

# SABİT ÜRETİM HAZIRLIK MALİYETİNİN SÜREÇ ESNEKLİĞİNDE STOK OPTİMİZASYONUNA ETKİSİ

Hacettepe Üniversitesi  
İktisadi ve İdari Bilimler  
Fakültesi Dergisi,  
Cilt 36, Sayı 1, 2018,  
s. 117-139

## Mehmet SOYSAL

Dr.Öğr. Üyesi, Hacettepe Üniversitesi,  
İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi,  
İşletme Bölümü  
mehmetsoysal@hacettepe.edu.tr

## Mustafa ÇİMEN

Dr.Öğr. Üyesi, Hacettepe Üniversitesi,  
İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi,  
İşletme Bölümü  
mcimen@hacettepe.edu.tr

## Sedat BELBAĞ

Dr., Gazi Üniversitesi,  
İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi,  
İşletme Bölümü  
sbelbag@gmail.com

**Ö**z: Üretimde süreç esnekliği, farklı ürünlerin minimum hazırlık maliyetiyle aynı üretim tesisinde üretilmesini hedeflemektedir. Sabit üretim hazırlık maliyetinin tamamen ortadan kalkması süreç esnekliği için yüksek seviyede yatırım yapılsa bile, pek çok durumda mümkün değildir. Bu çalışmada, süreç esnekliğine sahip sistemlerde stok kararlarının verilmesi için sabit hazırlık maliyetlerini dikkate alan bir karar destek modeli sunulmuş ve sabit hazırlık maliyetlerinin süreç esnekliğinde stok kararlarına etkisi araştırılmıştır. Bu çerçevede süreç esnekliği problemi sabit hazırlık maliyeti göz önünde bulundurularak, karma tam sayılı doğrusal programlama yöntemiyle modellenmiştir. Geliştirilen bu karar destek modeli kullanılarak esnek olmayan, ikili zincir tasarımı ve tam esnek olmak üzere üç farklı üretim sistemi üzerinde değerlendirmeler yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar süreç esnekliği problemi için geliştirilen karar destek modellerinde sabit üretim hazırlık maliyetinin göz önünde bulundurulmasının gerekliliğini ortaya çıkarmaktadır.

**Anahtar Sözcükler:** Üretim yönetimi, süreç esnekliği, stok optimizasyonu, sabit üretim hazırlık maliyeti, karma tam sayılı doğrusal programlama.

**THE EFFECT OF FIXED  
PRODUCTION SETUP COST  
ON INVENTORY OPTIMISATION  
UNDER PROCESS FLEXIBILITY**

*Hacettepe University  
Journal of Economics  
and Administrative  
Sciences  
Vol. 36, Issue 1, 2018,  
pp. 117-139*

**Mehmet SOYSAL**

Assist.Prof.Dr., Hacettepe University  
Faculty of Economics and Administrative  
Sciences  
Department of Business Administration  
mehmetsoysal@hacettepe.edu.tr

**Mustafa ÇİMEN**

Assist.Prof.Dr., Hacettepe University  
Faculty of Economics and Administrative  
Sciences  
Department of Business Administration  
mcimen@hacettepe.edu.tr

**Sedat BELBAĞ**

Dr., Gazi University  
Faculty of Economics and Administrative  
Sciences  
Department of Business Administration  
sbelbag@gmail.com

**A**bstract: Process flexibility in manufacturing aims to produce different products at the same production facility with the minimum setup cost. It is not possible to completely eliminate the setup cost in most cases even if a high degree of investment is made for process flexibility. In this study, a decision support model accounting for fixed setup cost has been presented to make inventory decisions in production systems that have process flexibility. Additionally, under process flexibility, the effect of fixed setup cost on inventory decisions has been investigated. In this context, process flexibility problem with fixed setup cost has been modelled using Mixed Integer Linear Programming approach. Numerical assessments have been done on three different production systems (dedicated, two chain and flexible) by means of the proposed decision support model. The results reveal the necessity of taking fixed setup cost into account in decision support models for process flexibility problem.

**Keywords:** *Production management, process flexibility, inventory optimization, fixed production setup cost, mixed integer linear programming.*

## GİRİŞ

Talep miktarlarındaki artış ve azalışlar, ürün hayat seyrinin kısılması, teknolojinin hızla değişimi, kişiselleştirilmiş ürünlerin sunumu ve küresel düzeyde rekabetin artması; işletmelerin karşılaştığı belirsizlik durumunu çözümü zor bir problem haline getirmektedir (Jain *vd.*, 2013). Üretim araçlarının farklı ürünleri üretebilecek esnekliğe sahip olması, özellikle talepten kaynaklanan belirsizlik ile baş edebilmek için kullanılan stratejik bir yetenektir. İşletmeler yüksek teknolojiye sahip üretim araçları sayesinde bir tesis içerisinde birden çok ürünü üretebilme yeteneğine erişmiştir. Böylece işletmenin sunduğu farklı ürünlere yönelik talepler mevcut esnek üretim sistemi ile hızlı bir şekilde karşılanabilir.

Esneklik, bir işletmenin içsel ve/veya dışsal değişimlere uyum sağlama yeteneği olarak tanımlanır (Gustavson, 1984). İşletmeler rakiplerine karşı rekabet avantajı sağlayabilmek için çeşitli stratejik düzeylerdeki esneklik uygulamalarından faydalanır. Bu esneklik uygulamaları, kısaca, bir makinenin bir işlemde diğer işleme çok fazla çaba gerektirmeden geçebilmesi ile birçok işlemi yapması (makine esnekliği), üretim sisteminin farklı üretim hacimlerinde kâr kaybı olmadan üretim yapabilmesi (üretim hacmi esnekliği), mevcut ürünlere yeni parçaların eklenmesi veya varolan parçalarla değişiklik yapılması (ürün esnekliği) ve bir ürün parçasının üretim sistemini oluşturan alternatif üretim hatlarının herhangi birinde üretilmesi (rotalama esnekliği) şeklinde sıralanabilir (Sethi, Sethi, 1990).

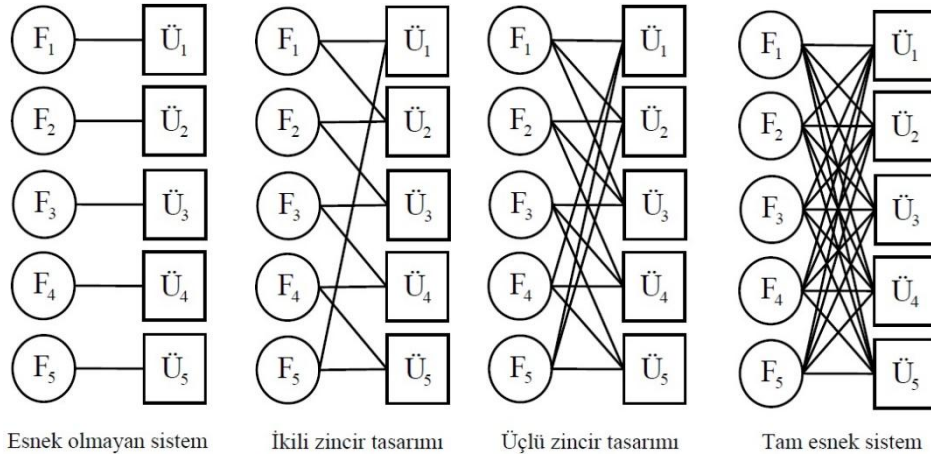
Bu çalışmada konu edilen süreç esnekliği ise, bir üretim tesisindeki ürün çeşidini veya ürün miktarını kolaylıkla değiştirebilme kabiliyetidir (Jordan, Graves, 1995). İşletmeler süreç esnekliğini üretim sistemlerine uyarlayarak ürün geçişlerindeki uzun makine hazırlık sürelerini ve yüksek makine hazırlık maliyetlerini düşürmeyi amaçlamaktadır (Browne *vd.*, 1984). Süreç esnekliği konusundaki öncül çalışmalar, esnekliğin bulunmadığı (her bir üretim tesisinin bir çeşit ürün üretebildiği) veya tam esnekliğin olduğu (her bir üretim tesisinin tüm ürün çeşitlerini üretebildiği) varsayılan üretim sistemlerini dikkate almıştır (Jaikumar, 1984; Andreou, 1990; Fine ve Freund, 1990; Mandelbanm ve Buzacott, 1986). Bu iki seçenekten tam süreç esnekliğinin yüksek miktarda yatırım ve teknolojik makineler gerektirdiği için uygulanabilirliği teorik düzeyde kalmıştır. Bu noktada Jordan ve Graves (1995) kısmî süreç esnekliği (*limited flexibility*) olarak tanımladıkları sistem tasarımı sayesinde daha az yatırım tutarı ile tam esnekliğin sağladığı faydaların büyük bölümüne erişilebileceğini belirtmiştir.

Kısmî süreç esnekliği, her bir üretim tesisinde tüm ürün çeşitleri yerine ürün çeşitlerinin yalnızca bir kısmının üretilbildiği sistemleri ifade etmektedir. Tüm ürün çeşitlerini üretebilecek makine, teçhizat, işgücü ve yedek parçanın her bir tesiste bulunması yerine, her tesiste küçük bir grup (bazen sadece iki) ürün çeşidi için altyapı

oluşturulması, gerekli yatırım maliyetlerinin ciddi ölçüde azalmasını sağlamaktadır. Bu da süreç esnekliğinin uygulanabilirliğini arttırmaktadır.

Jordan ve Graves (1995), kısmî esnekliğin tam esnekliğe yakın bir performans sergileyebilmesi için Zincirleme Tasarımı (*Chaining Design*) adı verilen bir sistem tasarımı önermiştir. Zincirleme tasarımı, 1'den F'ye kadar sıralanan her bir tesisin kendinden bir önceki tesisin ürettiği en az bir ürünü üretebilmesi ve yine kendinden sonra gelen tesisin üretebildiği en az bir ürünü üretebilmesini gerektirir. Üretilen ürün çeşitlerinden herhangi biri bu zincir yapısının dışında kalan tesiste üretilmediği gibi, tesislerden herhangi biri yine zincir yapısında yer almayan bir ürünü üretmemektedir. Talepte yaşanan dalgalanmalar, bu zincirde yer alan tesislerin üretim miktarları değiştirilerek karşılanır. Şekil 1, beş ürün ve beş tesisden oluşan bir üretim sisteminin çeşitli esneklik varsayımları altındaki tasarımlarını örneklemektedir. İlk yapı her tesisin sadece bir ürünü ürettiği esnek olmayan sistemi, ikinci yapı her tesisin sadece iki ürünü ürettiği ikili zincir tasarımı, üçüncü yapı her tesisin sadece üç ürünü ürettiği üçlü zincir tasarımı ve son yapı her tesisin tüm ürünleri üretebildiği tam esnek sistemi göstermektedir. Burada dikkat edilmesi gereken husus, kısmî süreç esnekliğinden tam anlamıyla faydalanabilmek için oluşturulan zincir yapıda herhangi bir kesintinin oluşmamasıdır.

**Şekil 1. Beş Ürün ve Beş Tesisten Oluşan Bir Sistem İçin Süreç Esnekliği Tasarımı Örnekleri**



(Çimen vd., 2016). (Daireler tesisleri, kareler ürünleri, tesisler ile ürünler arasındaki çizgilerse o tesiste ilgili ürünün üretilmediğini sembolize etmektedir.)

Süreç esnekliği konusunda yaşanan bu akademik gelişmeler, pratikte de süreç esnekliğinin uygulanabilirliğini artırmış ve kullanımını yaygınlaştırmıştır. Özellikle teknolojiadaki gelişmelerle beraber, süreç esnekliği günümüzde başta otomotiv sektörü olmak üzere birçok sektörde uygulanabilmektedir. Örneğin, Ford Motors yaklaşık 485 milyon dolarlık bir yatırım yaparak Kanada'da bulunan iki üretim tesisini farklı yedek parçaları üretebilecek esnek üretim sistemleri ile donatmıştır (Chou *vd.*, 2008).

Süreç esnekliği işletmelere dikkate değer bir rekabet avantajı sağlamakla beraber, üretim ve stok yönetimini de karmaşık hale getirmektedir. Üretim ve stok yönetimi talepleri zamanında karşılayabilmek için ne kadar ve ne zaman ürün üretilmesi gerektiğini belirlemeyi amaçlar. Süreç esnekliği ise, bir tesisin birden fazla ürün üretebilmesini sağladığı için o tesiste üretilen ürün ve ürünlere tahsis edilecek kapasite miktarlarının belirlenmesini zorlaştırmaktadır (Jordan, Graves, 1995). Her tesis belirli bir kapasite ile sınırlandırıldığı için, bir sonraki dönemde ürünlere yönelik talebi de dikkate alarak hangi üründen ne miktarda üretileceği ciddi bir sorun haline gelmektedir (Çimen, Kirkbride, 2017). Bir ürüne yönelik talepten daha fazla miktardaki üretim, bir başka ürünün talebini karşılayacak miktarın üretilmesini engelleyecektir. Böylece, hem fazla üretilen ürünler stoklanmak zorunda kalınacak hem de diğer ürüne olan talebin zamanında karşılanması mümkün olmayacaktır (Dennis *vd.*, 2011). Ayrıca, bir tesisdeki ürünler için verilen üretim miktarı kararları, aynı ürünleri üreten diğer tesislerde verilecek üretim kararlarını da etkileyecektir (Çimen, Belbağ, 2015). Tüm bu sebeplerle, tesislerde birden çok ürünün üretilmesi, optimal üretim ve stok kararlarının bulunmasını çok boyutlu bir karar problemi haline getirir.

Üretim ve stok yönetiminde göz önünde bulundurulacak maliyetlerin başlıcaları; sabit üretim hazırlık/kurulum maliyeti, değişken üretim maliyeti, elde bulundurma maliyeti ve ceza maliyetidir. Kısaca, değişken üretim maliyeti ürünlerin üretilmesinden, elde bulundurma maliyeti ürünlerin stokta bulundurulmasından ve ceza maliyeti de taleplerin zamanında karşılanamamasından kaynaklanan maliyetlerdir. Sabit üretim hazırlık maliyeti ise, belli miktardaki bir parti ürünün üretimine başlamadan önce yapılan hazırlıklar ile bağlantılı maliyettir. Üretim hakkındaki dokümantasyon çalışmaları, makinelerin baştan başlatıldığı sürede geciken üretim işlemi, çalışanların geçirdiği boş zamanlar, yavaşlayan üretim gibi durumlar sabit hazırlık maliyetine neden olur (Waters, 2003). Makinelerin bir ürünün üretiminden diğer ürünün üretimine geçişi sırasında yüksek kapasiteli bir makinenin durması maliyetlerin artmasına sebep olabilmektedir (Axsater, 2006).

Bu çalışmada, süreç esnekliğine ve kapasite kısıtlarına sahip bir üretim sisteminde çok dönemli planlama ufku için sabit üretim hazırlık maliyeti dikkate alınarak optimal üretim ve stok kararlarının belirlenmesi problemi incelenmektedir. Ele

alınan problem karma tam sayılı doğrusal programlama (*Mixed Integer Linear Programming, MILP*) ile modellendikten sonra çözülmüştür.

Çalışmanın bundan sonraki kısımları şu şekilde devam edecektir. İkinci bölümde konuyla ilgili çalışmalarını içeren literatür araştırmasına yer verilmiştir. Üçüncü bölümde ele alınan problemin çözümü için önerilen karar destek modeli sunulmaktadır. Dördüncü bölümde farklı esneklik düzeyine sahip sistem tasarımlarında modelin performansını belirlemek için çeşitli sayısal örnekler çözülmüştür. Son bölümde çalışmanın sonuçları ve gelecek çalışmalara yönelik öneriler sunulmuştur.

## 1. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Süreç esnekliği, tanımı itibarıyla, sabit hazırlık süresinin ve maliyetlerinin en aza indirildiği sistemlerin kurulmasını hedeflemektedir. Ancak hazırlık maliyetleri ne kadar azaltılırsa azaltılsın, tamamen ortadan kaldırılması pek çok sektörde mümkün değildir. Dolayısıyla sabit üretim hazırlık maliyetlerinin süreç esnekliğine sahip sistemlerde üretim ve stok kararlarının verilmesinde göz önünde bulundurulması gereken maliyetlerden birisidir.

Kapasite kısıtlı üretim ve stok optimizasyonu problemi literatüründe sabit üretim hazırlık maliyeti birçok çalışma tarafından dikkate alınmıştır. Bu konudaki ilk çalışmalar sabit hazırlık maliyeti varsayımı altındaki deterministik parti büyüklüğü belirleme problemine tam sayılı programlama (Baker *vd.*, 1978), karma tam sayılı programlama (Diaby *vd.*, 1992, Shaw ve Wagelmans, 1998) ve dinamik programlama (Chen *vd.*, 1994) kullanarak çözüm üretmiştir. Gallego ve Scheller-Wolf (2000) Scarf'ın sabit hazırlık maliyetini dikkate alan stokastik periyodik gözden geçirme stok problemini kapasite kısıtı altındaki optimal olup olmadığını incelemiştir. Söz konusu çalışmada, bu problem için optimal politikanın yapısı ortaya konulmuştur. Shaoxiang (2004) sonsuz planlama ufkunda benzer problem için modifiye edilmiş ( $s, S$ ) politikasının optimal olmadığını fakat X-Y bant yapısının (stok X miktarının altına düştüğünde kapasite sınırına kadar sipariş verilir, Y değerini aşarsa sipariş verilmez, X-Y arasında ise verilecek karar problemden probleme farklılık gösterir) geçerli olduğunu göstermiştir. Özer ve Wei (2004) ileri düzey talep bilgisinin (gelecekteki talebin geçmişte gözlemlenmiş taleplerin toplamıyla elde edilmesi) kapasite kısıtlı stokastik stok sistemi üzerindeki etkilerini incelemiştir. Kapasite miktarının düşük olduğu durumlarda ileri düzey talep bilgisi sabit hazırlık maliyetlerine göre toplam maliyetleri daha fazla düşürürken, kapasite kısıtı olmadığı durumlarda ise tam tersi geçerlidir. Chao *vd.* (2012) problemi fiyata bağımlı talep varsayımı altında inceleyerek, optimal stok politikasını parçalı bir yapıda (dört farklı stok durumu için farklı kararlar verilmesi) ortaya koymuştur. Shi *vd.* (2014) durağan olmayan ve zaman içinde korelasyon özelliği gösteren talep varsayımı altındaki problem için optimale yakın politikaları belirlemiştir. Akbalık *vd.* (2015) üretim ve stok kapasitelerinin kısıtlı olduğu tek ürün veya çok

ürünlü parti büyüklüğü problemleri için çözüm önerilerinde bulunmuştur. Kleintje-Ell ve Kiesmüller (2015) ise problemi birden çok perakendecinin stok ihtiyacının tek bir üreticiden sağlandığı durum açısından ele almıştır.

Süreç esnekliği literatüründe ise, sabit üretim hazırlık maliyeti varsayımı az sayıda akademik çalışma tarafından dikkate alınmıştır. Porteus (1985) ekonomik sipariş miktarında yer alan sabit hazırlık maliyetini parametre yerine değişken olarak ele alıp, farklı hazırlık maliyeti değerlerinin toplam maliyete olan etkisini incelemiştir. Sonuç olarak, düşük hazırlık maliyetlerinin artan kalite, esneklik ve etkin kapasite kullanıma neden olduğu tespit edilmiştir. Son ve Park (1987) ürün ve süreç esnekliğini hazırlık maliyeti ve boş makine zamanı parametrelerini kullanarak incelemiştir. Rao *vd.* (2004) tek yönlü ürün ikamesi yoluyla birden çok ürünün üretildiği stokastik stok problemini tek dönem ve sabit hazırlık maliyeti varsayımı altında çözmektedir. He *vd.* (2011) üretim sistemini esnek hale getirmek için gereken yatırım kararını belirleyen çok amaçlı karar verme yöntemi önermiştir. Önerilen hiyerarşik yöntemin ilk aşaması esneklik düzeyi ve talep tahminlerini dikkate alarak üretim kararını belirlerken, ikinci aşama ise bu kararı dikkate alarak optimal esneklik stratejisini bulmaktadır.

Yapılan literatür taramasında, süreç esnekliğine sahip sistemlerde sabit üretim hazırlık maliyeti dikkate alınarak optimal stok kararlarının hesaplanmasına dair bir çalışma bulunmamıştır. Hâlbuki, süreç esnekliği farklı ürünlerin minimum hazırlık maliyetiyle aynı üretim tesisinde üretilmesini hedeflemesine rağmen, sabit hazırlık maliyetinin tamamen ortadan kalkması pek çok durumda mümkün değildir. Optimal stok politikalarının bulunması için sabit hazırlık maliyetlerini dikkate alan bir karar destek modelinin geliştirilmesi, literatüre yapacağı teorik katkının yanında pratikte de pek çok karar verici için faydalı bir araç sağlayacaktır.

## **2. SÜREÇ ESNEKLİĞİ PROBLEMİ VE ÖNERİLEN KARAR DESTEK MODELİ**

Ele alınan süreç esnekliği probleminde,  $F$  adet üretim kaynağı ve  $P$  adet ürün çeşidi bulunmaktadır. Bu çalışmada üretim kaynaklarının fabrikalar olduğu varsayılmıştır, ancak farklı problemlerde üretim bandı, üretim hücresi veya işçi gibi farklı üretim kaynakları da söz konusu olabilir.

Her bir fabrika bir veya daha fazla ürün çeşidini üretebilmektedir. Aynı şekilde her bir ürün çeşidi bir veya daha fazla fabrika tarafından üretilebilmektedir. Ancak, fabrikalarda her bir ürün çeşidinin üretimine başlamadan önce o ürünün üretilmesi için gerekli fiziksel şartları sağlamak üzere sabit üretim hazırlık maliyetine katlanılmaktadır. Ürünler ve fabrikalar arasında çalışmanın giriş bölümünde anlatılan üretim ilişkileri (üretim bağlantıları) kısmî ya da tam esneklik varsayımıyla tasarlanmış olabilir (bknz. Şekil 1).

Problem çerçevesinde T dönemli sonlu planlama ufku için bir üretim sisteminde optimal üretim kararları bulunulmaya çalışılmaktadır. Sistemde periyodik olarak her dönem başında üretim hedefleri belirlenmektedir.

Her bir fabrikada, birim üretim, sabit üretim hazırlık, elde bulundurma ve ceza maliyetleri ile karşılaşmaktadır. Birim üretim ve sabit üretim hazırlık maliyetleri, fabrikaların fiziksel ve teknik özelliklerine bağlı olarak her bir fabrika-ürün ikilisi için farklı olabilir. Aynı şekilde elde bulundurma ve ceza maliyetleri de ürün çeşidine göre farklılık gösterebilir. Elde bulundurma maliyeti dönem sonunda stoklarda kalan ürün miktarıyla doğru orantılıdır. Dönem sonunda elde kalan her bir ürün, birim stok maliyetini doğurmaktadır. Benzer şekilde, ceza maliyeti de dönem içinde stoksuz kalınması sebebiyle karşılanamayan talep miktarıyla doğru orantılıdır.

Tablo 1’de yukarıda tanımı verilen süreç esnekliği problemi için önerilen matematiksel modelde kullanılan notasyon (küme, parametre, değişken tanımlamaları) ile ilgili bilgi verilmektedir.

**Tablo 1. Matematiksel Modelde Kullanılan Notasyon**

Sembol	Açıklama	Birim
$F$	Fabrika kümesi $\{1,2, \dots,  F \}$	
$P$	Ürün çeşidi kümesi $\{1,2, \dots,  P \}$	
$T$	Planlama ufku $\{1,2, \dots,  T \}$	
$f_{f,p}$	$f$ fabrikasında $p$ ürünü için sabit üretim hazırlık maliyeti	TL/adet
$u_{f,p}$	$f$ fabrikasında $p$ ürünü için birim üretim maliyeti	TL/adet
$s_p$	$p$ ürünü için birim ceza maliyeti	TL/adet
$h_p$	$p$ ürünü için birim elde bulundurma maliyeti	TL/adet
$d_{p,t}$	$t$ döneminde $p$ ürünü için oluşan talep miktarı	adet
$c_f$	$f$ fabrikasının toplam üretim kapasitesi	adet
$\gamma$	Gelecek dönem maliyetlerinin bugüne indirgenmesi için gerekli iskonto oranı	
$l_{f,p}$	$f$ fabrikasında $p$ ürünü üretilebiliyorsa 1, üretilemiyorsa 0 değerini almaktadır.	
$k_p$	Planlama ufkunun başında $p$ ürünü için stok miktarı	adet
$Q_{f,p,t}$	$f$ fabrikasında $t$ döneminde $p$ ürünü üretim miktarı	adet
$I_{p,t}^-$	$p$ ürünü için $t$ döneminin sonunda karşılanamayan talep	adet
$I_{p,t}^+$	$p$ ürünü için $t$ döneminin sonunda elde kalan stok miktarı	adet
$I_{p,t}$	$p$ ürünü için $t$ döneminin başında stok miktarı	adet
$Y_{f,p,t}$	$f$ fabrikasında $t$ döneminde $p$ ürünü için sabit üretim hazırlık maliyetine katlanılıp katlanmadığı, 0-1 değişkeni	

Süreç esnekliği problemi için önerilen MILP modeli aşağıda sunulmaktadır:



$$\text{Minimize (en küçük)} \\ Z = \sum_t \gamma^{t-1} \left[ \sum_f \sum_p f_{f,p} Y_{f,p,t} + \sum_f \sum_p u_{f,p} Q_{f,p,t} + \sum_p s_p I_{p,t}^- + \sum_p h_p I_{p,t}^+ \right] \quad (1)$$

$$\text{subject to (kısıt seti altında)} \\ I_{p,0} = k_p \quad \forall p \in P, \quad (2)$$

$$I_{p,t}^- \geq d_{p,t} - I_{p,t}^- - \sum_f Q_{f,p,t} \quad \forall p \in P, t \in T, \quad (3)$$

$$I_{p,t}^+ \geq I_{p,t} + \sum_f Q_{f,p,t} - d_{p,t} \quad \forall p \in P, t \in T, \quad (4)$$

$$I_{p,t+1} = I_{p,t} + \sum_f Q_{f,p,t} - d_{p,t} \quad \forall p \in P, t \in T, \quad (5)$$

$$\sum_p Q_{f,p,t} \leq c_f \quad \forall f \in F, t \in T, \quad (6)$$

$$Q_{f,p,t} \leq c_{f,p} Y_{f,p,t} \quad \forall f \in F, p \in P, t \in T, \quad (7)$$

$$I_{p,t}^+ \geq 0 \quad \forall p \in P, t \in T, \quad (8)$$

$$I_{p,t}^- \geq 0 \quad \forall p \in P, t \in T, \quad (9)$$

$$Q_{f,p,t} \geq 0 \quad \forall f \in F, p \in P, t \in T, \quad (10)$$

$$Y_{f,p,t} \in \{0,1\} \quad \forall f \in F, p \in P, t \in T. \quad (11)$$

Yukarıdaki, sabit üretim hazırlık maliyeti olduğu durumda süreç esnekliği problemi için geliştirilen MILP modeli bir amaç fonksiyonu (1) ve on kısıt setinden (2,...,11) oluşmaktadır. Amaç fonksiyonu sırasıyla sabit üretim hazırlık, üretim, elde bulundurma ve ceza maliyetlerini içermektedir. Amaç fonksiyonunda iskonto oranı ( $\gamma$ ) kullanılarak,  $T$  dönemli bir planlama ufku için gelecek dönemlerin maliyetleri, finans teorisine uygun şekilde bugünkü değere indirgenmektedir.

Kısıt setleri (2),..., (5) stok kararları ile ilişkilidir. (2) numaralı kısıt seti her bir ürün için planlama ufkunun başındaki stok miktarlarının tespit edilmesinde kullanılmaktadır. (3) ve (4) numaralı kısıt setleri her bir ürün için her dönem sonunda karşılanamayan talep ve elde kalan stok miktarlarını hesaplamakta kullanılmaktadır. (5) numaralı kısıt seti kullanılarak her bir ürün için her dönem başındaki stok miktarları belirlenmektedir.

Kısıt setleri (6) ile (7) üretim kararları ile ilişkilidir. (6) numaralı kısıt seti üretim kararlarının her bir fabrikanın üretim kapasitesiyle sınırlı olduğunu göstermektedir. (7)

numaralı kısıt seti ise,  $f$  fabrikasında  $p$  ürününün üretilebilmesini, üretim sistemi tasarımında belirlenen üretim ilişkileriyle bağlantılandırmaktadır.

Son olarak kısıt setleri (8),..., (11) modelde kullanılan karar değişkenlerinin türü ile ilişkilidir.

Üretimde sabit üretim hazırlık maliyetinin süreç esnekliğinde stok optimizasyonuna etkisini incelemek üzere Çimen vd. (2016) tarafından önerilen sabit üretim hazırlık maliyeti olmadığı durumda süreç esnekliği problemi için önerilen Doğrusal Programlama modelinin de bu çalışmada kısaca tanıtılmasının uygun olacağı düşünülmektedir.

$$\begin{aligned}
 & \text{Minimize (en küçük)} \\
 Z = & \sum_t \gamma^{t-1} \left[ \sum_f \sum_p u_{f,p} Q_{f,p,t} + \sum_p s_p I_{p,t}^- + \sum_p h_p I_{p,t}^+ \right] \quad 12 \\
 & \text{subject to (kısıt seti altında)} \\
 & \quad \text{Kısıt seti(2,...6),} \\
 Q_{f,p,t} \leq & c_f l_{f,p} \quad \forall f \in F, p \in P, t \in T, \quad 13 \\
 & \quad \text{Kısıt seti(8,...10).}
 \end{aligned}$$

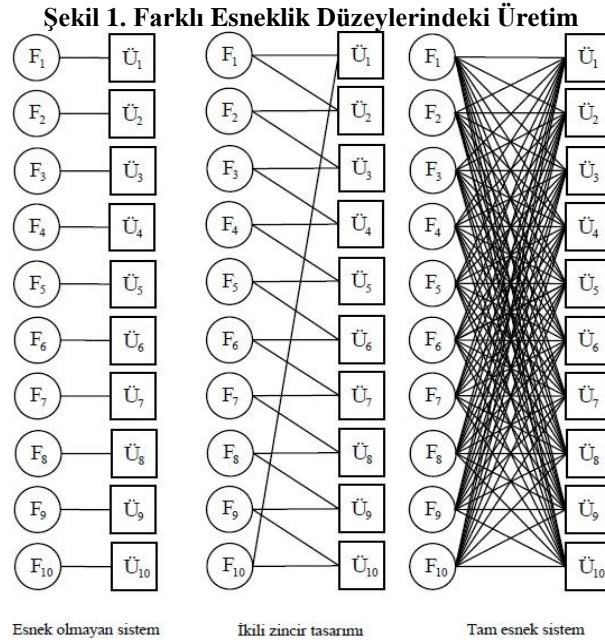
Yukarıdaki Doğrusal Programlama modeli (12) numaralı amaç fonksiyonu ve (2,...,6), (13), (8,...,10), numaralı kısıt setlerinden oluşmaktadır. Önerilen modelden görüleceği üzere Çimen vd. (2016) süreç esnekliği probleminde sabit üretim hazırlık maliyetini dikkate almamıştır.

### 3. SAYISAL ÇALIŞMA

Bu bölümde zincirleme tasarımı, tam esneklik tasarımı ve esnek olmayan tasarım; sabit üretim hazırlık maliyetinin bulunduğu ve bulunmadığı durumlar göz önünde bulundurularak çok dönemli bir planlama ufku için optimal stok politikalarının üreteceği maliyetler açısından karşılaştırılacaktır. Bu kapsamda ilk olarak kullanılan deney tasarımı hakkında bilgi verilmekte, izleyen kısımda ise sonuçlar tartışılmaktadır.

#### 3.1. Deney tasarımı

Sayısal çalışmada, süreç esnekliği probleminde Jordan ve Graves (1995) ve Çimen vd. (2016) tarafından incelenen, her bir esneklik seviyesi için 10 ürün ve 10 fabrika içeren örnek birer sistem kullanılmıştır. Şekil 2 bu çalışmada kullanılan esnek olmayan, ikili zincir ve tam esnek sistemler için fabrika-ürün ilişkilerini göstermektedir.



Sistemleri Daireler Fabrikaları, Kareler Ürünleri Temsil Etmektedir (Çimen vd., 2016).

Planlama ufku beş dönemden oluşmaktadır. Her dönem için gerçekleşecek talep, planlama ufkunun başında bilinmektedir. Ürünlerin taleplerinin Poisson dağılımına sahip olduğu ve talep ortalamalarının birbirine eşit olduğu varsayılmıştır ( $\bar{d} = d_1, d_2, \dots, d_{10}$ ). Sabit üretim hazırlık ve birim ceza maliyetlerinin her bir fabrika ve ürün için eşit olduğu kabul edilmiştir. Birim elde bulundurma maliyeti, her bir ürün için  $h = 1$  olarak belirlenmiştir. Üretim maliyetleri ise her bir ürün-fabrika çifti için farklıdır. Tablo 2 her bir ürün-fabrika çifti için ilgili üretim maliyetlerini göstermektedir.

Sabit üretim hazırlık maliyetinin, birim ceza maliyetinin ve talep ortalamalarının farklı esneklik tasarımlarını nasıl etkilediğini sınamak amacıyla üç farklı sabit üretim hazırlık maliyeti ( $f = 250, 500, 750$ ), üç farklı birim ceza maliyeti ( $s = 3, 7, 15$ ) ve üç farklı talep ortalaması ( $\bar{d} = 500, 1000, 2500$ ) test edilmiştir.

Üretim kapasitesinin ortalama talebe oranının farklı esneklik tasarımlarını nasıl etkilediğini sınamak amacıyla fabrika kapasitelerinin talepten düşük olduğu, talebe eşit olduğu ve talepten yüksek olduğu üç farklı üretim kapasite oranı ( $c = 0,9 \times \bar{d}$ ;  $c = \bar{d}$ ;  $c = 1,1 \times \bar{d}$ ) test edilmiştir. Dolayısıyla, her bir kapasite oranı, üç farklı talep ortalaması ( $\bar{d} = 500, 1000, 2500$ ) için ayrı ayrı hesaplanmıştır.

**Tablo 2. Üretim Maliyetleri**

		Ürünler									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Fabrikalar	1	1	1,1	1,21	1,33	1,46	1,61	1,77	1,95	2,14	2,36
	2	2,36	1	1,1	1,21	1,33	1,46	1,61	1,77	1,95	2,14
	3	2,14	2,36	1	1,1	1,21	1,33	1,46	1,61	1,77	1,95
	4	1,95	2,14	2,36	1	1,1	1,21	1,33	1,46	1,61	1,77
	5	1,77	1,95	2,14	2,36	1	1,1	1,21	1,33	1,46	1,61
	6	1,61	1,77	1,95	2,14	2,36	1	1,1	1,21	1,33	1,46
	7	1,46	1,61	1,77	1,95	2,14	2,36	1	1,1	1,21	1,33
	8	1,33	1,46	1,61	1,77	1,95	2,14	2,36	1	1,1	1,21
	9	1,21	1,33	1,46	1,61	1,77	1,95	2,14	2,36	1	1,1
	10	1,1	1,21	1,33	1,46	1,61	1,77	1,95	2,14	2,36	1

**Kaynak:** (Çimen *vd.*, 2016)

Ürünler için planlama ufku başında herhangi bir stok bulunmadığı varsayılmaktadır. Gelecek dönem maliyetlerinin bugüne indirgenmesi için gerekli iskonto oranı 0.9 olarak kabul edilmiştir.

Süreç esnekliği probleminin ana amacı her dönem her bir fabrikada hangi üründen ne kadar üretileceğinin kararının verilmesidir. Yukarıda bahsedilen varsayımlarla söz konusu problem için üç farklı sabit üretim hazırlık maliyeti, üç farklı birim ceza maliyeti, üç farklı talep ortalaması ve üç farklı kapasite oranı olmak üzere toplamda 81 (3 x 3 x 3 x 3) senaryo oluşturulmuştur. Sonuçların özel bir vakaya bağımlı olmaması amacıyla, her bir senaryo için ilgili talep ortalamaları dikkate alınarak 30 farklı örnek incelenmiştir. Her bir örnek için sabit üretim hazırlık maliyetinin dikkate alındığı ve alınmadığı durumlarda farklı esneklik tasarımlarının elde edeceği optimal politikalar ve ilgili maliyetler, IBM ILOG CPLEX 12.6 Optimizasyon yazılımı kullanılarak bulunmuştur.

### 3.2. Sonuçlar

Bu bölümde ilk olarak örnek bir problem çözümü detaylı olarak gösterilmekte, ardından sırasıyla sabit üretim hazırlık maliyeti altında üretim sistemlerinin performansı ve sabit üretim hazırlık maliyetinin üretim sistemlerinin performansına etkisi değerlendirilmektedir.

#### 3.2.1. Örnek problem çözümü

Bu bölümde seçilen bir senaryoda tek bir örnek problem için ikili zincir tasarımı altında sabit üretim hazırlık maliyetinin bulunduğu ve bulunmadığı durumlarda elde

edilen sonuçlar sunulmaktadır. Bu senaryoda sabit üretim hazırlık maliyeti (f) 500, birim ceza maliyeti (s) 7, talep ortalaması ( $\bar{d}$ ) 1000, üretim kapasitesi (c) ise 1000 kabul edilmiştir.<sup>1</sup> Bu senaryo için çözülen örnekte, sabit üretim hazırlık maliyetinin dikkate alındığı ve alınmadığı durumlarda elde edilen optimal sonuçlar Tablo 3'te verilmiştir. Bu tablodan da görüleceği üzere, üretimde sabit üretim hazırlık maliyetinin süreç esnekliğinde stok optimizasyonuna etkisi beş ana performans kriteri göz önünde bulundurularak değerlendirilmektedir. Söz konusu ana performans kriterleri şunlardır: (i) üretim maliyeti, (ii) ceza maliyeti, (iii) elde bulundurma maliyeti, (iv) sabit üretim hazırlık maliyeti ve (v) toplam maliyet.

**Tablo 3. Sabit Üretim Hazırlık Maliyeti Etkisi**

Ana Performans Kriterleri	Sabit Üretim Hazırlık Maliyeti		
	Dikkate alınmakta	Dikkate alınmamakta	Fark (%)
Üretim maliyeti	45137	45492	0.8%
Ceza maliyeti	3429.7	0	-100.0%
Elde bulundurma maliyeti	327.31	130.43	-60.2%
Sabit üretim hazırlık maliyeti	23306	37683	61.7%
Toplam maliyet	72200.01	83305.43	15.4%

Elde edilen sonuçlara göre seçilen örnek problemde sabit üretim hazırlık maliyetini dikkate almamak, ceza ve elde bulundurma maliyetlerinin azalmasını sağlamasına rağmen, yüksek sabit üretim hazırlık maliyetine katlanması toplam maliyette %15.4'lük bir artışa yol açmaktadır.

Tablo 4 ve 5 sabit üretim hazırlık maliyetinin dikkate alındığı ve alınmadığı durumlarda elde edilen optimal sonuçları detaylı olarak sunmaktadır.

Sabit üretim hazırlık maliyetini dikkate alan modelden elde edilen sonuçlara göre 6. ürün, 1. dönem haricinde üretim esnekliğinden faydalanılmadığı gözlemlenmektedir (bkz. Tablo 4). Diğer bir ifadeyle, sadece 6. ürün için 1. dönemde iki değişik fabrikadan (F5 ve F6) faydalanılmaktadır, bu ürünün diğer dönemlerdeki üretiminde ve diğer ürünlerin tüm dönemlerdeki üretimlerinde planlama ufku boyunca sadece birer fabrikadan faydalanılmaktadır. Bunun nedeni ise modelin sabit üretim hazırlık maliyetine katlanmaktan kaçınmasıdır.

**Tablo 4. Sabit Üretim Hazırlık Maliyetinin Dikkate Alındığı Durumda Elde Edilen Optimal Sonuçlar**

Dönem	Bilgi*	Ürünler									
		Ü1	Ü2	Ü3	Ü4	Ü5	Ü6	Ü7	Ü8	Ü9	Ü10
1	Ü.Y.	F1(1000)	F2(1000)	F3(961)	F4(965)	F5(915)	F5,F6**	F7(994)	F8(1000)	F9(1000)	F10(1000)
	B.E.	1000	1000	961	965	915	1085	994	1000	1000	1000
	T.	974	1021	954	965	915	1047	994	994	971	1009
	S.E.	26	-21	7	0	0	38	0	6	29	-9
2	Ü.Y.	F1(1000)	F2(992)	F3(1000)	F4(978)	F5(1000)	F6(1000)	F7(948)	F8(1000)	F9(1000)	F10(1000)
	B.E.	1026	971	1007	978	1000	1038	948	1006	1029	991
	T.	1028	971	1007	937	957	1043	948	1022	1013	1032
	S.E.	-2	0	0	41	43	-5	0	-16	16	-41
3	Ü.Y.	F1(1000)	F2(981)	F3(992)	F4(1000)	F5(1000)	F6(975)	F7(972)	F8(1000)	F9(1000)	F10(1000)
	B.E.	998	981	992	1041	1043	970	972	984	1016	959
	T.	1017	969	992	1041	1014	957	972	964	1036	994
	S.E.	-19	12	0	0	29	13	0	20	-20	-35
4	Ü.Y.	F1(1000)	F2(1000)	F3(998)	F4(963)	F5(1000)	F6(1000)	F7(978)	F8(1000)	F9(1000)	F10(1000)
	B.E.	981	1012	998	963	1029	1013	978	1020	980	965
	T.	1030	1012	998	963	991	1000	978	1018	997	1072
	S.E.	-49	0	0	0	38	13	0	2	-17	-107
5	Ü.Y.	F1(991)	F2(986)	F3(971)	F4(961)	F5(1000)	F6(1000)	F7(979)	F8(1000)	F9(1000)	F10(1000)
	B.E.	942	986	971	961	1038	1013	979	1002	983	893
	T.	942	986	971	961	1054	1013	979	1045	1026	1046
	S.E.	0	0	0	0	-16	0	0	-43	-43	-153

\*Ü.Y.: Üretim Yeri, B.E.: Başlangıç Envanteri, T.: Talep, S.E.: Son Envanter

\*\*F5'de 1000 adet F6'da ise 85 adet olmak üzere toplam 1085 ürün üretilmiştir.

Sabit üretim hazırlık maliyetini dikkate alan modelden elde edilen sonuçların aksine söz konusu maliyeti dikkate almayan model bütün ürünler için farklı dönemlerde ikili zincir tasarımının sağladığı üretim esnekliğinden faydalanmayı önermektedir (bkz. Tablo 5). Fakat Tablo 3'te sunulan sonuçlardan anlaşılacağı üzere önerilen bu strateji sabit üretim hazırlık maliyetinin büyük oranda artmasına sebebiyet verdiği için toplam maliyet açısından kötü performans sergilemektedir.

**Tablo 5. Sabit Üretim Hazırlık Maliyetinin Dikkate Alınmadığı Durumda Elde Edilen Optimal Sonuçlar**  
**Ürünler**

Dönem	Bilgi	Ü1	Ü2	Ü3	Ü4	Ü5	Ü6	Ü7	Ü8	Ü9	Ü10
1		F1(21)**				F5(47)				F9(9)	
	Ü.Y.	F1(974)	F2(1000)	F3(954)	F4(965)	F5(915)	F6(1000)	F7(994)	F8(994)	F9(971)	F10(1000)
	B.E.	974	1021	954	965	915	1047	994	994	971	1009
	T.	974	1021	954	965	915	1047	994	994	971	1009
	S.E.	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2		F1(1000)	F2(7)		F4(43)		F5(86)	F6(43)	F7(95)	F8(73)	F9(60)
	Ü.Y.	F10(28)	F2(989)	F3(1000)	F4(957)	F5(914)	F6(957)	F7(905)	F8(927)	F9(940)	F10(972)
	B.E.	1028	989	1007	957	957	1043	948	1022	1013	1032
	T.	1028	971	1007	937	957	1043	948	1022	1013	1032
	S.E.	0	18	0	20	0	0	0	0	0	0
3		F1(1000)	F2(27)		F3(35)	F4(14)		F7(11)		F8(47)	F9(11)
	Ü.Y.	F10(17)	F2(973)	F3(965)	F4(986)	F5(1000)	F6(1000)	F7(989)	F8(953)	F9(989)	F10(983)
	B.E.	1017	991	992	1041	1014	1000	989	964	1036	994
	T.	1017	969	992	1041	1014	957	972	964	1036	994
	S.E.	0	22	0	0	0	43	17	0	0	0
4		F1(1000)	F4(26)			F5(35)	F6(78)	F7(117)	F8(99)	F9(102)	
	Ü.Y.	F10(30)	F2(1000)	F3(1000)	F4(974)	F5(965)	F6(922)	F7(883)	F8(901)	F9(898)	F10(970)
	B.E.	1030	1022	1000	974	991	1000	978	1018	997	1072
	T.	1030	1012	998	963	991	1000	978	1018	997	1072
	S.E.	0	10	2	11	0	0	0	0	0	0
5		F1(58)		F2(82)	F3(113)	F4(163)	F5(109)	F6(96)	F7(117)	F8(72)	F9(46)
	Ü.Y.	F1(942)	F2(918)	F3(887)	F4(837)	F5(891)	F6(904)	F7(883)	F8(928)	F9(954)	F10(1000)
	B.E.	942	986	971	961	1054	1013	979	1045	1026	1046
	T.	942	986	971	961	1054	1013	979	1045	1026	1046
	S.E.	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

\*Ü.Y.: Üretim Yeri, B.E.: Başlangıç Envanteri, T.: Talep, S.E.: Son Envanter

\*F1'de 21 adet F2'da ise 1000 adet olmak üzere toplam 1021 ürün üretilmiştir.

Bu bölümde seçilen örnek problem üzerinde yapılan detaylı inceleme göstermektedir ki, süreç esnekliği probleminde sabit üretim hazırlık maliyetinin bulunması durumunda karar verme sürecinde kullanılacak olan modellerin ilgili maliyeti dikkate alması oldukça önemlidir. Aksi durumda uygulanacak politikanın optimal politikadan oldukça uzak olacağı görülmektedir.

### **3.2.2. Sabit Üretim Hazırlık Maliyetinin Dikkate Alındığı Durumda Üretim Sistemlerinin Performans Değerlendirmesi**

Bu bölümde sabit üretim hazırlık maliyetinin dikkate alındığı durumda üç farklı üretim sisteminin (esnek olmayan, ikili zincir tasarımı ve tam esnek) toplam maliyet açısından performans değerlendirilmesi yapılmaktadır. Bu amaç doğrultusunda, elde edilen sonuçların vakaya bağımlı olmaması amacıyla 81 farklı senaryo, rastgele üretilen 30'ar farklı talep seti kullanılarak incelenmiştir. Şekil 3 farklı sabit üretim hazırlık maliyeti, ceza maliyeti ve üretim kapasitesi seçenekleri için toplam maliyet açısından esneklik tasarımlarının kıyaslama sonuçlarını sunmaktadır.

İlk olarak süreç esnekliğinin bazı durumlarda toplam maliyet açısından avantaj sağladığı, bazılarında ise performansını etkilemediği gözlemlenmiştir. Aşağıda ilgili durumlar kısaca tartışılmaktadır.

Sabit üretim hazırlık maliyetinin artması, beklendiği gibi süreç esnekliğinin sağladığı avantajın azalmasına neden olmaktadır (bkz. Şekil 3a, 3b, 3c). Söz konusu maliyet kalemi arttıkça model farklı fabrikalarda aynı ürünün üretimini gerçekleştirip ek sabit üretim hazırlık maliyetlerine katlanmayı daha az önermektedir.

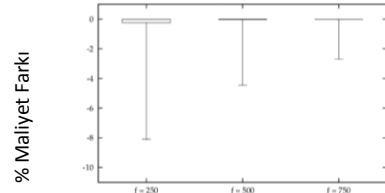
Ceza maliyetinin artması süreç esnekliğinin sağladığı avantajın artmasına neden olmaktadır (bkz. Şekil 3d, 3e, 3f). Ceza maliyeti arttıkça model aynı ürünün üretimi için farklı fabrikalardan yararlanıp stoksuz kalmamaya çalışmaktadır.

Üretim kapasitesi açısından bakıldığında, üretim kapasitesinin ortalama talepten az veya çok olduğu durumlarda süreç esnekliğinin herhangi bir avantaj sağlamadığı gözlemlenmektedir (bkz. Şekil 3g, 3h, 3i). Üretim kapasitesi düşük olduğunda tüm fabrikalar zaten tam kapasite ile çalıştıklarından, süreç esnekliği yoluyla istifade edilecek atıl kapasiteler bulunmamaktadır. Üretim kapasitesi yüksek olduğunda ise fabrikalar, diğer fabrikaların katkısı olmaksızın ürettikleri tek ürün için talebi karşılamakta sorun yaşamamaktadır. Bunların aksine üretim kapasitesinin sıkı (ortalama talebe eşit) olduğu durumda ise süreç esnekliğinin toplam maliyetleri azaltma konusunda fayda sağladığı görülmektedir. Bu durum, fabrikaların yer yer atıl kapasitelerinin bulunduğu, yer yer talebi karşılamakta zorlandığı senaryolarda süreç esnekliğinin faydasının tam manasıyla gözlenebileceğini göstermektedir.

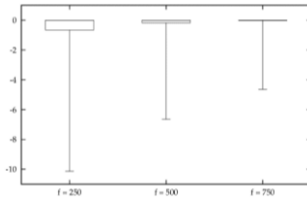


Sayısal çalışma kapsamında incelenen bir diğer husus, farklı esneklik tasarımlarının envanter maliyetlerine etkisi ve kısmî esnekliğin sabit üretim hazırlık maliyeti altında da tam esnekliğe yakın sonuçlar üretilip üretilmediğidir. Sonuçlara bakıldığında, ikili zincir ve tam esneklik tasarımlarının kullanımı ile elde edilen süreç esnekliğinin bazı durumlarda esnek olmayan tasarımlara göre ciddi maliyet avantajları sağladığı görülmektedir (bkz. Şekil 3a, 3d, 3g). Buna karşın, ikili zincir tasarımı ile tam esnek sistem arasında maliyet farklarının çok fazla olmadığı görülmektedir (bkz. Şekil 3c, 3f, 3i). Bu durum da sabit üretim hazırlık maliyetinin esneklik kullanımını kısıtlandırmasının bir sonucudur.

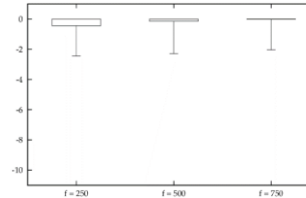
**Şekil 3. Sabit Üretim Hazırlık Maliyetinin Dikkate Alındığı Durumda Üretim Sistemlerinin Performans Değerlendirmesi**



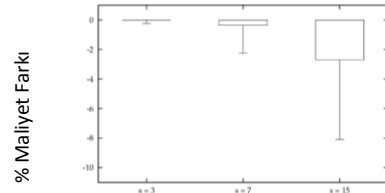
a) Hazırlık maliyeti – Esnek olmayan ile İkili zincir



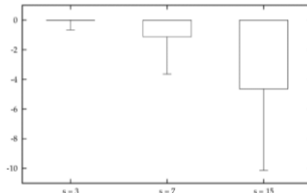
b) Hazırlık maliyeti – Esnek olmayan ile Tam esnek



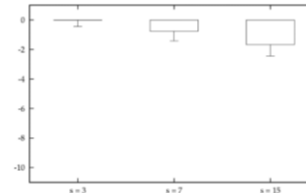
c) Hazırlık maliyeti – İkili zincir ile Tam esnek



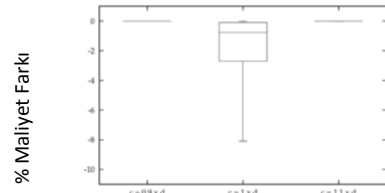
d) Ceza maliyeti – Esnek olmayan ile İkili zincir



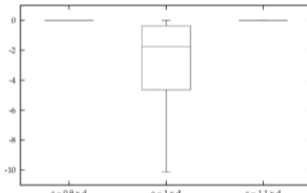
e) Ceza maliyeti – Esnek olmayan ile Tam esnek



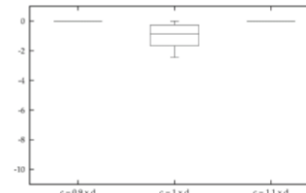
f) Ceza maliyeti – İkili zincir ile Tam esnek



g) Üretim kapasitesi – Esnek olmayan ile İkili zincir

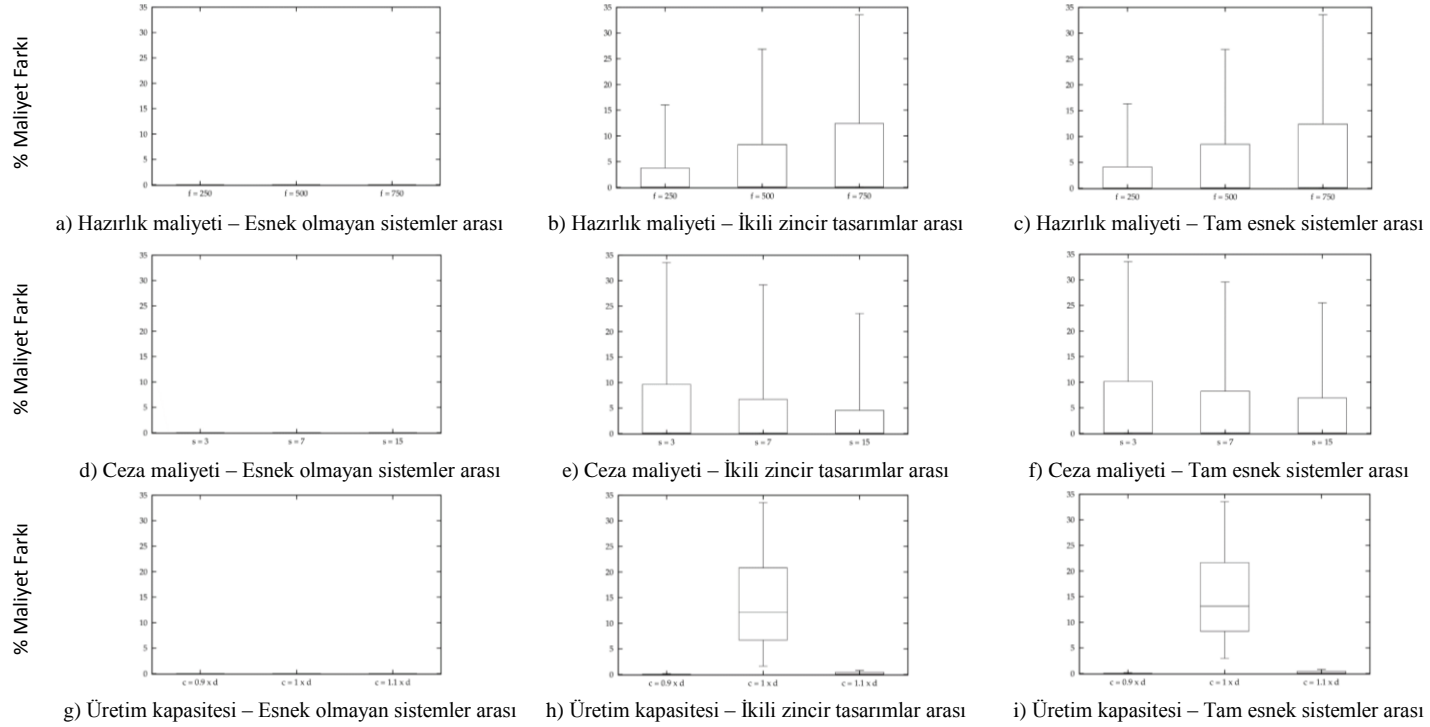


h) Üretim kapasitesi – Esnek olmayan ile Tam esnek



i) Üretim kapasitesi – İkili zincir ile Tam esnek

**Şekil 4. Sabit Üretim Hazırlık Maliyetinin Üretim Sistemlerinin Performansına Etkisinin Değerlendirilmesi**



### 3.2.3. Sabit Üretim Hazırlık Maliyetini Dikkate Almanın Üretim Sistemlerinin Performansına Etkisinin Değerlendirilmesi

Bu bölümde üç farklı üretim sisteminde (esnek olmayan, ikili zincir tasarımı ve tam esnek) sabit üretim hazırlık maliyetini dikkate almanın toplam maliyete etkisinin değerlendirilmesi yapılmaktadır. Şekil 4, farklı sabit üretim hazırlık maliyeti, ceza maliyeti ve üretim kapasitesi durumları için toplamda 81 senaryoyu içeren üretim sistemleri arası kıyaslama sonuçlarını sunmaktadır.

Tüm senaryolar için esnek olmayan üretim sistemleri için sabit üretim hazırlık maliyetini dikkate almanın toplam maliyet açısından herhangi bir faydası olmadığı görülmektedir (bkz. Şekil 4a, 4d, 4g). Bu durum, elbette kısıtlı üretim kapasitelerinin bir sonucudur; üretim kapasitelerinin yüksek olması durumunda sistem her dönem üretim yapmamayı da tercih edebilir. Ancak, ikili zincir tasarımı ve tam esnek üretim sistemlerinde sabit üretim hazırlık maliyetini üretim kararlarının verilmesinde dikkate almak çoğu durumda toplam maliyet açısından avantaj sağlamıştır.

İkili zincir tasarımı ve tam esneklik üretim sistemlerinde sabit üretim hazırlık maliyeti arttıkça bunu dikkate almamanın, doğal olarak, toplam maliyeti olumsuz etkilediği görülmektedir (bkz. Şekil 4b, 4c). Ayrıca birim ceza maliyetinin yüksek olması, sabit üretim hazırlık maliyetini dikkate almanın sağladığı avantajın artmasına neden olmaktadır (bkz. Şekil 4e, 4f). Ceza maliyetleri yüksek olduğunda, stoksuz kalma durumunu önlemek için sistem süreç esnekliğini daha yoğun biçimde kullanmaya çalışmakta, sabit üretim hazırlık maliyeti dikkate alınmadığında bu durum yüksek maliyetlerle sonuçlanmaktadır.

Üretim kapasitesi açısından bakıldığında, ikili zincir tasarımı ve tam esnek üretim sistemlerinde üretimi kapasitesinin ortalama talepten az veya çok olduğu durumlarda sabit üretim hazırlık maliyetini dikkate almanın ciddi bir avantaj sağlamadığı gözlemlenmektedir. Bunun sebebi, bu senaryolarda süreç esnekliğinin zaten kullanılmıyor olmasıdır. Buna karşın süreç esnekliğinin etkin biçimde kullanıldığı, üretim kapasitesinin sıkı (ortalama talebe eşit) olduğu durumlarda sabit üretim hazırlık maliyetini dikkate almanın toplam maliyetleri azaltma konusunda fayda sağladığı görülmektedir (bkz. Şekil 4h, 4i).

## SONUÇ VE TARTIŞMA

Bu çalışmada süreç esnekliğine sahip sistemlerde stok kararlarının verilmesi için sabit üretim hazırlık maliyetlerini dikkate alan bir karar destek modeli sunulmuş ve sabit üretim hazırlık maliyetlerinin süreç esnekliğinde stok kararlarına etkisi araştırılmıştır. Bu çerçevede süreç esnekliği problemi sabit üretim hazırlık maliyeti göz önünde bulundurularak, MILP yöntemiyle modellenmiştir. Geliştirilen bu karar destek

modeli kullanılarak esnek olmayan, ikili zincir tasarımı ve tam esnek olmak üzere üç farklı üretim sistemi üzerinde değerlendirmeler yapılmıştır. Söz konusu problem için toplamda üç farklı sabit üretim hazırlık maliyeti, üç farklı birim ceza maliyeti, üç farklı talep ortalaması ve üç farklı kapasite oranı olmak üzere 81 (3 x 3 x 3 x 3) senaryo oluşturulmuştur. Sonuçların daha da genellenebilir olması amacıyla, her bir senaryo için ilgili talep ortalamaları dikkate alınarak 30 farklı örnek incelenmiştir.

Çalışmanın bulgularında süreç esnekliği probleminde sabit üretim hazırlık maliyetinin dikkate alındığı durumda her bir üretim sistemi için farklı senaryolarda karşılaşılan toplam maliyetler sunulmuştur. Buna ek olarak, süreç esnekliği probleminde ilgili üretim sistemleri için sabit üretim hazırlık maliyetini dikkate almamanın maliyetleri ortaya konulmuştur. Süreç esnekliğinin varlığı durumunda, mevcut literatürde ilgili problem için sunulan sabit üretim hazırlık maliyetini dikkate almayan karar destek modelinin, bu çalışmada sunulan sabit üretim hazırlık maliyetini dikkate alan modele göre oldukça kötü performans sergilediği gözlemlenmektedir. Sonuçlardan anlaşıldığı üzere süreç esnekliği ceza ve elde bulundurma maliyetlerinin düşürülmesinde oldukça etkili olmakla beraber, sabit sipariş maliyetleri göz ardı edildiğinde işletmenin katlanması gereken toplam maliyet önemli ölçüde artabilmektedir. Bu sonuçlar süreç esnekliği problemi için geliştirilen karar destek modellerinde sabit üretim hazırlık maliyetinin göz önünde bulundurulmasının gerekliliğini ortaya çıkarmaktadır.

Yapılan değerlendirmeler sonucunda sabit üretim hazırlık maliyetinin bulunduğu süreç esnekliği probleminde ikili zincir tasarımı ile tam esnek üretim sistemlerinin toplam maliyet açısından birbirine yakın performans gösterdiği gözlemlenmiştir. Bu sonuçlar ışığında, tam esnek üretim sistemi kurmanın maliyeti göz önünde bulundurulduğunda, bazı durumlar için ikili zincir tasarımının yeterli olabileceği görülmektedir. Bu çalışmada geliştirilen model, karar vericilere farklı problemlerde değişik üretim sistemlerinin maliyetler açısından kıyaslanmasına imkân sağlamaktadır.

İncelenen problemde sabit üretim hazırlık maliyetlerinin ürünler arası geçişlerden bağımsız olduğu kabul edilmektedir. Ancak bazı gerçek hayat problemlerinde, hazırlık maliyetlerinin ürün üretim sırasına bağımlı olabileceği bilinmektedir. Dolayısıyla, gelecek çalışmalarda süreç esnekliği probleminde sıra bağımlı sabit hazırlık maliyetleri göz önünde bulundurulabilir.

## NOTLAR

<sup>1</sup> Her bir parametre için Bölüm 3.1 Deney Tasarımın bölümünde tanıtılan alternatiflerden orta değerler seçilmiştir.

## KAYNAKÇA

- Akbalik, A., B. Penz, C. Rapine (2015), "Capacitated Lot Sizing Problems with Inventory Bounds", *Annals of Operations Research*, 229(1), 1-18.
- Andreou, S.A. (1990), "A Capital Budgeting Model for Product-Mix Flexibility", *Manufacturing and Operations Management*, 3(1), 5-23.
- Axsäter, S. (2006), *Inventory Control (Vol. 90)*, Springer Science & Business Media, New York, USA.
- Baker, K.R., P. Dixon, M.J. Magazine, E.A. Silver (1978), "An Algorithm for the Dynamic Lot-Size Problem with Time-Varying Production Capacity Constraints", *Management Science*, 24(16), 1710-1720.
- Browne, J., D. Dubois, K. Rathmill, S.P. Sethi, K.E. Stecke (1984), "Classification of Flexible Manufacturing Systems", *The FMS magazine*, 2(2), 114-117.
- Chao, X., B. Yang, Y. Xu (2012), "Dynamic Inventory and Pricing Policy in a Capacitated Stochastic Inventory System with Fixed Ordering Cost", *Operations Research Letters*, 40(2), 99-107.
- Chen, H.D., D.W. Hearn, C.Y. Lee (1994), "A New Dynamic Programming Algorithm for the Single Item Capacitated Dynamic Lot Size Model", *Journal of Global Optimization*, 4(3), 285-300.
- Chou, M.C., C.P. Teo, H. Zheng (2008), "Process Flexibility: Design, Evaluation, and Applications", *Flexible Services and Manufacturing Journal*, 20, 59-94.
- Çimen, M., S. Belbağ (2015), "Süreç Esnekliği Varsayımı Altında Stokastik Stok Optimizasyonu Probleminin Dinamik Programlama ile Çözümü", *Gazi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi*, 17(3), 255-270.
- Çimen, M., S. Belbağ, M. Soysal (2016), "Üretimde Esneklik ve Stok Yönetimi: Stok Optimizasyonu İçin Bir Karar Destek Modeli", *İşletme Araştırmaları Dergisi*, 8(1), 360-379.
- Çimen, M., C. Kirkbride (2017), "Approximate Dynamic Programming Algorithms for Multidimensional Flexible Production-Inventory Problems.", *International Journal of Production Research*, 55(7), 2034-2050.
- Dennis, Z.Y., S.Y. Tang, J. Niederhoff (2011), On the Benefits of Operational Flexibility in a Distribution Network with Transshipment. *Omega*, 39(3), 350-361.
- Diaby, M., H.C. Bahl, M.H. Karwan, S. Zionts (1992), "A Lagrangean Relaxation Approach for Very-Large-Scale Capacitated Lot-Sizing", *Management Science*, 38(9), 1329-1340.
- Fine, C.H., R.M. Freund (1990), "Optimal Investment in Product-Flexible Manufacturing Capacity", *Management Science*, 36 (4), 449-466.

- Gallego, G., A. Scheller-Wolf (2000), "Capacitated Inventory Problems with Fixed Order Costs: Some Optimal Policy Structure", *European Journal of Operational Research*, 126(3), 603-613.
- Gustavson, Sten-Olof (1984), "Flexibility and Productivity in Complex Production Processes", *International Journal of Production Research*, 22(5), 801-808.
- He, P., Z. Chen, X. Xu (2011), "On Flexibility Investment in Manufacturing System: A Multi-Objective Decision Making Method", *Expert Systems with Applications*, 38(9), 11813-11819.
- Jaikumar, R. (1984), "Flexible Manufacturing Systems: A Managerial Perspective", *Harvard Business School*, (Boston, MA),
- Jain, A., P.K. Jain, F.T.S. Chan, S. Singh (2013), "A Review on Manufacturing Flexibility", *International Journal of Production Research*, 51(19), 5946–5970.
- Jordan, W.C., S.C. Graves (1995), "Principles on the Benefits of Manufacturing Process Flexibility", *Management Sciences*, 41(4), 577- 594.
- Kleintje-Ell, F., G.P. Kiesmüller (2015), "Cost Minimising Order Schedules for a Capacitated Inventory System", *Annals of Operations Research*, 229(1), 501-520.
- Mandelbanm, M., J. Buzacott (1986), "Flexibility and Its Use: A Formal Decision Process and Manufacturing View", Stecke, K.E. & Suri, R (der.) *Proceedings of the Second ORSA/TIMS Conference on FMS (Ann Arbor, MI)*, Elsevier, Amsterdam, 119-130.
- Özer, Ö., W. Wei (2004), "Inventory Control with Limited Capacity and Advance Demand Information", *Operations Research*, 52(6), 988-1000.
- Porteus, E.L. (1985), "Investing in Reduced Setups in The EOQ Model", *Management Science*, 31(8), 998-1010.
- Rao, U.S., J.M. Swaminathan, J. Zhang (2004), "Multi-Product Inventory Planning with Downward Substitution, Stochastic Demand and Setup Costs", *IIE Transactions*, 36(1), 59-71.
- Sethi, A.K., S.P. Sethi (1990), "Flexibility in Manufacturing: A Survey", *The International Journal of Flexible Manufacturing Systems*, 2, 289-328.
- Shaoxiang, C. (2004), "The Infinite Horizon Periodic Review Problem with Setup Costs and Capacity Constraints: A Partial Characterization of the Optimal Policy", *Operations Research*, 52(3), 409-421.
- Shaw, D.X., A.P. Wagelmans (1998), "An Algorithm for Single-Item Capacitated Economic Lot Sizing with Piecewise Linear Production Costs and General Holding Costs", *Management Science*, 44(6), 831-838.
- Shi, C., H. Zhang, X. Chao, R. Levi (2014), "Approximation Algorithms for Capacitated Stochastic Inventory Systems with Setup Costs", *Naval Research Logistics (NRL)*, 61(4), 304-319.
- Son, Y.K., C.S. Park (1987), "Economic Measure of Productivity, Quality and Flexibility in Advanced Manufacturing Systems", *Journal of Manufacturing Systems*, 6(3), 193-207.
- Waters, D. (2003), *Inventory Control and Management*, John Wiley & Sons, Chichester, England.