zamanı, tedarik süresi, birim envanter tutma maliyeti, ürünler arası kurulum zamanı ve talep girdi olarak kabul edilmektedir. Planlanan üretim miktarı ve üretim planlama politikası ise sistemdeki bileşenleri kontrol etmek için kullanılan karar değişkenleridir. Sistem bileşenleri ise üretim çizelgesi, envanter miktarı, fason üretilen ürün miktarı, envanter taşıma maliyeti, toplam üretim maliyeti ve stokta bulunmama maliyetidir. Sistemde ortaya çıkan performans ölçüleri ise stokta bulunurluk olarak adlandırılan Tip-1 servis seviyesi ve toplam maliyettir. Çözüm yaklaşımı ise verilen etki diyagramı göz önünde bulundurularak tasarlanmıştır.



Şekil 3. Etki Diyagramı

4. ÇÖZÜM YAKLAŞIMI

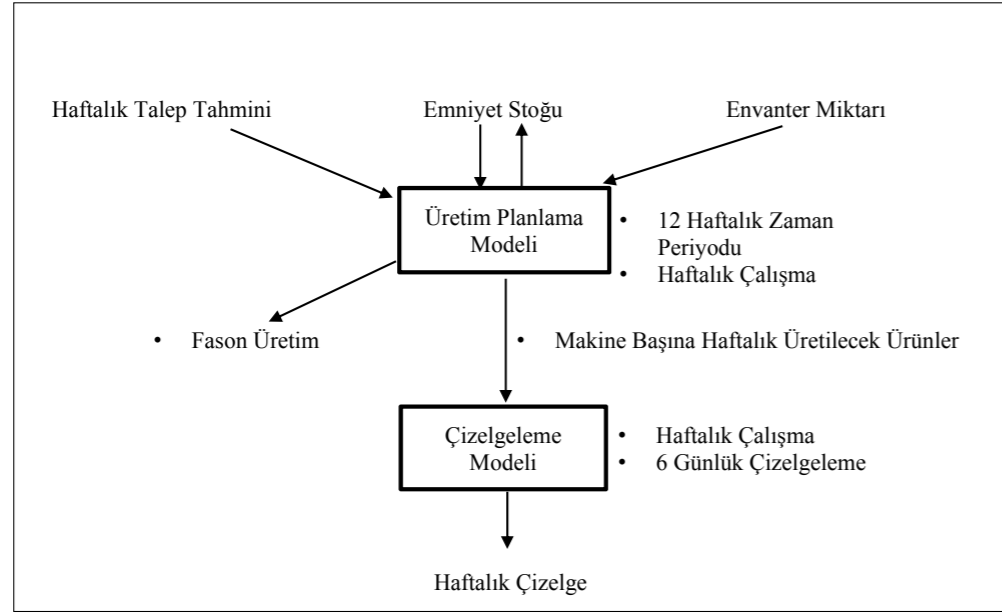
Yukarıda verilen üretim planlama sorunlarını çözebilmek ve öncelikli müşteri-ürün ikililerinin Tip-1 servis seviyelerini arttırabilmek amacıyla bir çözüm yaklaşımına ihtiyaç duyulmaktadır. Sıraya bağlı kurulum süresi kompleksiteyi fazlaca arttırdığından yaklaşık 200 ürünün parti büyüklüğünü belirleyip bu partileri sıralayan bir matematiksel modelin çözüm yaklaşımı olarak sunulması, çözümün uygulanabilirliği düşünüldüğünde, seçenekler arasında görülmemiştir.

Sıraya bağlı kurulum süresi çözüm yaklaşımımızda önemli bir role sahiptir. Literatürde sıraya bağlı kurulum süresi içeren ve bu çalışmanın kapsamını andıran bir çok çalışma bulunmaktadır. Kang vd. (1999), birden fazla üretim hattı ve birden fazla ürünün, ürünler arasında da sıraya bağlı üretim süresinin bulunduğu ortamda parti büyüklüğü ve çizelge elde eden bir matematiksel model önermişlerdir. Çalıştıkları ortam, bu projede sözkonusu edilen ortamla benzer olsa da getirdikleri "orijinal yaklaşım"ın (Gicquel vd., 2008) bu proje için uygulanabilirliği şüphelidir. Ürün sayısının fazlalığı, planlama ufkunun uzunluğu gibi faktörlerle modelin çalışma zamanının fazlaca artacağı tahmin edilmektedir. Lohndorf vd. (2014), sıraya bağlı kurulum süresinin bulunduğu ortamda ürün gruplarının çizelgesini benzetim eniyileştirmesi kullanarak elde etmeye çalışmıştır. Çalışma, parametrelerin rassal olduğu bir ortamı içermekte ve tek makine çizelgelemesini konu etmektedir. Almada-Lobo vd. (2007), tek makine için kapasiteli parti büyüklüğü belirleme (CLSP) problemi üzerine çalışmış, matematiksel modele alternatif olarak sezgisel bir yaklaşım getirmiştir. Drexler ve Kimms (1996), parti büyüklüğü ve çizelgelemenin çok aşamalı olarak konu eden çalışmaların az olduğunu belirtmiş ve birden fazla üretim hattı bulunduğu ortamda bunu başarmanın zorluğunu vurgulamıştır. Ancak çok aşamalı parti büyüklüğü belirleme ve çizelgeleme konusunda gelişmeler yaşanmıştır. Örneğin Meyr ve Seanner (2012), sıraya bağlı kurulum

sürelerinin bulunduğu ortamda, birden fazla makine için genel parti büyüklüğü ve çizelgeleme problemini çalışmıştır.

Tek aşamada ürünlerin hatlara atanması, haftalık üretim kararının belirlenmesi ve üretim sırasının belirlenmesi çok zaman almakta ve sonuca ulaşamamaktadır. Literatürde makul sürelerde bu problemi tek aşamada çözecek bir çalışmayla da karşılaşılmamıştır. Bunun için hiyerarşik bir çözüm yöntemi önerilmiştir. Çözüm yaklaşımının aşamaları ve aşamaların birbirleriyle ilişkileri Şekil 4'te özetlenmiştir. Birinci aşamanın ayrıntıları Bölüm 4.1'de, ikinci aşamanın ayrıntıları ise Bölüm 4.2'de verilmektedir. Bölüm 4.3'te önerilen emniyet stoğu belirleme yöntemi, Bölüm 4.4'te satış aşamasında müşteri önceliklendirmesi incelenecektir.

Birinci aşamada, 12 haftalık planlama ufku içerisinde, haftalık olarak hat bazında üretilecek ürünlere, taşeron firmalara gönderilecek ürünlere ve bu ürünlerin miktarlarına karar verilmektedir. Bu aşamada, ürünler arası sıraya bağlı kurulum süresinin ortalama değeri düşünülmektedir. Bu aşamada girdi olarak kullanılacak emniyet stoğu miktarı ise tahmin verilerindeki değişiklik ve ürünlerin tedarik süreleri dikkate alınarak hesaplanmıştır. Ürünlerin üretim tedarik süreleri ise Bölüm 4.3'te açıklanacağı üzere, birinci aşamanın çıktılarına göre belirlenmektedir. Çözüm yaklaşımında önemli bir yer tutan emniyet stoğu hesaplama önerisi, Bölüm 4.3'te incelenmiştir. İkinci aşamada ise haftalık üretim miktarları günlere bölünmekte ve günlük çizelgeleme yapılmaktadır. Bu aşamada, sıraya bağlı kurulum süreleri olduğu gibi alınarak modellenmiştir. Birinci aşama, 12 haftalık zaman ufkunda, kayan ufuk prensibiyle her hafta çalışacak şekilde tasarlanmıştır. Ürünlerin hatlara atanması yapıldıktan sonra ikinci model her hat için haftalık çalıştırılmaktadır. Teslim tarihi belli özel siparişler geldiğinde ise haftalık çizelgeleme modeli tekrar çalıştırılarak yeni plan elde edilmektedir.



Şekil 4. Çözüm Yaklaşımının Şematik Gösterimi

4.1 Birinci Aşama – Taşeron Siparişleri ve Ürünlerin Hatlara Atanması

Mevcut sistemde üretim miktarlarına aylık olarak karar verilmesine karşın, taleplere esnekliği arttırmak için haftalık üretim miktarlarına karar verilmesini önermekteyiz. Mevcut sistemde göz ardı edilen stratejik müşteri önceliklendirmesini çözüm yaklaşımımızda kullanabilmek için siparişe göre önem sıraları atanmış ve siparişlerin temin edilememesine göre ceza puanı belirlenmiştir. Sipariş bazında belirlenen bu ceza puanı, art ısmarlama maliyetine dönüştürülerek model içinde kullanılmıştır. Envanter tutma, üretim, art ısmarlama, emniyet stoğundan sapma ve taşeron sipariş maliyetlerini; haftalık hat kapasite, hat teknoloji ve envanter denge kısıtları altında en azlayan birinci model, haftalık üretim miktarlarına karar vermektedir. Haftalık olarak çalıştırılması öngörülen birinci aşamadaki modelin gelen anlaşmalı ve büyük taleplere karşı dinamik gereksinimlere cevap vermesini sağlamak için bu tür bir talep geldiğinde hafta içerisinde yeniden çalıştırılması önerilmiştir. Birinci aşamada, üretim miktarlarına ve üretilen hatlara karar verilip üretim sırası hakkında bir çıktı verilmemektedir. Bu aşamanın karışık tamsayı programlama modeli, bu

bölümde incelemeye sunulmuştur. Modelde kullanılan notasyon Tablo 1’de verilmiştir.

Envanter denge denklemi Kısıt (1)’de verilmiştir. Kısıt (2), her t periyodunda taşeronda üretilen miktarın sipariştten tedarik süresi kadar sonra envantere girmesini sağlamaktadır. Kısıt (3), değişkenlerin negatif olmama kısıtıyla birlikte, art ısmarlama olduğunda pozitif envantere 0 olmasını, envanter pozitif olduğunda toplam art ısmarlamanın 0 olmasını sağlar. Modelde emniyet stoğundan sapmalar da cezalandırıldığı için Kısıt (4) gereklidir. Kısıt (5) ile her müşteri için yapılabilecek en yüksek art ısmarlamanın o müşterinin talebi kadar olduğu gösterilmiştir. Kısıt (6) zaman cinsinden kapasite kısıtı olup, kurulum ve üretim zamanlarını içerir. Kısıt (7) ve Kısıt (8) ile üretim ve taşeron üretimi modele tanıtılmakta, ilgili sabit maliyetlerin amaç fonksiyonuna dahil edilmesi sağlanmaktadır. Kısıt (9) ve Kısıt (10) teknoloji kısıtları olup, ürünlerin yalnızca kendileri için özelleşmiş hatlarda üretilebileceklerini gösterir. Kısıt (11) karar değişkenlerinin niteliğini tanımlar. Model, toplam fabrika ve taşeron üretim, ceza, envanter taşıma ve emniyet stoğunun altında kalma maliyetlerini en azlamayı amaçlamaktadır.

Tablo 1. Birinci Aşama Modelde Kullanılan Notasyon

Endeksler	
i : ürün endeksi	t : hafta endeksi
j : üretim hat endeksi $\{0 \dots 14\}$ ($j=0$ fason üretim)	k : müşteri endeksi

Parametreler	Karar Değişkenleri
$t_{i,j}$: i ürününün j üretim hattındaki birim üretim zamanı	$X_{i,j,t}$: i ürününün j üretim hattında t haftasındaki üretim miktarı
s_i : i ürününün ortalama kurulum süresi	$Y_{i,t}$: i ürününün taşeron firmaya t haftasında sipariş edilen miktarı
p_i : i ürününün üretim maliyeti	$Z_{i,t}$: i ürününün taşeron firmadan t haftasında teslim alınan miktarı
f_i : taşeron üretimin sabit maliyeti	$O_{i,t}$: i ürünü taşeron firmaya t haftasında sipariş edilip edilmediğini gösteren karar değişkeni. Eğer sipariş edildiye 1, edilmediye 0 değerini alır
v_i : i ürününün taşeron üretiminin birim maliyeti	$A_{i,j,t}$: i ürününün t haftasında j hattında üretilip üretilmediğini gösteren karar değişkeni. Eğer üretildiye 1, üretilmediye 0 değerini alır
$c_{j,t}$: j üretim hattının t haftasındaki kapasitesi (süre bazında)	$I_{i,t}$: i ürününün t haftasındaki envanter miktarı
$g_{i,k}$: k müşterisinin i ürününün talebini karşılayamamanın birim ceza maliyeti	$I_{i,t}^+$: i ürününün t haftasındaki pozitif envanteri
h_i : i ürününün birim envanter tutma maliyeti	$B_{i,k,t}$: k müşterisinin i ürünü için t haftasında yapılan art ısmarlama miktarı
$d_{i,k,t}$: k müşterisinin t haftasında i ürün talebi	$D_{i,t}^+$: Emniyet stoğundan pozitif sapma
l_i : i ürününün tedarik süresi	$D_{i,t}^-$: Emniyet stoğundan negatif sapma
$w_{i,j}$: Üretim hattı teknoloji parametresi. Eğer i ürünü j üretim hattında üretilbiliyorsa 1, diğer durumda 0	
ss_i : i ürününün emniyet stoğu	
pss_i : i ürünü için emniyet stoğunun altında kalmanın ceza maliyeti	
M : çok büyük sayı	

Matematiksel model aşağıdaki gibi ifade edilebilir:

En azla:

$$z = \sum_i \sum_j \sum_t (X_{i,j,t} p_i) + \sum_i \sum_t (O_{i,t} f_i) + \sum_i \sum_t (Y_{i,t} v_i) + \sum_t \sum_i \sum_k (B_{i,k,t} (g_{i,k} - pss_i)) + \sum_i \sum_t (I_{i,t}^+ h_i) + \sum_i \sum_t (D_{i,t}^- pss_i)$$

Aşağıdaki kısıtları gözeterek;

- $I_{i,t-1} + \sum_{j>0} X_{i,j,t} + Z_{i,t} = I_{i,t} + \sum_k d_{i,k,t} \quad \forall i \text{ ve } \forall t > 1 \quad (1)$
- $Z_{i,t} = Y_{i,t-1(i)} \quad \forall i, t \quad (2)$
- $I_{i,t} = I_{i,t}^+ - \sum_k B_{i,t,k} \quad \forall i, t \quad (3)$
- $D_{i,t}^+ - D_{i,t}^- = I_{i,t} - SS_i \quad \forall i, t \quad (4)$
- $B_{i,t,k} - B_{i,t-1,k} \leq d_{i,k,t} \quad \forall i, k, t \quad (5)$
- $\sum_i (X_{i,j,t} t_{i,j}) + \sum_i (A_{i,j,t} S_i) \leq c_{j,t} \quad \forall j, t \quad (6)$
- $Y_{i,t} \leq M \times O_{i,t} \quad \forall i, t \quad (7)$
- $X_{i,j,t} \leq M \times A_{i,j,t} \quad \forall i, j, t \quad (8)$
- $O_{i,t} \leq w_{i,0} \quad \forall i, j, t \quad (9)$
- $A_{i,j,t} \leq w_{i,j} \quad \forall i, j, t \quad (10)$
- $A_{i,j,t}, O_{i,t} \in \{0,1\}; B_{i,t,k}, Y_{i,t}, Z_{i,t}, D_{i,t}^+, D_{i,t}^-, I_{i,t}^+, I_{i,t}^- \geq 0 \quad (11)$

4.1.1 Parametre Tahmini

Modelin öngörüldüğü şekilde çalıştırılıp kullanılabilmesi için çeşitli parametrelerin tahmin edilmesi gerekmektedir. Ürünlerin birim üretim süreleri, üretim hatlarının teknolojik kapasiteleri, kurulum süreleri, taşeron firmaların tedarik süreleri, müşteri öncelikleri şirket tarafından temin edilmiştir. Bowersox (1986), yıllık envanter maliyetinin %20'sinin envanter tutma maliyeti olarak kullanılmasını önermiştir. Ceza maliyetleri, proje ekibi tarafından müşteri önceliklerine göre belirlenmiştir. Yapılan incelemelerde, ceza maliyetinin envanter tutma maliyetinin 50 katı olmasının yaklaşık %99 servis seviyesi sağladığı görülmüştür. Müşteri önceliklerine göre, ürünlerin ceza maliyetleri 30 ve 50 arasındaki katsayılarla çarpılmış ve ürün-müşteri ikilisi bazında ceza maliyetleri elde edilmiştir.

4.1.2 Birinci Aşama Modelin Doğrulması

Model farklı parametrelerle birden fazla kez çözülmüş ve herhangi bir işlevsizlik ile karşılaşmamıştır. Modelin doğrulması, küçük problem örnekleri üzerinde yapılmış ve kısıtların işlevlerine uygun olarak çalıştıkları tespit edilmiştir. Başlangıç envanteri çok yüksek

sayıya eşitlendiğinde üretim yapılmamış, bir periyodun kapasitesi sifıra eşitlendiğinde o periyoda ürün atanmamış, kapasite çok büyük bir sayıya eşitlendiğinde art ısmarlama olmamıştır. Bir ürünün taşeron maliyeti sıfır yapılmış ve taşerona gönderilmesine izin veren kısıt aktif hale getirilmiş ve ürün modeli taşerona gönderilmiştir. Bu kısıtın aktifliği kaldırıldığında ceza maliyeti yüksek bu ürün fabrikada üretilmek zorunda kalmıştır. Ancak aynı ürünün ceza maliyeti sifıra eşitlendiğinde bu ürün üretilmemiştir. Ceza maliyeti çok yüksek bir sayıya eşitlenen ürünün taşeron maliyeti sıfır olup, tedarik süresi üç hafta olduğunda, model ceza maliyetinden kurtulabilmek için ürünü ilk üç hafta üretmiş, üçüncü hafta taşerondan gelen siparişler envantere girdikten sonra üretim durdurulmuştur.

4.2 İkinci Aşama – Haftalık Çizelgeleme

Birinci aşama ile entegre çalışan ikinci aşamada ise ilk aşamadan alınan çıktılar ikinci model için girdi olarak kullanılmaktadır. Günlük envanter, ceza maliyetleri ve ürünler arası kurulum zamanı hesaba katılmaktadır. Bu aşama her hat için ayrı ayrı çalıştırılıp haftalık üretim sırası elde edilmektedir. Esneklik sağlama amacıyla bu

Tablo 2. Haftalık Çizelgeleme Modelinde kullanılan notasyon

Endeksler	
$N = \{0,1, \dots, N\}$ $N_1 = \{1, 2, \dots, N\}$ $S = \{1, \dots, w\}$ $T = \{1, 2, \dots, 6\}$	
$i, j \in N$ ürünler	
$t \in T$ günler $k \in \{1, \dots, w\}$ w : bir günde üretilebilecek maksimum farklı ürün sayısı	
Parametreler	Karar Değişkenleri
p_i : i ürününün birim üretim süresi	$X_{i,t,k}$: i ürününün t gününde k sırasında üretiminin olup olmadığını gösteren değişken. Eğer üretim varsa 1, yoksa 0 değerini alır
g_i : i ürününün ortalama birim ceza maliyeti	$A_{i,j,t,k}$: t gününde k sırasında i ürünü, $k+1$ sırasında j ürünü üretilip üretilmediğini gösteren değişken. Önerme doğru ise 1, değilse 0 değerini alır
c_t : t gününün süre bazında kapasitesi	$I_{i,t}$: i ürününün t günündeki envanter seviyesi
$S_{i,j}$: i ve j ürünleri arasındaki kurulum zamanı	$I_{i,t}^+$: i ürününün t günündeki pozitif envanter seviyesi
$d_{i,t}$: i ürününün t haftasında üretilmesi gereken miktarı	$I_{i,t}^-$: i ürününün t günündeki negatif ve envanter seviyesi
	$Y_{i,k,t}$: i ürününün t gününün k sırasında üretilen miktarı
	M: Günler arasında meydana gelen ortalama kurulum süresi

Model şu şekilde ifade edilebilir:

$$\text{En azla: } z = \sum_{t \in D} \sum_{i \in N} I_{i,t}^- g_i$$

Aşağıdaki kısıtları gözeterek;

- $\sum_i X_{i,t,k} = 1 \quad (1) \quad \forall k \in S, \forall t \in T$
- $I_{i,t} = I_{i,t-1} + \sum_k Y_{i,k,t} - d_{i,t} \quad (2) \quad \forall i \in N_1, \forall t \in T$
- $I_{i,t} = I_{i,t}^+ - I_{i,t}^- \quad (3) \quad \forall i \in N_1, \forall t \in T$
- $\sum_{j \in N_1} A_{0,j,t,k} = 0 \quad (4) \quad \forall t \in T \text{ ve } \forall k \in S$
- $\sum_j A_{i,j,t,k} \leq X_{i,t,k} \quad (5) \quad \forall i \in N, t \in T, k \in S$
- $\sum_i A_{i,j,t,k} \leq X_{j,t,k+1} \quad (6) \quad \forall j \in N, t \in T, k \in S$
- $A_{i,j,t,k} \geq X_{i,t,k} + X_{j,t,k+1} - 1 \quad (7) \quad \forall i, j \in N, \forall t \in T, k \in S$
- $\sum_i \sum_k Y_{i,t,k} p_i + \sum_i \sum_j \sum_k A_{i,j,t,k} S_{i,j} \leq c_t \quad (8) \quad \forall t \in T$

- $\sum_i \sum_k \sum_t^{t+1} Y_{i,t,k} p_i + \sum_i \sum_j \sum_k \sum_t^{t+1} A_{i,j,t,k} S_{i,j} \leq \sum_t^{t+1} c_t - M \quad (9) \quad \forall t \leq 5$
- $\sum_i \sum_k \sum_t^{t+2} Y_{i,t,k} p_i + \sum_i \sum_j \sum_k \sum_t^{t+2} A_{i,j,t,k} S_{i,j} \leq \sum_t^{t+2} c_t - 2M \quad (10) \quad \forall t \leq 4$
- $\sum_i \sum_k \sum_t^{t+3} Y_{i,t,k} p_i + \sum_i \sum_j \sum_k \sum_t^{t+3} A_{i,j,t,k} S_{i,j} \leq \sum_t^{t+3} c_t - 3M \quad (11) \quad \forall t \leq 3$
- $\sum_i \sum_k \sum_t^{t+4} Y_{i,t,k} p_i + \sum_i \sum_j \sum_k \sum_t^{t+4} A_{i,j,t,k} S_{i,j} \leq \sum_t^{t+4} c_t - 4M \quad (12) \quad \forall t \leq 2$
- $\sum_i \sum_k \sum_t^{t+5} Y_{i,t,k} p_i + \sum_i \sum_j \sum_k \sum_t^{t+5} A_{i,j,t,k} S_{i,j} \leq \sum_t^{t+5} c_t - 5M \quad (13) \quad \forall t \leq 1$
- $X_{i,j,t}, A_{i,j,t,k} \in \{0,1\}; Y_{i,t,k}, I_{i,t}^+, I_{i,t}^- \geq 0 \quad (14)$

modelin, varsa tahmin güncellemelerinden sonra her gün tekrar çalıştırılması önerilmiştir. Siparişe ve müşteriye bağlı olarak değiştirilen ceza maliyetleri sayesinde önemli bir siparişi önceliklendiren bir çözüm yaklaşımı tasarlanmıştır. Modelde kullanılan notasyon Tablo 2’de verilmiştir.

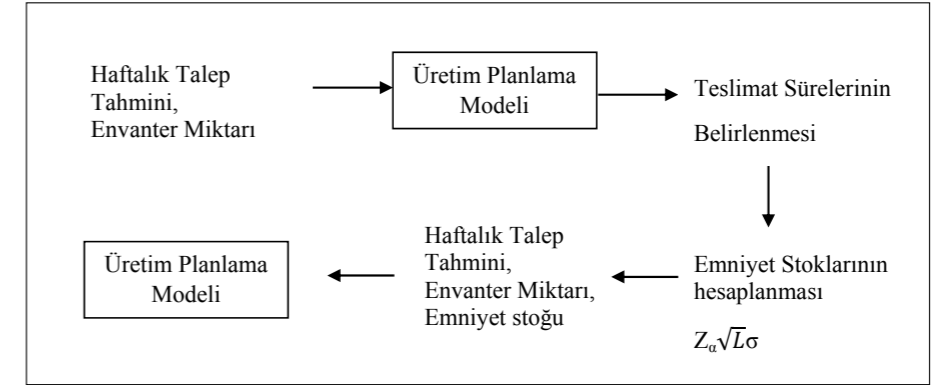
Kısıt (1), tasarlanan çizelgeleme sisteminde herhangi bir sıraya en fazla bir ürünün atanabileceğini gösteren kısıttır. Kısıt (2), envanter denge kısıtıdır. Kısıt (3), envanterin pozitif ve negatif miktarını iki farklı değişkenle belirtmeyi sağlayan kısıttır. Kısıt (4), kukla ürün olan sıfırncı üründen sonra gerçek bir ürünün çizelgenemeyeceğini gösteren kısıt olup, modelin kurulum süresini en aza indirmek için gerçek ürünler arasına kukla ürün yerleştirmesini engeller. Kısıt (5), (6) ve (7) üretim sıraları arasındaki geçişi gösteren A değişkenleriyle, üretimin yapıldığını gösteren X değişkenleri arasındaki ilişkiyi oluşturur. Kısıt (8) ile Kısıt (13) arasındaki kısıtlar kapasite kısıtlarıdır. Günler arasında (bir günün sonunda üretilen ürün ile sonraki günün başında üretilen ürün arasında) meydana gelen kurulum süresi, ortalama bir değer olarak alınmıştır. Model her ne kadar bunu karar değişkeni olarak içerebilse de, bu durumda çalışma süresi bir hayli artmakta ve uygulanabilirlik azalmaktadır. Bu sebeple, günler arası kurulum süresi ortalama bir değer olarak alınmış ve modelin çalışma süresi makul sürelerle indirilmiştir. Çözüm, küçük veriler için saniyeler, daha büyük veriler için dakikalar içinde elde edilmektedir. Kısıt (8) ile Kısıt (13) arasındaki kısıtlar günler arası kurulumun birinci gün başlayıp ikinci gün devam edebilmesini sağlamaktadır.

4.2.1 Haftalık Çizelgeleme Modelinin Doğrulanması

Modelin verdiği sonuçta birbiri ardına üretilen ürünlerin arasındaki kurulum zamanı çok büyük bir sayıya eşitlenmiş ve model tekrar çalıştırıldığında bu ürünlerin art arda üretilmediği görülmüştür. Ceza maliyeti çok yüksek yapılan ürün, beklendiği gibi haftanın ilk günü üretilmiştir. Model, günler arasındaki ortalama kurulum süresini, iki günün toplam kapasitesinden düşmekte, yani birinci günün sonunda başlayan kurulum ikinci gün devam edebilmektedir. Birinci günün kapasitesi çok büyük yapıldığında tüm ürünler birinci gün üretilirken, son günün kapasitesi çok büyük yapıldığında tüm ürünler son gün üretilmemiştir.

4.3 Emniyet Stoğunun Belirlenmesi

Emniyet stoğu hesaplamasında talep değişkenliği ve üretim tedarik süreleri dikkate alınmıştır. Tahmin hatalarının standart sapması, şirketten temin edilen veri üzerinden hesaplanmaktadır. Ürünlerin üretim teslimat süreleri ise birinci model yardımıyla belirlenmektedir. Birinci model, Şekil 5’te görüldüğü gibi, sadece tahmin verileri ve envanter miktarına dayanarak ve emniyet stoğu sıfır kabul edilerek çalıştırılmakta, her ürün için 12 hafta boyunca en büyük ardışık üretim zamanı o ürünün üretim teslimat süresi olarak kabul edilmektedir. Daha sonra emniyet stoğu bulunan teslimat sürelerine göre hesaplanmaktadır. İkinci aşamada, hat çizelgelemesi yapılmadan önce birinci aşama modelinin hesaplanan emniyet stoğu değerleriyle yeniden çalıştırılması ve bu çözümün sonuçlarının ikinci aşama modeline girdi olması önerilmektedir.



Şekil 5. Tedarik Süresi ve Emniyet Stoğu Belirleme

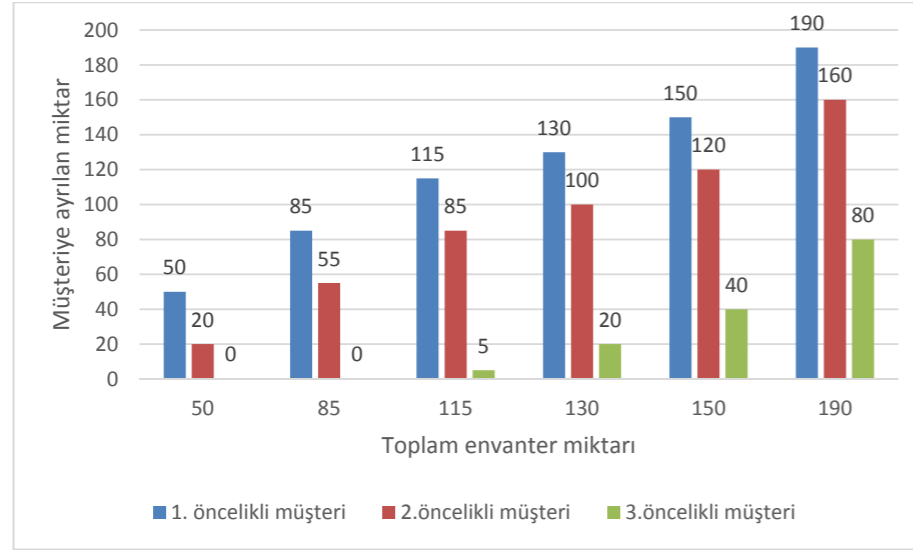
4.4. Öncelikli Müşterilere Envanter Tahsisi

Eczacıbaşı Hijyen Ürünleri, müşterileri farklı olarak önceliklendirmektedir. Üretim kararları bu önceliklendirme göz önünde bulundurularak verilmektedir. Ancak üretilen ürünlerin satışı aşamasında müşteri öncelikleri dikkate alınmamakta, ilk gelen müşteri ilk olarak hizmet görmektedir. Bu durumda siparişi önce veren düşük öncelikli müşteri, envanterdeki miktarın tamamını alabilmekte, yüksek öncelikli müşterilerin daha sonra gerçekleşen talepleri karşılanamamaktadır. Şirketin yüksek öncelikli müşteri taleplerine verdiği önem bilindiğinden, müşteriler için envanter tahsisi yapmak ve böylece yüksek öncelikli müşterilerin talebini

en iyi şekilde karşılamak amaçlanmıştır. Müşterilere tahsis edilecek envanter miktarı Tablo 3’te gösterilen şekilde hesaplanmaktadır. Örnek olarak, en yüksek öncelikli (birinci öncelikli) müşterinin talep tahmininin 30, ikinci öncelikli müşterinin talep tahmininin 80, üçüncü öncelikli müşterinin talep tahmininin 20 olduğu durum incelenmiş, farklı envanter değerleri için her bir müşterinin satış eşik değerleri hesaplanmıştır. Farklı başlangıç envanter seviyelerinde, her müşteriye -ilk talep eden olması durumunda- satılabilecek en yüksek miktarlar belirlenmiş ve bu miktarlar Şekil 6’da grafik üzerinde gösterilmiştir. Her satıştan sonra envanter miktarları güncellenmeli ve satış eşik değerleri Tablo 3’teki formülle yeniden hesaplanmalıdır.

Tablo 3. Müşterilerin Satış Eşik Değerlerinin Hesaplama Formülleri

Envanter Miktarı	Müşteri Önceliği (1 En yüksek)	Talep Tahmini	Müşteriye Satılabilecek En Çok Miktar
$X \geq A+B+C$	1	A	X
	2	B	X-A
	3	C	X-A-B
$X < A+B+C$	1	A	X
	2	B	$(0; X-A)^+$
	3	C	$(0; X-A-B)^+$



Şekil 6. Müşteri Satış Eşik Değerlerinin Farklı Envanter Değerleri İçin Örnek Hesaplaması

5. UYGULAMALAR VE ELDE EDİLEN SONUÇLAR

Oluşturulan çözüm yaklaşımı 2014 Haziran ayı talep verileri kullanılarak sayısal çalışmalarla sınanmıştır. Günlük talep verisi mevcut olmadığından sistemin servis seviyeleri çözüm sonucu elde edilen servis seviyeleri ile karşılaştırılamamaktadır. Bu sebeple, aylık talep verilerine göre günlük talep verisi oluşturulmuş, ürünlerin başlangıç envanteri ve günlük üretim miktarları da bilindiğinden, oluşturulan bu talebe göre mevcut sistemin servis seviyeleri tekrar hesaplanabilmiştir. Aynı talep verisi çözüm yaklaşımında girdi olarak alınarak önerilen servis seviyeleri hesaplanmıştır. Günlük beklenen miktarlı ve günlük eşit miktarlı olmak üzere iki farklı günlük talep verisi oluşturulmuş, her biri için mevcut sistemin ve önerilen sistemin ceza ve envanter taşıma maliyetleri ile servis seviyeleri hesaplanmıştır.

Tablo 4. Günlük Eşit Miktarlı Talebe Göre Mevcut ve Önerilen Sistem Karşılaştırılması

Performans Ölçüsü	İyileştirme
Toplam Aylık Envanter Tutma Maliyeti (TL)	-%59
Toplam Ceza Maliyeti (TL)	%35
Toplam Maliyet	%33
Stokta Bulunurluk Oranı (SBO-Tip 1 Servis Seviyesi)	%1

Önerilen sistemin sonuçları karışık tamsayı programlama modellerinin GAMS/Cplex çözücüsü yardımıyla çözülmesiyle elde edilmiştir. Günlük beklenen miktarlı talep verisi şirketten alınan bilgilere göre oluşturulmuş, aylık miktarlar günlere yaklaşık olarak dağıtılmıştır. Ancak yine de talebin her ürün için her gün eşit miktarda geldiği varsayımıyla birinci veriye alternatif olarak günlük eşit miktarlı talep verisi oluşturulmuş, bu veri ile sonuçlar tekrar hesaplanmıştır. Her iki durumda da performans ölçülerinde iyileştirmeler gözlemlenmiştir.

Tablo 4'te performans ölçülerinin nasıl değiştiği gözlenmektedir. Önerilen sistem, müşteri ve ürünleri önceliklendirerek stokta bulunurluk oranını (servis seviyesini) arttırdığı için envanter tutma maliyetindeki küçük değişime rağmen toplam ceza maliyetinde belirgin bir düşüş söz konusudur. Stokta bulunurluk oranı ise %1 oranında yükselmiştir. Bu oran, şirket tarafından belirle-

nen %94 hedefi göz önünde bulundurulduğunda yeterli görülmemektedir. Ancak bu hedef, şirket tarafından sadece zincir mağaza ve geleneksel kanal müşterilerine yapılan satışlar için belirlenmiştir. Mevcut veri ise tüm müşteri kanallarının sipariş ettiği ürünleri içermekte ve bu ürünlerin hepsi aynı fabrikada, aynı üretim hatlarında üretilmektedir. Bu sebeple çözüm, bu ürünlerin hepsi için oluşturulmakta ve sonuçlar tüm ürünler için elde edilmektedir. Talebin günler arasında eşit dağıldığının varsayılması ve üretim planına müdahalelerin göz ardı edilmesi de stokta bulunurluk oranlarının hedeften düşük olmasında etkilidir. Kapasite kısıtları nedeniyle, Tip-1 servis seviyesini yeterince iyileştirmek mümkün görülmemektedir. Ancak ceza maliyetleri incelendiğinde, önerilen sistemin mevcut sisteme göre kısıtlı talep karşılama yeteneğini öncelikli müşterilere daha çok yönelttiği gözlemlenmektedir. Şirketin stratejik amaçları doğrultusunda öncelikli müşterilere sağlanan servisin iyileştirilmesi önemli bir katkıdır.

Günlük beklenen miktarlı talep verisi, şirketten alınan bilgilere göre, talebin ayın son haftalarında ve büyük mağazaların rutin siparişlerini verdikleri günlerde yüksek olacağı şekilde tasarlandı. Bu veri kullanılarak elde edilen aylık performans ölçülerinin iyileştirme değerleri Tablo 5'te mevcuttur.

Tablo 5. Günlük Beklenen Talep Verisine Göre Mevcut ve Önerilen Sistem Karşılaştırılması

Performans Ölçüsü	İyileştirme
Toplam Aylık Envanter Tutma Maliyeti (TL)	-%38
Toplam Ceza Maliyeti (TL)	%56
Toplam Maliyet	%54
Stokta Bulunurluk Oranı (SBO-Tip 1 Servis Seviyesi)	%5

Tablo 6. Eklene Hatla Beraber Önerilen ve Mevcut Sistem Karşılaştırılması

Performans Ölçüsü	İyileştirme
Toplam Aylık Envanter Tutma Maliyeti (TL)	-%55
Toplam Ceza Maliyeti (TL)	%71
Toplam Maliyet	%69
Stokta Bulunurluk Oranı (SBO-Tip 1 Servis Seviyesi)	%17

Tablo 5'te, eşit dağılımlı talep dağılımlı varsayımıyla benzer iyileştirmeler mevcuttur. Envanter tutma maliyetinde %38 oranındaki artışa rağmen toplam ceza maliyetinde belirgin iyileştirme görülmektedir. Stokta bulunurluk oranındaki %5'lik artış çok daha belirgindir.

5.1 Duyarlılık Analizi

Performans ölçülerindeki değişiklikleri incelemek üzere bazı duyarlılık analizleri yapılmıştır. Bölüm 2'de yapılan incelemelerde, talebin karşılanabilmesi için birinci hattın kapasitesinin üzerinde çalışması gerektiği görülmüştür. Birinci hatla aynı teknolojik özelliklere sahip bir hattın üretim sistemine eklenmesinin performans ölçülerini nasıl etkilediğini görmek için duyarlılık analizi yapılmış, performans ölçülerindeki iyileştirmeler Tablo 6'da sunulmuştur.

En yoğun hat olarak görülen ve %100 kullanım ile çalışan birinci hattın sisteme bir tane daha ekleniği varsayıldığında, stokta bulunurluk oranında büyük değişim görülmektedir. Eğer firma için maliyetlerdeki kazanç yeni kurulacak hattın maliyetini karşılıyorsa, stokta bulunurluk oranlarında büyük iyileşmeler sağlanacaktır. Bu çözüm altında, ceza maliyetlerinden görüleceği gibi, öncelikli müşterilerin talep karşılama oranları oldukça iyileştirilmiştir.

Tablo 7. Eklenen Vardiya ile Önerilen ve Mevcut Sistem Karşılaştırması

Performans Ölçüsü	İyileştirme
Toplam Aylık Envanter Tutma Maliyeti (TL)	-%73
Toplam Ceza Maliyeti (TL)	%84
Toplam Maliyet	%81
Stokta Bulunurluk Oranı (SBO-Tip 1 Servis Seviyesi)	%19

Kapasiteyi arttırmanın etkisini incelemek için düşünülen diğer seçenek ise vardiya eklemektir. Mevcut durumda iki vardiya çalışan firmanın üç vardiya çalıştırılarak elde edilen yeni performans ölçüleri ise Tablo 7’de bulunmaktadır. Stokta bulunurluk oranlarında büyük bir artış gözlemlenmektedir.

6. SONUÇ

Eczacıbaşı Hijyen Ürünleri için yapılan bu proje müşterilerden gelen talepleri tam ve zamanında karşılayacak bir sistem tasarlandı. Sistem incelendiğinde, problem belirtisi olarak göze çarpan düşük servis seviyelerinin sebepleri ele alındı. Değişken talepler, özel siparişler ve kapasite kısıtından dolayı dinamik üretim planlama politikası gerektiği öngörüldü. Hiyerarşik çalışan üç aşamalı bir üretim planlama sistemi oluşturuldu. Birinci aşamada, önerilen matematiksel model ile ürünlerin üretim tedarik süreleri bulundu, daha sonra bu tedarik süreleri kullanılarak emniyet stokları hesaplandı. Ardından, ürünlerin hafta bazında fabrika ve taşeron üretim zamanları ve adetleri belirlendi. Üretim adetlerinin belirlenmesinin ardından üretim hattı bazında haftalık üretim çizelgeleri elde edildi. Üretim planına göre teslim tarihine kadar karşılanamayan özel siparişler için hazırlanan modellerin tekrar çalıştırılması önerisiyle dinamik bir çözüm yapısının oluşması sağlandı. Üretim alanında getirilen bu çözüm yaklaşımlarına ek olarak, öncelikli müşterilere envanter tahsisi önerilerek satış aşamasında da iyileştirmeler hedeflendi. Önerilen çözüm mevcut sistemle karşılaştırıldı ve belirlenen performans ölçülerinde tatmin edici iyileştirmeler olduğu görüldü. Yapılan duyarlılık analizleriyle karar vericinin vardiya

ekleme ve yeni üretim hattı açma seçeneklerinin sonuçlarını görmesi sağlandı.

KAYNAKÇA

1. **Almada-Lobo, B., Klabjan, D., Carravilla, M. A., Oliveira, J. F.** 2007. “Single Machine Multi-Product Capacitated Lot-Sizing with Sequence-Dependent Setups,” *International Journal of Production Research*, vol. 45, p. 4873-4894.
2. **Bowersox, D. J., Closs, D. J., Helferich, O. K.** 1986. *Logistical Management*, Macmillan Publishing Co., New York, p. 189-197.
3. **Drexel, A., Kimms, A.** 1996. “Lot-Sizing and Scheduling. Survey and Extensions,” *European Journal of Operational Research*, vol. 99 (2), p. 221–235.
4. **Gicquel, C., Minoux, M., Dallery, Y.** 2008. “A Tight MIP Formulation for the Discrete Lot-Sizing and Scheduling Problem with Sequence-Dependent Setup Costs and Times,” *International Conference on Information Systems*, 28-30 May 2008, Logistics and Supply Chain. Madison, USA.
5. **Kang, S., Malik, K., Thomas, L. J.** 1999. “Lot-sizing and Scheduling on Parallel Machines with Sequence-dependent Setup Costs,” *Management Science*, vol. 45 (2), p. 273-289.
6. **Löhndorf, N., Riel, M., Minner, S.** 2014. “Simulation Optimization for the Stochastic Economic Lot Scheduling Problem with Sequence-Dependent Setup Times,” *International Journal of Production Economics*, vol. 157, p. 170-176.
7. **Meyr, H., Seeanner, F.** 2012. “Multi Stage Simultaneous Lot-Sizing and Scheduling for Flow Line Production,” *OR Spectrum*, vol. 35 (1), p. 33-73.