

## SÜREÇ ESNEKLİĞİ SİSTEMLERİNDE OPERASYONEL MALİYETLERE DAYALI SİSTEM TASARIMI OPTİMİZASYONU

Merve İBİŞ<sup>1</sup>, Mustafa ÇİMEN<sup>2</sup>, Mehmet SOYSAL<sup>3</sup>

### ÖZET

**Amaç:** Bu çalışma, süreç esnekliği varsayımında farklı esneklik yapılarının işletmelerde üretim-envanter kararlarını ve ilgili operasyonel maliyetleri nasıl etkilediğini incelemektedir. Çalışmanın amacı, süreç esnekliği probleminde optimal sistem tasarımı kararlarının bulunması ve bu kararların envanter maliyetleriyle ilişkisinin incelenmesidir.

**Yöntem:** Çalışma kapsamında; planlama ufku boyunca envanter maliyetlerini ve esneklik yatırımlarının amortismanını içeren problem, karma tam sayılı doğrusal programlama ile modellenerek çözülmüştür.

**Bulgular:** Sunulan model kullanılarak, optimum envanter, üretim ve sistem tasarımı kararları verilmiştir ve planlama ufku boyunca karşılık gelen maliyetler hesaplanmıştır. Yapılan analizler çalışmada sunulan modelden elde edilen optimal tasarımın, literatürde geleneksel esneklik tasarımları içerisinde en düşük ortalama maliyetleri sağlayan ikili zincir tasarımından dâhi daha iyi sonuç verdiğini göstermiştir.

**Özgünlük:** Bildiğimiz kadarıyla, bu çalışma literatürde envanter ve yatırım maliyetlerini içeren ve optimal esneklik tasarımlarını operasyonel maliyetler açısından değerlendiren ilk çalışmadır.

**Anahtar Kelimeler:** Sistem Tasarımı, Karma Tam Sayılı Doğrusal Programlama, Süreç Esnekliği, Operasyonel Maliyetler.

**JEL Kodları:** C02, C44, C52, C61, D24.

## SYSTEM DESIGN OPTIMIZATION BASED ON OPERATIONAL COSTS IN PROCESS FLEXIBILITY SYSTEMS

### ABSTRACT

**Purpose:** This study examines how different flexibility structures affect production-inventory decisions and related operational costs in enterprises. The aim of the study is to find the optimal system design decisions in the process flexibility problem and to examine the relationship between these decisions and inventory costs.

**Methodology:** We propose a mixed integer linear programming model, which includes inventory costs and depreciation of flexibility investments across the planning horizon.

**Findings:** In this model, optimum inventory, production, and system design decisions are made and corresponding costs are calculated over the planning horizon. The analyzes show that the model presented in the study gives even better results than the two-chain design, which provides the lowest average costs among the traditional flexibility designs in the literature.

**Originality:** To the best of our knowledge, this is the first study to evaluate optimal flexibility designs in terms of operational costs, including inventory and investment costs.

**Keywords:** System Design, Mixed Integer Linear Programming, Process Flexibility, Operational Costs.

**JEL Codes:** C02, C44, C52, C61, D24.

<sup>1</sup> Arş. Gör., Başkent Üniversitesi, İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi, İşletme Bölümü, Ankara, Türkiye, merveibis@baskent.edu.tr, 0000-0001-8623-290X (Sorumlu Yazar-Corresponding Author).

<sup>2</sup> Dr. Öğr. Üyesi, Hacettepe Üniversitesi, İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi, İşletme Bölümü, Ankara Türkiye, mcimen@hacettepe.edu.tr, 0000-0001-8155-9145.

<sup>3</sup> Doç. Dr., Hacettepe Üniversitesi, İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi, İşletme Bölümü, Ankara, Türkiye, mehmetsoysal@hacettepe.edu.tr, 0000-0002-1570-660X.

## 1.GİRİŞ

Teknolojik gelişmeler, çevresel koşulların ve müşteri ihtiyaçlarının hızla değişmesine, dolayısıyla talebin tahmin edilebilirliğinin azalmasına yol açmaktadır. Bu durumda şirketlerin müşteri ihtiyaçlarına zamanında cevap verebilmeleri rakiplerine karşı önemli bir rekabet avantajı sağlar. Üretici firmalar sürekli değişen çevreye hızlı bir şekilde yanıt verebilmek için üretimde esneklikten faydalanabilirler (He ve diğerleri, 2012). Bununla birlikte, gerekli olan uygun esneklik seviyesini bilmek esneklikten tam olarak faydalanabilmek için önemlidir (Baykasoğlu ve Durmuşoğlu, 2012).

Esneklik, bir sistemin değişime zaman, emek, maliyet veya performans açısından küçük maliyetlerle tepki verebilmesidir (Upton, 1994). Literatürde makine esnekliği, süreç esnekliği, ürün esnekliği, üretim esnekliği gibi farklı esneklik türlerinden bahsedilmektedir (Sethi ve Sethi, 1990). Bu çalışmada ele alınan süreç esnekliği, bir üretim tesisinin birden fazla ürünü ek operasyonel hazırlık maliyetleri olmadan üretebilme yeteneği (bir tesisle birden fazla ürün arasında bağlantı olması) olarak tanımlanmıştır (Jordan ve Graves, 1995). Literatürde genellikle tam esneklik (full flexibility) ve kısmi esneklik (limited flexibility) olmak üzere iki temel süreç esnekliği üzerinde çalışılmıştır.

Tam esneklik, mevcut tesislerin bütün ürün çeşitlerini üretebildiği sistemler için kullanılır. Kısmi esneklik kullanılan sistemlerde ise en az bir tesiste birden fazla ürün çeşidinin üretebildiği varsayılır. Tablo 1'de beş tesis ve beş üründen oluşan bir üretim sistemindeki farklı esneklik yapıları gösterilmektedir. İlk yapı her tesiste sadece bir ürünün (tesis kendi ürünü) üretebildiği esnek olmayan sistemi (dedicated design), ikinci yapı her tesisin iki ürün üretebildiği kısmi esnekliği ve üçüncü yapı ise tesislerin tüm ürünleri üretebildiği tam esnek yapıyı göstermektedir.

**Tablo 1. Beş tesis ve beş üründen oluşan bir üretim sisteminde farklı esneklik yapıları**

<i>Esnek Olmayan Sistem</i>		<i>Kısmi Esnek Sistem</i>		<i>Tam Esnek Sistem</i>	
<i>Tesisler</i>	<i>Üretilen Ürünler</i>	<i>Tesisler</i>	<i>Üretilen Ürünler</i>	<i>Tesisler</i>	<i>Üretilen Ürünler</i>
F1	P1	F1	P1, P2	F1	Bütün Ürünler
F2	P2	F2	P2, P3	F2	Bütün Ürünler
F3	P3	F3	P3, P4	F3	Bütün Ürünler
F4	P4	F4	P4, P5	F4	Bütün Ürünler
F5	P5	F5	P5, P1	F5	Bütün Ürünler

Literatürde süreç esnekliği ile ilgili genellikle siparişe göre üretim yapan işletmeler üzerine çalışmalar yapılmıştır (Valeva ve diğerleri, 2017). Ancak, işletmeler talebe zamanında cevap verebilmek için ya da oluşabilecek darboğazlara karşı stoka üretim de yapmaktadırlar. Süreç esnekliği stoka üretim yapılan sistemlere entegre edildiğinde, bir tesiste birden fazla ürün üretebilmesi varsayımı envanter kararlarını oldukça zorlaştırmaktadır (Soysal ve Çimen, 2017). Süreç esnekliği, her bir tesiste verilecek üretim kararlarını birbiriyle ilişkilendirir ve bu durum karmaşık bir karar problemi oluşturur.

Literatürdeki benzer çalışmalar incelendiğinde, üretim sürecindeki riskleri en aza indirmek için kullanılan stratejilerden olan süreç esnekliği ve envanter kararların birlikte incelendiği çalışma sayısının kısıtlı olduğu gözlemlenmiştir. Sabit üretim maliyetlerinin ve farklı talep yapılarının esneklik ve envanter kararlarına etkisinin incelendiği çalışmalar az sayıdaki örnekler arasında yer almaktadır (Soysal ve diğerleri, 2018; Soysal ve Çimen, 2017). Feng ve Shen (2018) çalışmasında tek dönemlik talep ile üretim- envanter sistemlerinde süreç esnekliğini araştırmıştır. Benzer şekilde Simchi ve diğerleri (2018) ise süreç esnekliği ve envanter stratejilerinin birlikte kullanıldığı hibrit sistemleri incelemek için iki aşamalı bir model geliştirmiştir. Tüm çalışmalar göz önüne alındığında, üretim-envanter sistemlerinde süreç esnekliği kullanarak sistem tasarımı kararlarının esneklik yatırım maliyetleri, üretim-envanter maliyetleri ile talep kaçırma maliyetlerine etkilerinin incelendiği bir çalışmaya rastlanmamıştır.

İşletmelerin süreç esnekliğinden faydalanması önemli oranda rekabet avantajı sağlamakla beraber yatırım, üretim ve envanter kararlarının verilmesini ise oldukça zorlaştırmaktadır. Literatür araştırmasında incelenen bazı çalışmalar geleneksel sistem tasarımlarının üretim performansı açısından her zaman en iyi sonuç vermediğini göstermektedir (Desir ve diğerleri, 2016, Fiorotto ve diğerleri, 2018). Sisteme en uygun esneklik tasarımının bulunmasının ardından talepler ve tesis kapasiteleri dikkate alınarak her bir tesiste hangi üründen ne miktarda üretileceği kararının verilmesi de işletmeler için oldukça karmaşık bir sorun haline gelmektedir. Ayrıca her bir tesiste üretilen ürün ve miktarı diğer tesislerde üretilen ürün miktarlarını da etkilemektedir. Tüm bunlar göz önünde bulundurulduğunda ele alınan problemin çok boyutlu bir problem olduğu ve firmalar için zorlu ve önemli kararları içerdiği sonucuna ulaşılabilir.

Üretimde verimlilik kavramı belirli bir miktar girdi ile daha fazla üretimin yapılması veya belirli bir çıktının daha az girdi ile elde edilmesi olarak tanımlanabilir (Rogers, 1998). Buna ek olarak, üretimde verimlilik artışı teknolojik ve teknik değişiklikler nedeniyle çıktıdaki net değişiklik olarak ifade edilebilir. Süreç esnekliğinin,

esnek olmayan sistemlere nazaran çeşitli performans kriterleri açısından verimliliği daha yüksek sistemlere zemin hazırladığı literatürde çeşitli çalışmalarda ifade edilmiştir (Jordan ve Graves, 1995, Çimen ve Kirkbride, 2017). Ancak süreç esnekliğine yapılan yatırımın kendisi için de işletmelerin yüksek verimliliği hedeflemeleri kaçınılmazdır. Bu bağlamda, süreç esnekliğine yapılan yatırımlarla (girdi) daha düşük envanter maliyetlerinin elde edilmesi (çıktı), süreç esnekliğinin verimliliğinin yüksek olduğu anlamına gelecektir.

Bu çalışmanın hedefi, yatırım amortismanları ve envanter maliyetlerini en küçükleyen sistem tasarımı kararlarının ve bu kararlarla uyumlu üretim-envanter kararlarının bulunması, başka bir ifadeyle verimliliği en yüksek süreç esnekliği tasarımının ve bu tasarımın verimliliğini eniyileyecek çok dönemli operasyonel kararların bulunması olarak da tanımlanabilir. Çalışmada stok tutabilen işletmelerde her bir üretim tesisinde hangi ürünlerin üretilebileceğine ilişkin yatırım kararları ve yapılan yatırımlar neticesinde periyodik olarak her bir tesiste her bir ürünün üretim miktarı kararları incelenecektir.

Çalışmanın geri kalan kısmı şu şekildedir: İkinci bölümde ilgili probleme ilişkin literatür incelenmiştir. Üçüncü bölüm problem tanımını ve önerilen matematiksel modeli içermektedir. Dördüncü bölümde sistem tasarımı kararları ve bu kararlar ile operasyonel maliyetler arasındaki ilişkilerin incelendiği sayısal analizler sunulmuştur. Son bölümde, çalışmaya ait sonuçlar ortaya koyularak gelecekteki çalışmalar için öneriler sunulmuştur.

## 2. LİTERATÜR TARAMASI

Upton (1994) esnekliği bir sistemin zaman, çaba veya masrafta küçük bir maliyet ile değişime tepki verme yeteneği olarak tanımlamıştır. Aynı zamanda esnekliğin, üretim sistemi performansı üzerinde de olumlu bir etkiye sahip olduğu bilinmektedir (Baykasoğlu ve Özbakır, 2008). Sethi ve Sethi (1990) üretimde esneklik konusuyla ilgili geniş bir literatür taraması sunmuştur. Üretimde süreç esnekliği ise bir firmanın farklı tesisler ya da kaynaklar kullanarak, farklı ürün üretebilme yeteneği olarak tanımlanmıştır (Chou ve diğerleri, 2014). Jordan ve Graves'in (1995) makalesi süreç esnekliği literatüründeki en önemli çalışmalardan biridir. Bu makalede süreç esnekliğinde kısmi esneklikten ilk defa bahsedilmiştir. Kısmi esnekliğin tam esneklik tasarımının neredeyse tüm faydalarını sağlayabildiği Zincir Tasarımı (Chaining Design) fikrini öne sürmüştür. Bu tasarıma göre  $N$  adet tesis sırasıyla kendisinden sonraki tesiste üretilen en az bir ürünü üretebilmektedir. Jordan ve Graves, bu şekilde tesisler arasında mümkün olduğu kadar uzun bir zincir kurmanın sistemin toplam performansını artıracaklarını öne sürmektedir. Bu zincir boyunca her tesisin  $k$  adet ürün ürettiği tasarımlar " $k$ 'lı zincir tasarımı" (ikili zincir tasarımı, üçlü zincir tasarımı vs.) olarak adlandırılmaktadır. Tablo 1'de ikinci sırada temsil edilen sistem yapısı bir ikili zincir tasarımıdır.

Kısmi esneklik farklı varsayımlar altında ve farklı çözüm yöntemleri kullanılarak çalışılmıştır. Chou ve diğerleri (2008) "kısmi esnekliğin sistemin performansını önemli ölçüde artırabildiği" varsayımının doğruluğunu iki aşamalı programlama modeline dayanarak göstermiştir. Chou ve diğerleri (2014) talepteki belirsizliklerle başa çıkabilmek için iki farklı strateji olan süreç esnekliğini ve üretim ertelemesini birlikte incelemiştir. Chou ve diğerleri (2011) tam esneklik tasarımının sağladığı faydaya yakın performans sağlayan esneklik tasarımını bulabilmek için basit ve uygulanabilir bir sezgisel sunmuştur.

Jordan ve Graves'in ortaya koyduğu uzun zincir tasarımı tüm varsayımlar altında optimal sonuç vermeyebilir. Desir ve diğerleri (2016) bu durumu deneysel analizler yaparak göstermiştir. Fiorotto ve diğerleri (2018) maliyetler açısından, uzun zincir tasarımının kapasite seviyesinin yeterli olduğu ve homojen senaryolar için tam esnekliğin neredeyse tüm faydalarını elde ettiğini kanıtlamıştır. Fakat kapasite seviyesinin az olduğu ve homojen olmadığı varsayımı altında uzun zincir tasarımının optimal performans göstermediğini ortaya koymuştur.

Üretimde süreç esnekliği kullanımı ve stok üzerine üretim yapmak talep belirsizliği ile başa çıkabilmenin ve tedarik zincirindeki olası riskleri azaltmanın temel stratejilerindendir (Simchi ve diğerleri, 2018). Literatürde bu iki yöntemi bir arada inceleyen çalışma sayısı kısıtlıdır. Çimen ve Belbağ (2016) çalışmasında süreç esnekliği ve kapasite kısıtı varsayımı altında stok optimizasyonu problemini Markov Karar Süreci olarak modellemiş ve Dinamik Programlama yöntemi kullanarak çözmüştür. Soysal ve Çimen (2017) süreç esnekliğine sahip sistemlerde üretilen ürünler için farklı talep yapılarının (durağan, artan, azalan, hareketli) envanter maliyetlerine etkisini incelemiştirlerdir. Analizler sonucunda talep yapılarındaki değişikliğin fabrikaların süreç esnekliğinden faydalanma oranlarını önemli ölçüde etkilediğini ortaya koymuşlardır. Feng ve Shen (2018) esnek üretim sistemlerinde tek dönemli stok ve üretim kararları üzerine bir çalışma yapmışlardır. Bir esneklik problemini üretim envanter sistemiyle genişleterek stok üzerine çalışan işletmelerde süreç esnekliğinin ne şekilde kullanılması gerektiğine odaklanmışlardır. Simchi ve diğerleri, (2018) süreç esnekliği ve envanter arasındaki ilişkiyi iki aşamalı bir optimizasyon problemi olarak modellemiştir. Kaminsky ve Wang (2019) ise süreç esnekliği ve envanter tutma kabiliyetlerinin ikame

olduğunu gösteren bir çalışma ortaya koymuştur. Tablo 2'de süreç esnekliği literatüründe sistem tasarımlarını inceleyen makaleler özetlenmiştir.

**Tablo 2. Literatürde sistem tasarımları üzerine yapılan çalışmalar**

Makaleler	Çözüm Yöntemi	Planlama Ufku		Amaç Fonksiyonu
		Tek Dönemli	Çok Dönemli	
Jordan ve Graves (1995)	LP	*		Minimum Talep Kaçırma
Graves ve Tomlin (2003)	LP	*		Minimum Talep Kaçırma
Chou ve diğerleri (2008)	S	*		Maksimum Akış
Mak ve Shen (2009)	LP	*		Maksimum Kar
Chou ve diğerleri (2010)	LP	*		Maksimum Akış
Chou ve diğerleri (2011)	S	*		Maksimum Fayda
Simchi-Levi ve Wei (2012)	LP	*		Maksimum Satış
Chou ve diğerleri (2014)	LP	*		Minimum Talep Kaçırma
Simchi-Levi ve Wei (2015)	LP	*		En Kötü Durum Analizi
Desir ve diğerleri (2016)	LP	*		Maksimum Akış
Çimen ve Belbağ (2016)	DP		*	Minimum Maliyet
Soysal ve Çimen (2017)	LP		*	Minimum Maliyet
Fiorotto ve diğerleri (2018)	LP		*	Minimum Maliyet
Feng ve Shen (2018)	LP	*		Minimum Maliyet
Çimen ve Kirkbride (2017)	DP		*	Minimum Maliyet
Soysal ve diğerleri (2018)	LP		*	Minimum Maliyet
Simchi-Levi (2018)	LP	*		Minimum Maliyet
Kaminsky ve Wang (2019)	LP	*		Maksimum Akış

LP: Doğrusal Programlama, DP: Dinamik Programlama, S: Sezgisel.

Literatür taraması sonucunda süreç esnekliği literatüründe üretim-envanter optimizasyonu yapılan çalışmalar arasında sistem tasarımını envanter maliyetleri açısından optimize eden bir çalışma bulunmadığı görülmüştür. Bu çalışmanın amacı, süreç esnekliği probleminde optimal sistem tasarımı kararlarının bulunması ve bu kararların envanter maliyetleriyle ilişkisinin incelenmesidir. Optimal sistem tasarımı kararları, üretilebilecek ürün miktarını ve envanter kararlarını doğrudan etkileyecektir. Bu çalışmada sunulacak sayısal analizler sistem tasarımı kararlarının, operasyonel maliyetlere ve yatırım amortisman maliyetlerine etkisini incelemek ve süreç esnekliği için yatırım yapacak olan karar vericilere, yapılacak olan yatırımın karşılığı ile ilgili fikir vermek amaçlarını taşımaktadır.

### 3. SÜREÇ ESNEKLİĞİ PROBLEMİ VE DOĞRUSAL PROGRAMLAMA MODELİ

Bu makalede ele alınan süreç esnekliği tasarımı probleminde  $F$  adet tesis ve  $P$  adet ürün çeşidi bulunmaktadır. Gerekli yatırımlar yapıldığı takdirde tesislerin her birinde birden fazla ürün, her ürün de birden fazla tesiste üretilebilmektedir.  $T$  dönemli sonlu planlama ufku ve deterministik talep varsayımları bulunmaktadır.

Bir tesiste üretilen ürün miktarı üretim tesislerinin kapasiteleri ile sınırlıdır. Tesislerde birim üretim, birim elde bulundurma, birim ceza ve bağlantı ekleme yatırım amortisman maliyetleri ile karşılaşılmaktadır. Birim üretim maliyeti bir birim ürünü üretebilmek için katlanılan maliyettir. Birim maliyet her bir ürün-tesis çifti için farklı olabilir. Birim elde bulundurma maliyeti dönem sonunda elde kalan ürünler için katlanılan stok maliyetleridir. Birim ceza maliyeti dönem sonunda stoksuz kalındığı için karşılanamayan talep miktarının oluşturduğu maliyettir. Bağlantı ekleme maliyeti ise her bir tesiste esnekliği artırabilmek (tesiste üretilebilecek ürün çeşidi sayısı) için katlanılan yatırımın dönemsel amortisman maliyetleridir. Üretim maliyeti her bir tesiste üretilen ürün miktarıyla, elde bulundurma maliyeti her bir ürün için tutulan stok miktarıyla, ceza maliyeti dönem sonunda kaçırılan talep miktarıyla ve bağlantı ekleme maliyeti bir tesiste üretilebilen ürün çeşidi sayısı ile doğru orantılıdır. Tablo 3'te buradan itibaren kullanılacak olan notasyon bilgileri verilmiştir.

**Tablo 3. Çalışmada kullanılan notasyonlar**

Sembol	Açıklama	Birim
<b>Kümeler ve Parametreler</b>		
$F$	Tesis kümesi $F = \{1,2 \dots  F\}$	
$P$	Ürün kümesi $P = \{1,2 \dots  P\}$	
$T$	Planlama ufku $T = \{1,2 \dots  T\}$	
$B$	Bağlantı sayısı $B = \{1,2 \dots  B\}$	
$u_{fp}$	Birim üretim maliyeti	TL / adet
$h_p$	Birim elde bulundurma maliyeti	TL / adet
$s_p$	Birim ceza maliyeti	TL / adet
$l_b$	Fabrikalara bağlantı eklemenin yatırım amortisman maliyeti	TL / adet
$d_{p,t}$	$T$ döneminde $p$ ürünü için oluşan talep miktarı	Adet
$c_f$	$f$ tesisinin üretim kapasitesi kısıtı	Adet
$k_p$	$p$ ürününün dönem başında elde bulunan stok miktarı	Adet
<b>Karar Değişkenleri</b>		
$\gamma_{f,p}$	$p$ ürününün $f$ tesisinde üretilip üretilmediği, 0-1 değişkeni	
$\Omega_{f,b}$	$f$ tesisinde toplam $b$ adet bağlantı olup olmadığı, 0-1 değişkeni	
$Q_{f,p,t}$	$t$ döneminde $p$ ürününün $f$ tesisindeki üretim miktarı.	Adet
$\theta_{p,t}^-$	$p$ ürünü için $t$ dönemi sonunda karşılanamayan talep miktarı	Adet
$\theta_{p,t}^+$	$p$ ürünü için $t$ dönemi sonunda elde kalan stok miktarı	Adet
$\theta_{p,t}$	$p$ ürünü için $t$ döneminin başında stok miktarı	Adet

Bu çalışmada kısmi süreç esnekliği varsayımında ürün ve fabrikalar arasındaki ilişki karar değişkeni olarak ele alınacak ve böylece optimal üretim sistemi tasarımı kararı elde edilecektir. Bu şekilde kısmi esneklik tasarımlarının optimal üretim ve envanter kararlarına etkisi incelenecektir.  $T$  dönemli sonlu planlama ufkuна sahip problemimizde periyodik olarak her dönem başı için üretim hedefleri belirlenecektir. Çalışmada Çimen ve diğerleri (2016) tarafından süreç esnekliği problemi için sunulan doğrusal programlama modeli yukarıda bahsedilen varsayımlara göre uyarlanmıştır.

$$\min z = \left[ \sum_{t \in T} \left( \sum_{f \in F} \sum_{p \in P} u_{fp} Q_{fpt} + \sum_{p \in P} h_p \theta_{pt}^+ + \sum_{p \in P} s_p \theta_{pt}^- \right) + \sum_{f \in F} \sum_{b \in B} l_b \Omega_{fb} \right] \quad (1)$$

Kısıt setleri altında (subject to):

$$\theta_{pt}^+ \geq \sum_{f \in F} Q_{fpt} + \theta_{pt} - d_{pt} \quad \forall p \in P, t \in T \quad (2)$$

$$\theta_{pt}^- \geq d_{pt} - \sum_{f \in F} Q_{fpt} - \theta_{pt} \quad \forall p \in P, t \in T \quad (3)$$

$$\theta_{p0} = k_p \quad \forall p \in P \quad (4)$$

$$\theta_{pt+1} \geq \sum_{f \in F} Q_{fpt} + \theta_{pt} - d_{pt} \quad \forall p \in P, t \in T \quad (5)$$

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

$$Q_{fpt} \leq c_f \gamma_{fp} \quad \forall f \in F, t \in T, p \in P \quad (7)$$

$$\sum_{p \in P} \gamma_{fp} - 1 \leq B \Omega_{fb} \quad \forall f \in F, b \in B \quad (8)$$

$$Q_{fpt} \geq 0 \quad \forall f \in F, t \in T, p \in P \quad (9)$$

$$\theta_{pt}^+ \geq 0 \quad \forall t \in T, p \in P \quad (10)$$

$$\theta_{pt}^- \geq 0 \quad \forall t \in T, p \in P \quad (11)$$

$$\gamma_{fp} \in \{0,1\} \quad \forall f \in F, p \in P \quad (12)$$

$$\Omega_{fb} \in \{0,1\} \quad \forall f \in F, b \in B \quad (13)$$

Süreç esnekliği varsayımında optimal üretim ve envanter kararlarının verildiği model bir amaç fonksiyonu (Eşitlik 1) ve on kısıttan (Eşitlik 2-13) oluşmaktadır.

Amaç fonksiyonu (Eşitlik 1), üretim maliyeti, elde bulundurma maliyeti, ceza maliyeti ve yatırım maliyetlerinden oluşmaktadır. Envanter kararları ile ilgili kısıt setleri Eşitlik 2-5 ile ifade edilmiştir. Eşitlik 2

ile verilen kısıt seti her bir dönemde her bir ürün için elde bulundurulmuş envanter miktarını ve Eşitlik 3 ile verilen kısıtı ise yine her bir dönemde her bir ürün için karşılanamayan talep miktarını belirlemek için kullanılmıştır. Eşitlik 4 ile verilen kısıt ürünlerin planlama ufkunun başındaki envanter miktarını ifade etmek için kullanılmıştır. Eşitlik 5'te verilen kısıt ise her bir ürün için her dönem başındaki stok miktarını belirlemek için kullanılmaktadır.

Eşitlik 6 ile her bir tesisin ilgili dönemdeki üretim miktarı o tesisin kapasitesiyle sınırlandırılmıştır. Eşitlik 7 ile verilen kısıt belirlenen sistem tasarımlarının üretim kararlarına etkisini ifade etmektedir. Bu kısıt seti ile  $f$  tesisinde üretilecek  $p$  ürününün miktarı belirlenmektedir. Eşitlik 8 her bir  $f$  tesisinde toplam  $b$  adet bağlantı olup olmadığını belirlemektedir. Eşitlik 9-11 ile verilen kısıt setleri üretim, elde bulundurma ve kaçırılan talep miktarlarının pozitif olması gerektiğini ifade etmektedir. Eşitlik 12 ve 13 ise sistem tasarımıyla ilgili karar değişkenlerinin ikili değerler alabildiğini göstermektedir.

Çimen ve diğerleri (2016) tarafından sunulan doğrusal programlama modeli ise aşağıda belirtildiği üzere (Eşitlik 14) numaralı amaç fonksiyonu ve (Eşitlik 2-7 ve Eşitlik 9-12) numaralı kısıt setlerinden oluşmaktadır. Sunulan doğrusal programlama modelinden görüldüğü üzere Çimen ve diğerlerinin (2016) çalışmasında amaç fonksiyonunda bağlantı eklemenin yatırım amortisman maliyetleri ve optimal sistem tasarımı göz önünde bulundurulmamıştır:

$$\min z = \left[ \sum_{t \in T} \left( \sum_{f \in F} \sum_{p \in P} u_{fp} Q_{fpt} + \sum_{p \in P} h_p \theta_{pt}^+ + \sum_{p \in P} s_p \theta_{pt}^- \right) \right] \quad (14)$$

Kısıt setleri altında (subject to):

Kısıt seti (2-7)

Kısıt seti (9-12)

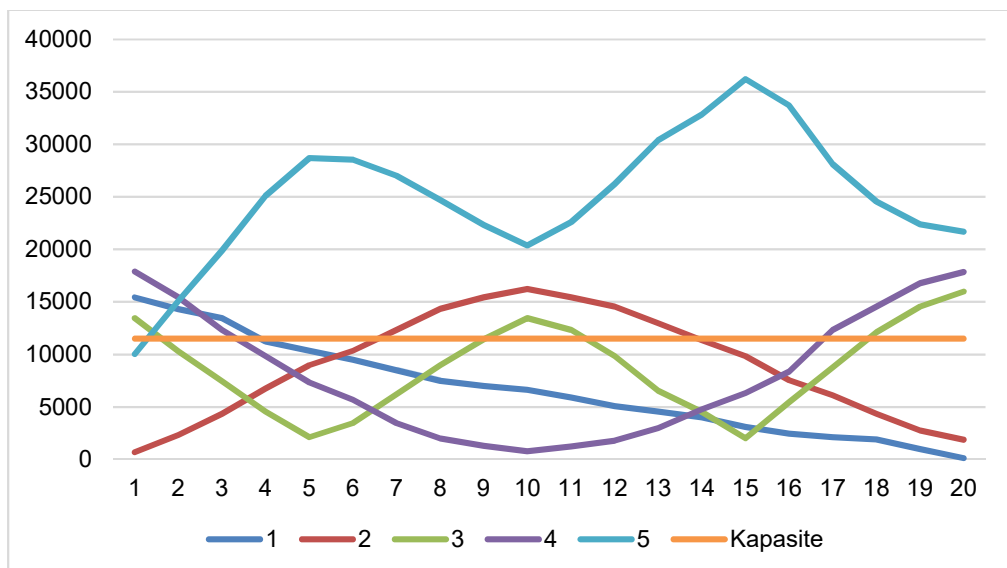
#### 4. SAYISAL ÇALIŞMA

Bu bölümde üretim, envanter ve sistem tasarımı kararları ile envanter maliyetleri arasındaki ilişkiler incelenmiştir. Çalışmanın bundan sonraki kısmında sayısal analiz için kullanılan deney tasarımı ile ilgili bilgi verilmiş ve sonuçlar tartışılmıştır.

##### 4.1. Deney Tasarımı

Sayısal çalışmada farklı parametrelerle 10.000 farklı problem çözülerek bir benzetim çalışması yapılmıştır. Kullanılan sistem 5 ürün ve 5 tesisden oluşmaktadır. Planlama ufku 20 dönemdir ve her dönem için talep miktarları planlama ufkunun başında bilinmektedir.

Problemimizde her bir ürün için farklı talep yapıları kullanılmıştır. Şekil 1'de her dönemde her bir ürüne ait talep yapılarının ortalama değerleri ( $\bar{d}$ ) sunulmuştur. Benzetimin her iterasyonunda bu talep yapıları rastgele olarak ürünlere atanmıştır. Ardından her ürün için talep miktarları, Tekdüze Dağılım kullanılarak, ortalama değerlerin  $\pm 100$  birim aralığında ( $unif(\bar{d} - 100, \bar{d} + 100)$ ) rastgele tam sayılardan oluşturulmuştur. Elde bulundurma, ceza ve bağlantı ekleme maliyetleri ise Tablo 4'te gösterildiği üzere Tekdüze Dağılım'dan çekilen rastgele tam sayı değerlerden oluşmaktadır.



Şekil 1. Ürünlerin talep yapıları grafiği

**Tablo 4. Parametrelerin aralık değerleri**

<i>Parametreler</i>	<i>Aralık Değerler</i>
Elde Bulundurma Maliyeti	<i>unif</i> (1, 15)
Ceza Maliyeti	<i>unif</i> (30, 150)
Birinci Bağlantıyı Ekleme Maliyeti	<i>unif</i> (15.000, 175.000)
İkinci Bağlantıyı Ekleme Maliyeti	<i>unif</i> (17.500, 200.000)
Üçüncü Bağlantıyı Ekleme Maliyeti	<i>unif</i> (20.000, 225.000)
Dördüncü Bağlantıyı Ekleme Maliyeti	<i>unif</i> (22.500, 250.000)

Her bir tesisin üretim kapasitesi, birim üretim maliyetleri ve dönem başı stok miktarı parametrelerinin tüm iterasyonlarda aynı olduğu kabul edilmiştir. Her ürün için planlama ufkunun başında başlangıç stoku bulunmadığı kabul edilmiştir. Her bir tesis için kapasite miktarı 11.500 birim olarak belirlenmiştir. Üretim maliyetleri ise her bir ürün-tesis çifti için farklılık gösterebilmektedir. Tablo 5'te tesislerdeki ürünlerin birim üretim maliyetleri sunulmaktadır.

**Tablo 5. Birim üretim maliyetleri (TL)**

	$P_1$	$P_2$	$P_3$	$P_4$	$P_5$
F1	10	10,5	11	11,5	12
F2	12	10	10,5	11	11,5
F3	11,5	12	10	10,5	11
F4	11	11,5	12	10	10,5
F5	10,5	11	11,5	12	10

Bu çalışmada planlama ufku boyunca hangi ürünün hangi tesiste ne kadar üretileceğinin ve tesislerde üretilebilecek ürünlerin kararı verilmektedir. Bu çerçevede farklı parametrelerden sistem esnekliğinin nasıl etkilendiği ve optimal sistem tasarımı kararının nasıl değiştiği analiz edilmiştir. Oluşturulan model, 10.000 iterasyonlu benzetimin her iterasyonunda Excel Open Solver Programı kullanılarak çözülmüş ve sonuçlar incelenmiştir.

#### 4.2. Örnek Olay İncelemesi

Çalışmanın bu bölümünde bir örnek olay incelemesi sunulmaktadır. Örnek olay sonuçları sistem tasarımı ve maliyetler (elde bulundurma, ceza, üretim ve bağlantı ekleme maliyetleri) açısından ele alınmıştır.

Tablo 6'da örnek olay için kullanılan maliyet parametrelerinin değerleri gösterilmektedir. Ürünlerin planlama ufku boyunca karşılaştıkları talep miktarları ise Ek 1'de sunulmuştur. Belirtilen parametrelerle çözülen modelin sonuçları Tablo 7'de sunulmuştur.

**Tablo 6. Örnek problem parametre değerleri**

<i>Parametreler</i>	<i>Değerler (TL)</i>
Birim Elde Bulundurma Maliyeti	9
Birim Ceza Maliyeti	64
Birinci Bağlantıyı Ekleme Maliyeti	31.633
İkinci Bağlantıyı Ekleme Maliyeti	23.351
Üçüncü Bağlantıyı Ekleme Maliyeti	149.164
Dördüncü Bağlantıyı Ekleme Maliyeti	163.958

**Tablo 7. Örnek problem sonuçları**

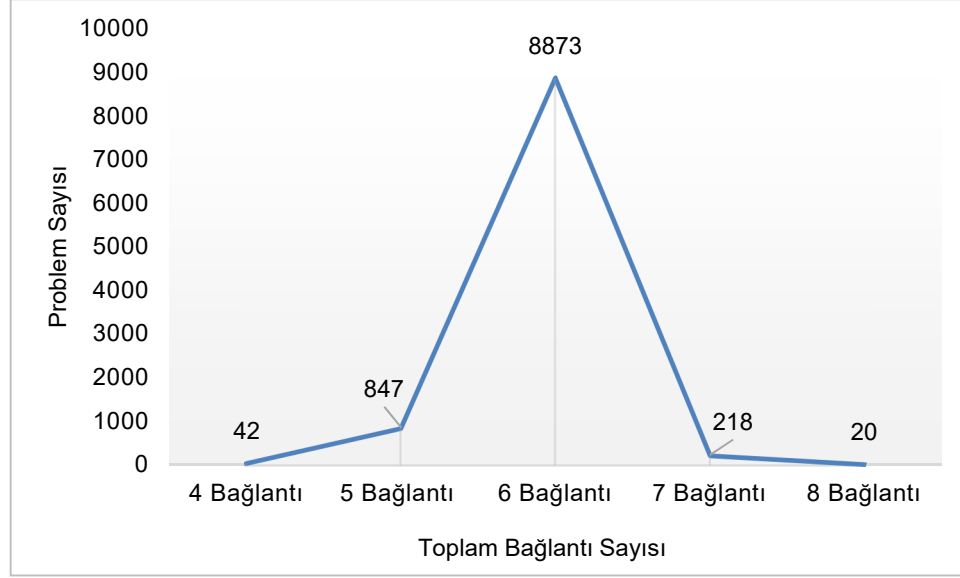
	$P_1$	$P_2$	$P_3$	$P_4$	$P_5$	<i>Maliyet Kalemleri</i>	<i>Sonuçlar (TL)</i>
F <sub>1</sub>	✓	✓	✓	-	-	Üretim Maliyeti	10.309.389,50
F <sub>2</sub>	✓	✓	✓	-	-	Elde Bulundurma Maliyeti	0
F <sub>3</sub>	-	-	✓	✓	-	Ceza Maliyeti	0
F <sub>4</sub>	-	-	-	✓	✓	Bağlantı Ekleme Amortisman Maliyeti	228.218,00
F <sub>5</sub>	✓	-	✓	-	✓	Toplam Maliyet	10.537.607,50

Tablo 7'de optimal sistem tasarımı sonucu incelendiğinde, fabrikaların kendi ürünleri hariç 8 adet bağlantı yatırımı yapıldığı görülmektedir (Tablo 7'de onay işaretleri (✓) tesiste ürünün üretilebildiğini, tire işaretleri (-) ise üretilemediğini ifade eder, altı çizgili rakamlar eklenen bağlantıları temsil eder). Planlama ufku boyunca üretim kararları incelendiğinde toplamda eklenen 8 bağlantının tümünün kullanıldığı bir dönem olmadığı görülmüştür. Eklenen bağlantılar her dönem taleplerle bağlantılı olarak ihtiyaç durumuna göre kullanılmıştır. Bağlantıların yeterli olduğu, maliyet kalemleri incelendiğinde de görülebilmektedir. Tablo 7'de görüleceği üzere bu sistem tasarımı kullanılarak elde bulundurma ve talep kaçırma maliyetlerine

katlanılmamıştır. Dolayısıyla bu sistem tasarımının, tam esnekliğin sağlayabileceği talep karşılama avantajının tamamını sağladığı anlaşılmaktadır.

#### 4.3. Fabrika Bağlantı İstatistikleri

Bu bölümde, çözülen 10.000 problemde elde edilen optimal sistem tasarımı seçimleriyle ilgili istatistikler verilmiştir. Bu amaçla tesislerde kurulan ek (kendi ürünleri hariç) bağlantılara (Örn. Şekil 2) ve maliyet kalemlerine (Örn. Şekil 3-4) ilişkin istatistikler sunulmuştur.

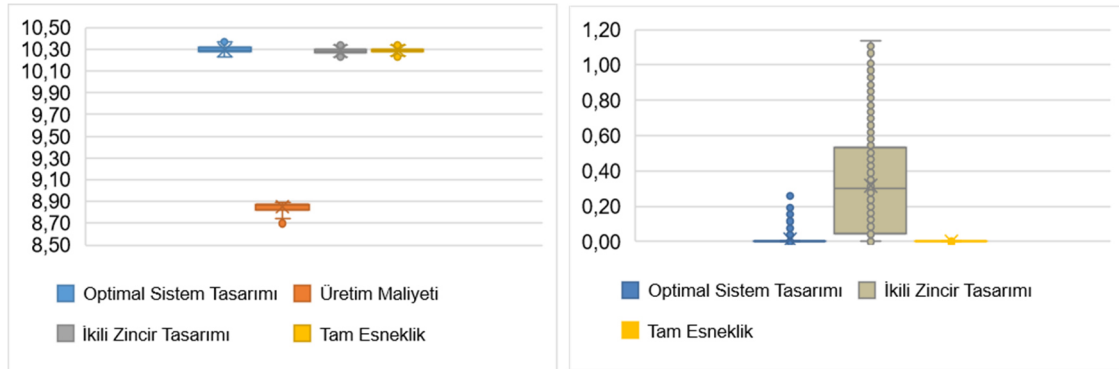


Şekil 2. Çözülen problemlerde toplam bağlantı sayısı grafiği

Şekil 2'de çözülen 10.000 farklı örnek problemin her birinde kaç ek bağlantı kurulduğuna ilişkin dağılım grafiği verilmiştir. Bu grafiğe göre çözülen problemlerin büyük bir çoğunluğunda 6 ek bağlantının olduğu görülmektedir. Optimal tasarımlarda sisteme en fazla 8 bağlantı eklenmiştir. Bu durum modelin fazla yatırım amortisman maliyetine katlanmaktan kaçınmasıyla ilgilidir. Benzer şekilde optimal sistem tasarımlarında en az 4 ek bağlantı kurulmuştur. Daha az bağlantı eklenen durumlar, oluşabilecek ceza ve elde bulundurma maliyetleri yatırım maliyetlerinden daha fazla olacağı için tercih edilmemiştir. Ayrıca çözülen problemlerden 503 tanesinde ikili zincir tasarımının optimal sonuç olduğu tespit edilmiştir.

#### 4.4. Maliyetler

Bu bölümde üç farklı geleneksel esneklik tasarımı (esnek olmayan tasarım, ikili zincir tasarımı ve tam esneklik tasarımı) ve optimal çözümlerde elde edilen sistem tasarımlarının performans değerlendirmesi maliyetler açısından ele alınmıştır. Bu amaç doğrultusunda benzetimde çözülen 10.000 farklı senaryo için her bir esneklik tasarımı ile elde edilen maliyetler, her bir maliyet kalemi (üretim, elde bulundurma, ceza ve yatırım amortisman maliyetleri) açısından Şekil 3'te, toplam maliyet açısından ise Şekil 4'te özetlenmiştir. Esnek olmayan tasarımın maliyetleri diğer tasarımların çok üzerinde olduğundan, diğer tasarımlar arasında daha iyi bir karşılaştırma yapılabilmesi amacıyla seçilen maliyet eksenini değerlerinin dışında kalmış ve Şekil 3b ve 3c'de gösterilememiştir.



a) Üretim maliyeti

b) Elde bulundurma maliyeti





c) Ceza maliyeti

d) Bağlantı ekleme amortisman maliyeti

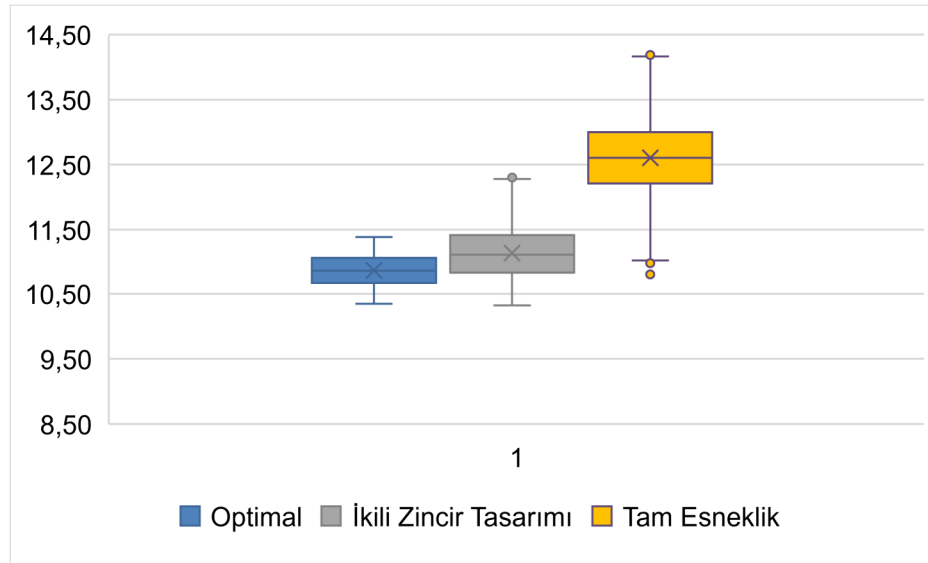
**Şekil 3. Farklı sistem tasarımlarının maliyet kalemleri açısından performans değerlendirilmesi (Milyon TL)**

Şekil 3(a)'da görüldüğü üzere en düşük üretim maliyetlerini sağlayan tasarım esnek olmayan sistem tasarımıdır. Bu durum kısmen her fabrikada sadece kendi (düşük birim üretim maliyetine sahip) ürününün üretilmesiyle ilgili olsa da kısmen de bu tasarımın az üretim yaparak talebin tamamını karşılayamıyor olmasından kaynaklanmaktadır. Bu sebeple diğer maliyet kalemleri bu tasarımın üretim maliyeti avantajını bertaraf etmektedir. Şekilde diğer tasarımlar arasında ciddi üretim maliyeti farklarının oluşmadığı gözlemlenmektedir. Bu da ilgili tasarımların benzer talep karşılama seviyelerine sahip olduğunu göstermektedir.

Şekil 3(b)'de farklı sistem tasarımlarının elde bulundurma maliyetleri sonuçları karşılaştırılmaktadır. Şekilden görüleceği üzere en fazla elde bulundurma maliyetine katlanan sistem ikili zincir tasarımıdır. Tesisler sadece iki ürün üretebildikleri için sistem ceza maliyetine katlanmamak amacıyla daha fazla envanter maliyetine katlanmıştır. Optimal sistemdeki ortalama elde bulundurma maliyeti 11.670 TL iken tam esnek sistemde sadece 65 TL olduğu gözlemlenmiştir. Bunun sebebi, tam esnek sistemlerde fabrikalar tüm ürünleri üretebildiği için envanter maliyetine katlanmak zorunda kalınmamasıdır.

Üretim sistemleri ceza maliyetleri açısından incelendiğinde en fazla ceza maliyetine katlanan sistem esnek olmayan sistemdir. Şekil 3(c)'de görüldüğü üzere ikili zincir tasarımında katlanılan ceza maliyeti optimal sistemden daha fazladır. Optimal sistem tasarımında süreç esnekliği sayesinde kullanılabilir atıl kapasiteler olacağından model çok daha az ceza maliyetine katlanmıştır. Optimal sistemde katlanılan ortalama ceza maliyeti 3.267,6 TL iken, ikili zincir tasarımında 60.410 TL'dir. Çözülen senaryolarda tam esnek sistemlerde ceza maliyetine hiçbir zaman katlanılmamıştır. Tüm tesislerin bütün ürünleri ürettiği durumda sistemler atıl kapasiteleri kullanarak talebin tamamını zamanında karşılayabilmektedir.

Esnekliğin olmadığı sistemlerde tesisler için herhangi bir yatırım maliyetine katlanılmamaktadır. Tablo 1'e bakıldığında tam esnek sistemlerde tesisler tüm ürünleri üretebildiği için beş ürün ve beş tesise sahip bir sistemde tesislerin kendi ürünleri hariç toplamda 20 bağlantı eklendiği görülmektedir. Bu durum tam esnek sistemlerdeki bağlantı ekleme maliyetlerinin fazla olmasını açıklamaktadır. Şekil 3(d) incelendiğinde optimal sistem tasarımının bağlantı ekleme maliyetlerinin, ikili zincir tasarımı maliyetlerine göre daha fazla olduğu gözlemlenmektedir. Şekil 2'de de görüldüğü üzere optimal sistemde çözülen problemlerin %88,7'sinde toplamda sisteme 6 bağlantı eklenmiştir. Buna göre belirlenen talep yapıları için ikili zincir tasarımının tam anlamıyla yeterli gelmediği çıkarımı yapılabilir.



**Şekil 4. Farklı sistem tasarımlarının toplam maliyetleri açısından performans değerlendirmesi (Milyon TL)**

Şekil 4'te sistemlerin toplam maliyetler açısından performansları incelendiğinde en yüksek toplam maliyetin tam esnek tasarıma sahip sistemde ortaya çıktığı görülmektedir. Tam esnek tasarımda ortaya çıkan ortalama toplam maliyetin optimal sistemden %13,7 daha fazla olduğu sonucu elde edilmiştir. Bu durum tam esnek sistemlerde yatırım amortisman maliyetlerinin çok daha fazla olmasından kaynaklanmaktadır. Bu da Jordan ve Graves'in (1995) kısmi esneklik tasarımının gerekliliğini açıklarken önerdiği, tam esnek sistemlerin, gerekli yatırım maliyetleri sebebiyle çoğu zaman ulaşılamaz olduğu teziyle uyumludur. Yatırım maliyetlerinin yüksek olması toplam maliyeti artırmış ve sistem performansını olumsuz etkilemiştir. Daha önce de belirtildiği gibi çözülen problemlerin toplamda 503 tanesinde ikili zincir tasarımı optimal sonuç olarak elde edilmiştir. Şekil 4 incelendiğinde, ikili zincir tasarımınınikiyle karşılaştırıldığında optimal sistemin toplam maliyet açısından ortalama %2,4 daha iyi performans gösterdiği görülmektedir. Bu durum yine ikili zincir tasarımının tam esnek sistemlere nazaran daha uygulanabilir olduğu tezini desteklemektedir. Ayrıca bu etkin tasarımın dâhi optimal çözümden %2,4 daha yüksek maliyete sahip olması, bu makalede sunulan modelin gerekliliğini ortaya koymaktadır.

Özetle, yapılan çalışmada üç geleneksel esneklik tasarımı ve optimal sistem tasarımı; üretim, elde bulundurma, ceza ve bağlantı ekleme maliyetleri açısından benzetim çalışması yapılarak incelenmiştir. Yapılan analizlerde esnek olmayan sistemin, toplam üretim miktarının düşük olması ve esneklik yatırımlarına kapalı olması sebepleriyle üretim ve bağıntı maliyeti açısından avantajlı olduğu görülse de karşılanamayan talep ve yüksek elde bulundurma miktarları sebebiyle toplam maliyette en dezavantajlı sistem olduğu anlaşılmıştır. İkili zincir ve optimal sistem tasarımları arasında, bağıntı ekleme maliyetleri temel farkı oluşturmakta ve diğer maliyetler açısından ikili zincir tasarımının dezavantajlarını ortadan kaldırmaktadır. Ancak, bu çalışmada sunulan ve tüm maliyetleri dikkate alan doğrusal programlama modeli kullanılarak seçilen optimal tasarım, elde bulundurma ve ceza maliyetlerini, gereksiz bağlantı maliyetlerine yol açmayacak ve âtil kapasiteleri en aza indirecek şekilde bağıntılar oluşturularak azaltmaktadır. Bu da geliştirilen doğrusal programlama modeli kullanılarak elde edilen optimal tasarımı toplam maliyet açısından diğer sistemlerden daha avantajlı kılmaktadır. Sonuç olarak, önerilen doğrusal programlama modelinin sistem tasarımının belirlenmesinde karar vericiye destek olabileceği söylenebilir.

## 5. SONUÇ ve DEĞERLENDİRME

Bu çalışmada süreç esnekliği varsayımı altında optimal üretim, envanter ve sistem tasarımı kararları verilmesi için bir doğrusal programlama modeli sunulmuştur. Bu çerçevede süreç esnekliği problemi, yatırım amortisman maliyetlerini ve optimal sistem tasarımı kararını da göz önünde bulundurarak karma tam sayılı doğrusal programlama ile modellenmiştir. Geliştirilen model kullanılarak, optimal, esnek olmayan, kısmi esnek ve tam esnek tasarımların üretim sistemi ve maliyetler üzerindeki etkisi ile ilgili değerlendirmeler yapılmıştır. Söz konusu problemde her bir sistem tasarımı için farklı ceza maliyetleri, elde bulundurma maliyetleri, bağlantı ekleme maliyetleri ve talep değerleri ile 10.000 senaryo oluşturularak bir benzetim çalışması yapılmıştır. Oluşturulan senaryolar geleneksel sistem tasarımları ve optimal sistem tasarımı varsayımlarıyla çözülmüş ve elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır.

Sayısal sonuçlar incelendiğinde, literatürle uyumlu olarak süreç esnekliğinin dikkate alınmadığı sistemlerin, diğer sistemlere göre daha kötü performans sergilediği gözlemlenmiştir. Esnek olmayan sistemlerde kapasite yetersiz kalabilmekte ve dolayısıyla ceza maliyetleri ve toplam maliyet önemli ölçüde etkilenmektedir. İkili zincir tasarımının dikkate alındığı durumlarda elde bulundurma maliyetlerinin optimal tasarım ve tam esnek tasarım modellerine göre daha fazla olduğu görülmüştür. Ancak ikili zincir tasarımının bazı senaryolarda optimal sonuç olması bu tasarımın etkinliğini göstermektedir ve Jordan ve Graves'in (1995) çalışmasını da destekler niteliktedir. Tam esnek üretim sisteminin, envanter maliyetleri açısından yüksek performans gösterse de yatırım maliyetlerinin yüksekliği sebebiyle çoğu durumda uygulanabilir olmadığı görülmüştür. Son olarak karşılaştırılan geleneksel esneklik tasarımları içerisinde en düşük ortalama maliyetleri sağlayan ikili zincir tasarımının dâhi optimalden %2,4 daha yüksek sonuç vermesi, sunulan modelin gerekliliğini ve bir karar destek sistemi olarak uygulamadaki faydasını ortaya koymaktadır. Yapılan çalışmada önerilen model işletmelerin gereksiz yatırım ve envanter maliyetlerine katlanmalarını önleme potansiyeline sahiptir. Aynı zamanda minimum talep kaçırma maliyetine katlanılmasını sağlayarak işletmelerin rekabet avantajlarına ve pazar paylarının korunmasına da olumlu yönde katkı sağlayabilecektir.

Çalışmada sunulan sayısal analizler, önerilen tam sayılı doğrusal programlama modelinin hem yatırım kararları hem de üretim-envanter kararları için envanter maliyetleri açısından üretim sisteminin verimliliğini belirgin ölçüde artırdığını ortaya koymaktadır. Sonuçlar incelendiğinde, modelin önerdiği kararlarda, ortalama olarak, en yakın rakibi olan ikili zincir tasarımından biraz daha fazla yatırım girdisiyle elde bulundurma ve ceza maliyetlerinde ciddi tasarruflar sağlandığı, böylece yatırım maliyetlerinin de dahil edildiği toplam maliyetlerde avantajlı hale geldiği görülmektedir. Başka bir ifadeyle girdideki küçük bir artış çıktıda daha büyük kazanımlara sebep olmuş ve neticede verimliliği artırmıştır.

Çalışılan problemde 5 ürün ve 5 tesisin olması çalışmanın kısıtlarındandır. Gelecekteki çalışmalarda daha büyük ölçekli problemler üzerinde yoğunlaşabilir ve bu amaçla büyük boyutlu problemlerin çözülmesi için sezgisel yöntemler geliştirilebilir. Konuya ilişkin gelecek çalışmalar, benzer karşılaştırmaların sabit üretim maliyeti, pozitif tedarik süresi gibi varsayımlarla yapılmasını içerebilir. İncelenen problemde ürünler için karşılaşılabilecek olan taleplerin planlama ufkunun başında bilindiği varsayımı da çalışmanın kısıtları arasındadır. Birçok gerçek hayat probleminde, ilgili taleplerin kesin olarak önceden bilinmesinin mümkün olmadığı ortadadır. Dolayısıyla talep başta olmak üzere farklı parametrelerde karşılaşılabilecek belirsizliğin de hesaba katıldığı bir doğrusal programlama modelinin geliştirilmesi, akademik ve pratik faydalar sağlayacaktır.

**KAYNAKÇA**

- Baykasoğlu, A. ve Durmuşoğlu, Z.D. (2012). "Flow Time Analyses of a Simulated Flexible Job Shop by Considering Jockeying", *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 58(5-8), 693-707.
- Baykasoğlu, A. ve Özbakır, L. (2008). "Analysing the Effect of Flexibility on Manufacturing Systems Performance", *Journal of Manufacturing Technology Management*, 19(2), 172-193.
- Chou, M.C., Chua, G.A. ve Zheng, H. (2014). "On the Performance of Sparse Process Structures in Partial Postponement Production Systems", *Operations Research*, 62(2), 348-365.
- Chou, M.C., Chua, G.A., Teo, C.P. ve Zheng, H. (2010). "Design for Process Flexibility: Efficiency of the Long Chain and Sparse Structure", *Operations Research*, 58(1), 43-58.
- Chou, M.C., Chua, G.A., Teo, C.P. ve Zheng, H. (2011). "Process Flexibility Revisited: The Graph Expander and Its Applications", *Operations Research*, 59(5), 1090-1105.
- Chou, M.C., Teo, C.P. ve Zheng, H. (2008). "Process Flexibility: Design, Evaluation, and Applications", *Flexible Services and Manufacturing Journal*, 20(1-2), 59-94.
- Çimen, M. ve Belbağ, S. (2015). "Süreç Esnekliği Varsayımı Altında Stokastik Stok Optimizasyonu Probleminin Dinamik Programlama ile Çözümü", *Gazi Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi*, 17(3), 255.
- Çimen, M. ve Kirkbride, C. (2017). "Approximate Dynamic Programming Algorithms for Multidimensional Flexible Production-Inventory Problems", *International Journal of Production Research*, 55(7), 2034-2050.
- Çimen, M., Belbağ, S. ve Soysal, M. (2016). "Üretimde Esneklik ve Stok Yönetimi: Stok Optimizasyonu için Bir Karar Destek Modeli", *İşletme Araştırmaları Dergisi*, 8(1), 360-379.
- Désir, A., Goyal, V., Wei, Y. ve Zhang, J. (2016). "Sparse Process Flexibility Designs: Is the Long Chain Really Optimal?", *Operations Research*, 64(2), 416-431.
- Feng, W. ve Shen, Z.J.M. (2018). "Process Flexibility in Homogeneous Production-Inventory Systems with a Single-Period Demand", *IIE Transactions*, 50(6), 463-483.
- Fiorotto, D.J., Jans, R. ve De Araujo, S.A. (2018). "Process Flexibility and The Chaining Principle in Lot Sizing Problems", *International Journal of Production Economics*, 204, 244-263.
- Graves, S.C. ve Tomlin, B.T. (2003). "Process Flexibility in Supply Chains", *Management Science*, 49(7), 907-919.
- He, P., Xu, X. ve Hua, Z. (2012). "A New Method for Guiding Process Flexibility Investment: Flexibility Fit Index", *International Journal of Production Research*, 50(14), 3718-3737.
- Jordan, W.C. ve Graves, S.C. (1995). "Principles on The Benefits of Manufacturing Process Flexibility", *Management Science*, 41(4), 577-594.
- Kaminsky, P. ve Wang, Y. (2019). "Multi-Period Process Flexibility with Inventory", *Flexible Services and Manufacturing Journal*, 31(4), 833-893.
- Mak, H.Y. ve Shen, Z.J.M. (2009). "Stochastic Programming Approach to Process Flexibility Design", *Flexible Services and Manufacturing Journal*, 21(3-4), 75-91.
- Sethi, A.K. ve Sethi, S.P. (1990). "Flexibility in Manufacturing: A Survey", *International Journal of Flexible Manufacturing Systems*, 2(4), 289-328.
- Rogers, M. (1998). "The Definition and Measurement of Productivity", Melbourne Institute of Applied Economic and Social Research, Melbourne Institute Working Paper, 98(9), 1-27.
- Simchi-Levi, D. ve Wei, Y. (2012). "Understanding the Performance of the Long Chain and Sparse Designs in Process Flexibility", *Operations Research*, 60(5), 1125-1141.
- Simchi-Levi, D. ve Wei, Y. (2015). "Worst-Case Analysis of Process Flexibility Designs", *Operations Research*, 63(1), 166-185.
- Simchi-Levi, D., Wang, H. ve Wei, Y. (2018). "Increasing Supply Chain Robustness Through Process Flexibility and Inventory", *Production and Operations Management*, 27(8), 1476-1491.
- Soysal, M. ve Çimen, M. (2017). "Süreç Esnekliği Tasarımlarının Farklı Talep Yapıları Altında Envanter Maliyeti Performansları Üzerine", *Finans Politik ve Ekonomik Yorumlar*, 54(633), 79-91.
- Soysal, M., Çimen, M. ve Belbağ, S. (2018). "Sabit Üretim Hazırlık Maliyetinin Süreç Esnekliğinde Stok Optimizasyonuna Etkisi", *Hacettepe Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi*, 36(1), 117-139.
- Upton, D.M. (1994). "The Management of Manufacturing Flexibility", *California Management Review*, 36(2), 72-89.
- Valeva, S., Hewitt, M., Thomas, B.W. ve Brown, K.G. (2017). "Balancing Flexibility and Inventory in Workforce Planning with Learning", *International Journal of Production Economics*, 183, 194-207.