

Üretimde Esneklik ve Stok Yönetimi: Stok Optimizasyonu İçin Bir Karar Destek Modeli

Production Flexibility and Inventory Management: A Decision Support Model For Inventory Optimization

Mustafa ÇİMEN
Hacettepe Üniversitesi
İktisadi ve İdari Bilimler
Fakültesi, İşletme
Bölümü
Ankara, Türkiye
mcimen@hacettepe.edu.tr

Sedat BELBAĞ
Gazi Üniversitesi
İktisadi ve İdari Bilimler
Fakültesi, İşletme
Bölümü
Ankara, Türkiye
sedatbelbag@gazi.edu.tr

Mehmet SOYSAL
Hacettepe Üniversitesi
İktisadi ve İdari Bilimler
Fakültesi, İşletme
Bölümü
Ankara, Türkiye
mehmetsoysal@hacettepe.edu.tr

Özet

İşletme içerisinde daha esnek yapılar kurmak, değişimle daha kolay başa çıkabilmek için önemli bir araçtır. Süreç esnekliği, üretim tesislerinin ya da işçilerin birden fazla ürünü üretebilmesini ve bir ürünün üretiminden bir başka ürünün üretimine hızlı ve maliyetsiz şekilde geçebilmesini hedefler. Bu çalışmada süreç esnekliği problemi için stok maliyetlerini minimize eden üretim kararlarını bulacak bir Doğrusal Programlama modeli önerilmektedir. Çalışmada elde edilen sonuçlar, süreç esnekliği içeren sistemlerin stok maliyetleri açısından esnek olmayan sistemlerden daha üstün olduğunu ve kısmî esneklik içeren sistemlerin neredeyse tam esnek sistemler kadar verimli olabileceğini göstermektedir.

Anahtar Kelimeler: Stok Yönetimi, Esneklik, Stok Optimizasyonu, Karar Destek Modeli

Abstract

Building flexible structures within a company is an important tool for coping with changes. Process flexibility targets production facilities or workers to easily change their productions from a product to another without significant changeover costs. This study presents a Linear Programming Model for a production system with inventory costs and several process flexibility options. The model has been used to compare alternative process flexibility designs in terms of inventory costs. The experimental results demonstrate that (i) systems with process flexibility outperforms dedicated systems and (ii) limited flexibility designs may perform almost as efficient as full flexibility designs.

Keywords: Inventory Management, Flexibility, Inventory Optimization, Decision Support Model

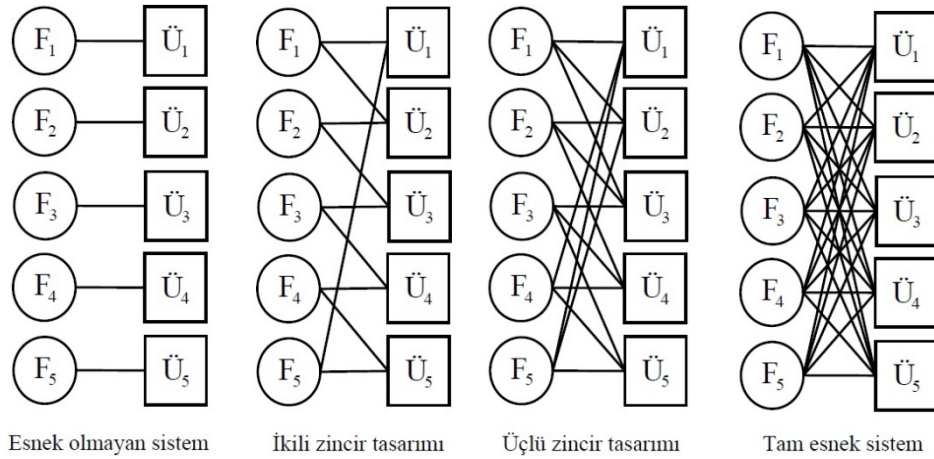
1. Giriş

İşletmelerin rakiplerine karşı rekabet avantajı sağlamak için dikkate alınması gereken unsurlardan birisi belirsizliktir. İşletmeler için ürün hayat seyrinin kısalması, teknolojinin hızla değişmesi, teslimat sürelerinin azalması, kişiselleştirilmiş ürünlerin sunulması ve küresel rekabetin artması belirsizliğe neden olmaktadır (Jain vd., 2013: 5946). İşletmenin başarısı, çevresinde gerçekleşen değişimlere uyum sağlama becerisi ve belirsizlikleri azaltabilmesi ile doğru orantılıdır. Talep, işletmelerin karşılaştığı en önemli belirsizlik kaynaklarından biridir (De Toni ve Tonchia, 1998: 1588). Talepte meydana gelen artış ya da azalışlar işletmelerin üretim ve stok politikalarını doğrudan etkilemektedir. Bu sebeple, işletmeler üretim sistemlerini esnek hale getirerek talep kaynaklı belirsizlikten en az derecede etkilenmeyi amaçlar.

Bir işletme için esneklik kavramı, içsel ya da dışsal kaynaklı değişimlere uyum sağlama yeteneği olarak tanımlanabilir (Gustavson, 1984: 802). Esneklik, işletmelerin tesislerinde çok çeşitli ürünleri üreterek rekabet avantajı elde etmesini sağlar (Upton, 1995: 206). BMW sahip olduğu esnek üretim sistemi sayesinde, 2008 ekonomik krizinin otomobil satışlarında yarattığı olumsuz durumdan olabildiğince az etkilenmiştir (Rogers vd., 2011: 3767). İşletmeler rekabet avantajı sağlayacak stratejiler geliştirirken çeşitli esneklik uygulamalarından yararlanabilir. İşletmelerde karşılaşılan esneklik çeşitlerinden başlıcaları; makine esnekliği (bir makinenin birden çok işlemi yerine getirebilmesi), süreç esnekliği (birçok ürünün aynı tesis içerisinde üretilebilmesi), ürün esnekliği (bir ürünün kolaylıkla geliştirilebilmesi), rotalama esnekliği (üretim sistemine yeni üretim hattının eklenebilmesi), hacim esnekliği (tesislerin farklı üretim kapasitelerinde çalışabilmesi) şeklinde sıralanabilir (Sethi ve Sethi, 1990: 289-328).

Süreç esnekliği bir üretim tesisindeki ürün çeşidini veya ürün miktarını kolaylıkla değiştirebilme kabiliyetidir (Jordan ve Graves, 1995: 578). Süreç esnekliğinin amacı, değişen talep miktarlarını zamanında karşılayabilmek için uzun makine hazırlık süresi ve yüksek hazırlık maliyetine katlanmadan bir ürünün üretiminden başka bir ürünün üretimine geçebilmektir (Browne vd., 1984: 114). İşletmeler üretim sistemlerini süreç esnekliğine uygun hale getirerek makine ve işgücü kullanımını, müşteri memnuniyetini ve sistemin performansını arttırabilir. Üretim teknolojilerinde meydana gelen gelişmeler işletmelerin talepteki değişimlere karşı süreç esnekliğini kullanabilmesini sağlamıştır. Üretim sistemlerinin yüksek teknolojiye sahip makinelerle donatılması birden çok işi yapabilen esnek üretim tesislerini ortaya çıkarmıştır (Jain vd., 2013: 5948).

Süreç esnekliği başta otomotiv sektörü olmak üzere birçok endüstri dalındaki yöneticiler tarafından dikkate alınmaktadır. Örneğin Renault, tek bir otomobil üretimi üzerine odaklanmış tesisler yerine, yeni teknolojiler sayesinde esnek üretim yapabilen makinelere sahip tesislere yatırım yapmaktadır (Francas vd., 2011: 166). Van Biesebroeck (2007: 1316), Amerikan ve Japon otomobil üreticilerinin süreç esnekliğini sistemlerine entegre etme eğilimleri olduğunu belirtmiştir. Ford Motors, Kanada'da bulunan iki motor üretim tesisindeki üretim araçlarını esnek hale getirebilmek için yaklaşık 485 milyon dolar yatırım yapmıştır (Chou vd., 2008: 60). Süreç esnekliği otomotiv sektörünün yanında tekstil, elektronik ve iletişim merkezi gibi hizmet sektörlerinde de yoğun şekilde kullanılmaktadır (Chou vd., 2010: 711).



Şekil 1: 5 Ürün ve 5 Tesisten Oluşan Bir Sistem İçin Süreç Esnekliği Tasarımı Örnekleri. F Tesisleri, Ü Ürünleri, Tesisler ile Ürünler Arasındaki Çizgilerse O Tesiste İlgili Ürünün Üretilbildiğini Sembolize Etmektedir.

Akademik çalışmaların süreç esnekliğine yönelik ilgisinin 1980’li yılların başından itibaren hız kazandığı gözlemlenmektedir. Teknolojik gelişmeler sayesinde süreç esnekliğinin uygulama alanı bulması, bu ilginin artmasının arkasındaki en önemli sebeplerden biridir. Süreç esnekliğine yönelik ilk çalışmalar esnek olmayan (sadece bir ürünün üretildiği) veya tam esnekliğin mevcut olduğu (tüm tesislerin her bir ürünü üretebilmesi) üretim sistemlerine odaklanmıştır (Jaikumar, 1984; Andreou, 1990; Fine ve Freund, 1990; Mandelbanm ve Buzacott, 1986). Tam esnekliğin yüksek tutarlarda yatırım gerektirmesi, süreç esnekliğinin endüstriyel alanda uygulanabilirliğini kısıtlamıştır. Jordan ve Graves (1995: 577- 594) çalışmalarında işletmelerin kısmî süreç esnekliğini uygulayarak, çok daha az yatırım tutarı ile tam esnekliğin sağladığı faydaların birçoğuna ulaşılabileceğini iddia etmiştir. Bunun gerçekleştirilmesi için üretim sisteminin kısmî süreç esnekliğine uygun bir şekilde tasarlanması gereklidir. Jordan ve Graves (1995: 577- 594), bu gereksinimi karşılamak adına Zincirleme Tasarımı (Chaining Design)’ni önermişlerdir. Zincirleme tasarımında, 1’den F’ye kadar sıralanan fabrikaların her biri, kendinden önceki en az bir fabrikanın ürettiği ürünü ve kendinden sonraki en az bir fabrikanın ürettiği ürünü üretir. Talep ya da stok miktarlarında meydana gelen dalgalanmalar, oluşturulan bu zincir üzerinde ürünlerin üretim miktarları kaydırılarak karşılanır. Böylece işletmeler talepteki değişimlere karşı tam esnekliğe göre çok daha düşük yatırım tutarları ile önlem alabilir. Şekil 1, beş ürün ve beş tesisten oluşan bir üretim sisteminin çeşitli esneklik varsayımları altındaki tasarımlarını örneklemektedir.

Jordan ve Graves (1995: 577- 594)’in çalışması, kısmî süreç esnekliğine olan akademik ve endüstriyel ilginin giderek artmasını sağlamıştır. Albino ve Garavelli (1999: 447-455) talep değişkenliğinin kısmî süreç esnekliğe sahip hücreli üretim sistemi üzerindeki etkisini incelemiştir. Simülasyon yöntemi kullanılarak sistemin satış kaybı ve kapasite kullanımı açısından performansı ölçülmüştür. Elde edilen sonuçlara göre talepteki değişkenlik arttıkça kısmî süreç esneklikten sağlanan fayda düzeyi artmaktadır. Garavelli (2001: 39-48) seri üretim sisteminin kısmî süreç esnekliği varsayımı altında incelemiştir. Talepteki değişkenliğinin yüksek olduğu durumlarda bile kısmî süreç esnekliğine sahip üretim sisteminin performansındaki azalmanın düşük olduğu tespit edilmiştir. Chou vd. (2008: 59-94) mevcut kısmî süreç esnekliği

literatürünü sistem tasarımı ve uygulama alanı açısından değerlendirmiştir. İkili zincir yapısındaki bir sistemin tam esnek bir sisteme yakın bir talep karşılama oranını yakaladığını savunmaktadır. Ancak gerçekleşen talebin, zincir yapının etkin kullanımını mümkün kılmadığı durumlarda zincirleme tasarımı ile tam esneklik arasındaki talep karşılama oranı farkı artabilmektedir.

Süreç esnekliği talepteki değişimlerden kaynaklanan belirsizliği azaltmak için kullanılmasına rağmen işletmelerin üretim maliyetlerini arttırabilir. Yüksek teknolojiye sahip makine alımı, iş görenlerin eğitimi ve tesislerin yeniden düzenlenmesi belli bir yatırım gerektirdiği için işletmenin üretim maliyetlerini artırır. Bunların yanında, süreç esnekliği işletmelerin üretim ve stok politikalarını karmaşık hale de getirir. Stok yönetimi talebi zamanında karşılamak için gereken ürün miktarını tespit etmeyi amaçlar. Tesislerde birden çok ürünün üretilmesi, optimal üretim kararlarının bulunmasını çok boyutlu bir karar problemi haline getirir. Her tesiste birden çok ürünün üretilmesi, alternatif karar ve stok seviyesi sayısının üssel olarak artmasına neden olur. Ayrıca tesis kapasitelerinin sınırlı olması probleminin çözümünü daha da güçleştirir.

Süreç esnekliği literatürde sistem tasarımı bakış açısından sıkça incelenmesine rağmen, kapasite kısıtı altındaki üretim kararlarının stok maliyetleri açısından optimizasyonu konusunda sınırlı bir literatür mevcuttur. Bunun olası bir sebebi, süreç esnekliğinin literatürde üretim sistemlerinin tasarımı açısından ele alınmış olmasıdır. Sistem tasarımında süreç esnekliği, farklı üretim hedeflerini gerçekleştirebildiği oranda başarılıdır. Dolayısıyla üretim kararlarının yol açtığı stok maliyetleri sistem tasarımı açısından öncelikli bir konu olarak görülmemiştir. Mevcut çalışmalar farklı süreç esnekliği tasarımlarını (ikili zincir ya da tam esneklik gibi) kapasite kullanımı ve taleplerin zamanında karşılanabilirliği açısından ele almıştır. Francas vd. (2009: 427-440) kapasite kullanımı ile süreç esnekliği arasındaki ilişkiyi incelemiştir. Sonuçta süreç esnekliğinin kapasite kullanımını olumlu yönde etkilediğini belirlemiştir. He vd. (2012: 3718-3737) en yüksek talep karşılanabilirliğini en az yatırım maliyeti ile sağlayan sistem tasarımını belirlemek için esneklik uyum endeksini geliştirmiştir. Bu endeks sayesinde üretim sistemindeki esneklik düzeyi tespit edilerek uygun değişimler yapılmaktadır. Graves ve Tomlin (2003: 918) çok aşamalı bir tedarik zinciri için g olarak tanımlanan bir esneklik katsayısı tanımlamıştır. İşletmenin ölçülen değeri bu değere eşit ya da büyük ise belirsizliklere karşı daha dirençli bir sisteme sahip olduğu tespit edilmiştir. Akşin ve Karaesmen (2007: 477-484) süreç esnekliğine sahip bir hizmet odaklı sistemde esneklik ve kapasite arasındaki ilişkiyi incelemiştir. Athey ve Schmutzler (1995: 557-574) ürün ve süreç esnekliği ile ilgili kararların gelecekteki potansiyel yatırım fırsatları ve üretim maliyetleri üzerindeki etkisini incelemiştir. Sonuç olarak mevcut literatürde esneklik tasarımlarının stok maliyetleri açısından performansı karşılaştıran bir çalışmaya rastlanmamıştır.

Mevcut literatür, ayrıca, farklı esneklik tasarımlarının faydalarını daha net ortaya koymak amacıyla sistemlerin, dönem içinde oluşan talepleri karşılayabilme oranını incelemektedir. Bu da tek dönemlik stok politikaları üretilmesi demektir. Sistem tasarımına odaklanan söz konusu çalışmalar sadece tek dönemi dikkati almakta ve elde kalan stoğun sonraki dönemlere taşınabileceğini göz ardı etmektedir. Örneğin Yu vd. (2011: 350-361), farklı zincir tasarımları üzerinde gerçekleşen stok taşıma problemini sadece tek dönem varsayımı altında çözmüştür. Hâlbuki stok teorisinde belirli koşullar haricinde yaygınlıkla kullanılan varsayım, elde kalan stoğun bir sonraki döneme

taşıdığı şeklindedir. Farklı süreç esnekliği tasarımlarındaki stok maliyetlerinin çok dönem varsayımı altında değerlendirilmesi incelenmesi gereken önemli bir konudur.

Bu çalışmada süreç esnekliğine ve kapasite kısıtlarına sahip bir üretim sisteminde çok dönemli planlama ufku için stok maliyetleri açısından optimal üretim kararlarının belirlenmesi problemi incelenmektedir¹. Bu kapsamda süreç esnekliği problemi Doğrusal Programlama (DP) yöntemi kullanılarak modellenmiş ve çözülmüştür. İlâveten, geliştirilen DP modeli kullanılarak süreç esnekliğine sahip farklı üretim sistemi tasarımlarının stok maliyeti açısından performansı karşılaştırılmıştır. Çalışmanın ikinci bölümünde süreç esnekliği probleminin varsayımları ve DP modeli verilmektedir. Üçüncü bölümde süreç esnekliği problemi çeşitli sayısal örnekler ile çözümlenip, süreç esnekliğine sahip farklı sistem tasarımlarının stok maliyetleri karşılaştırılmıştır. Son bölümde çalışmanın sonuçları, sınırlılıkları ve gelecek çalışmalara yönelik öneriler sunulmaktadır.

2. Süreç Esnekliği Problemi

Bu çalışmada süreç esnekliği probleminde, T dönemli sonlu planlama ufku için optimal üretim kararlarının bulunması amaçlanmaktadır. Sistemde periyodik olarak her dönem başında üretim hedefleri belirlenmektedir. Üretim sisteminde F adet üretim kaynağı² olduğu ve P adet ürün çeşidi üretildiği varsayılmaktadır. Her bir ürün bir veya daha fazla fabrika tarafından üretilmekte, her bir fabrikada bir veya daha fazla ürün üretmektedir. Ürünler ve fabrikalar arasındaki üretim ilişkileri (bağlantılar) kısmî ya da tam esneklik varsayımıyla tasarlanmış olabilir.

Stok maliyetleri, üretim, elde bulundurma ve ceza maliyetlerinden oluşmaktadır. Üretim maliyetleri, fabrikaların fiziksel ve teknik özelliklerine bağlı olarak her bir fabrika-ürün ikilisi için farklı olabilir. 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. Dolayısıyla bir dönem için toplam stok maliyeti aşağıdaki gibi hesaplanabilir:

$$z = \left[\sum_f \sum_p u_{f,p} q_{f,p} + \sum_p \theta_p i_p^- + \sum_p h_p i_p^+ \right] \quad (1)$$

Yukarıdaki denklemde $q_{f,p}$, f fabrikasının p ürününü üretim miktarını, $u_{f,p}$, f fabrikasında p ürünü için birim üretim maliyetini, θ_p ve h_p , p ürünü için sırasıyla ceza ve elde bulundurma maliyetlerini, i_p^- ve i_p^+ ise p ürünü için sırasıyla karşılanamayan talep ve elde kalan ürün miktarlarını göstermektedir. T dönemli bir planlama ufku için gelecek dönemlerin maliyetlerinin, finans teorisine uygun şekilde bugünkü değere indirgenmesi gerekmektedir. Bu amaçla bir iskonto oranı (γ) kullanılacaktır. Dolayısıyla T dönem için toplam indirgenmiş stok maliyeti:

¹ İlgili problem buradan itibaren süreç esnekliği problemi olarak anılacaktır.

² Üretim kaynağı, üretim bandı, fabrika, hücre, işçi vb. olabilir; buradan itibaren fabrika olarak anılacaktır.

$$Z = \sum_t \gamma^{t-1} \left[\sum_f \sum_p u_{f,p} q_{t,f,p} + \sum_p \theta_p i_{t,p}^- + \sum_p h_p i_{t,p}^+ \right] \quad (2)$$

olacaktır. Bu denklemde, $i_{t,p}^-$ ve $i_{t,p}^+$ t döneminin sonunda sırasıyla karşılanamayan talep ve elde kalan ürün miktarlarını göstermektedir. Karşılanamayan talep, dönem başındaki stok miktarı ve üretilen ürün miktarı toplamını (üretim sonrası stok) aşan talep miktarına eşittir. $D_{t,p}$, t döneminde p ürünü için oluşan talep miktarı ve $i_{t,p}$ t döneminin başındaki stok miktarı ise karşılanamayan talep miktarı:

$$i_{t,p}^- \geq D_{t,p} - i_{t,p} - \sum_f q_{t,f,p} \quad \forall t \in T, p \in P \quad (3)$$

olacaktır. Elde kalan ürün miktarları ise, üretim sonrası stoktan talep çıktıktan sonra kalan miktara eşittir ve aşağıdaki gibi hesaplanır:

$$i_{t,p}^+ \geq i_{t,p} + \sum_f q_{t,f,p} - D_{t,p} \quad \forall t \in T, p \in P \quad (4)$$

Yukarıdaki iki denklemde de (3 ve 4) eşitlik yerine eşitsizliğin kullanılması, toplam maliyetler hesaplanırken negatif maliyetlerden kaçınılması içindir. Bu sebeple, her iki değişkenin de sıfırdan büyük değer alması gerekmektedir. Üretim miktarları da yine sıfırdan büyük olması gereken bir değişken setidir.

$$i_{t,p}^+ \geq 0 \quad \forall t \in T, p \in P \quad (5)$$

$$i_{t,p}^- \geq 0 \quad \forall t \in T, p \in P \quad (6)$$

$$q_{t,f,p} \geq 0 \quad \forall t \in T, f \in F, p \in P \quad (7)$$

Dönem sonunda elde kalan stok miktarı, üretim sonrası stokla talep arasındaki farka eşittir ve stok bir sonraki döneme taşınır. Negatif stok durumunda ise, karşılanamayan talep miktarı ertelenerek bir sonraki döneme taşınır. Dolayısıyla $t+1$ dönemi başındaki stok miktarı şu şekilde hesaplanacaktır:

$$i_{t+1,p} = i_{t,p} + \sum_f q_{t,f,p} - D_{t,p} \quad \forall t \in T, p \in P \quad (8)$$

Üretim kararları her bir fabrikanın üretim kapasitesiyle (c_f) sınırlıdır:

$$\sum_p q_{t,f,p} \leq c_f \quad \forall t \in T, f \in F \quad (9)$$

Ayrıca f fabrikasında p ürününün üretilmesi, sistem tasarımında belirlenen üretim ilişkileriyle bağlantılıdır:

$$q_{t,f,p} \leq c_f l_{f,p} \quad \forall t \in T, f \in F, p \in P \quad (10)$$

Bu denklemde $l_{f,p}$ parametresi, f fabrikasında p ürünü üretilebiliyorsa 1, üretilemiyorsa 0 değerini almaktadır. Son olarak, her bir ürün için planlama ufkunun başındaki stok miktarlarının tespit edilmesi gerekir:

$$i_{0,p} = k_p \quad \forall p \in P \quad (11)$$

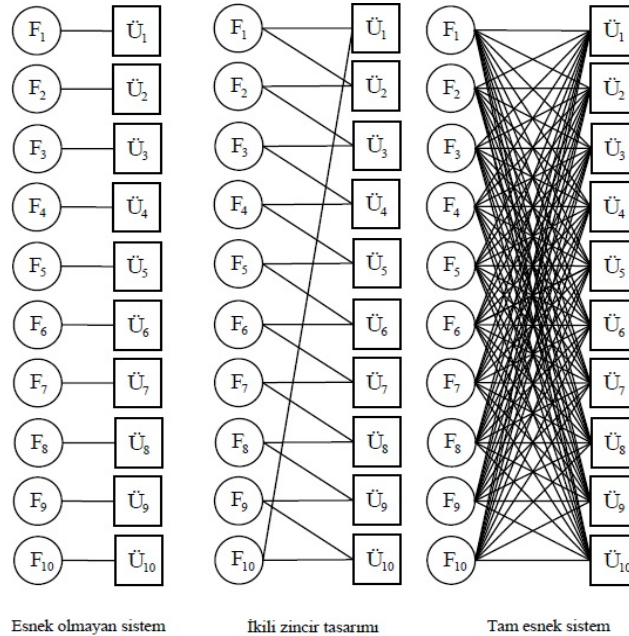
Özetle, süreç esnekliği problemi için geliştirilen DP modeli (2) numaralı amaç fonksiyonu ve (3)-(11) numaralı kısıt setlerinden oluşmaktadır.

3. Sayısal Çalışma

Bu bölümde zincirleme, tam esneklik, ve esnek olmayan tasarımlar, çok dönemli bir planlama ufkü için optimal stok politikalarının üreteceği maliyetler açısından karşılaştırılacaktır. Bölümün ilk kısmında kullanılan deney tasarımı tanıtılmakta, izleyen kısımda ise sonuçlar tartışılmaktadır.

3.1. Deney Tasarımı

Sayısal çalışma kapsamında her bir esneklik seviyesi için 10 ürün ve 10 fabrika içeren örnek birer sistem tasarlanmıştır (bkz. Şekil 2). Bu çalışmada ele alınan deney tasarımı Jordan ve Graves (1995: 585)'in çalışmasındaki örnek temel alınarak oluşturulmuştur. Ürünlerin talepleri Poisson dağılımına sahiptir ve ortalamaları birbirine eşittir ($d_1 = d_2 = d_3 = \bar{d}$). Planlama ufkü beş dönemden oluşmaktadır. Planlama ufkünün başında, her dönem için gerçekleşecek talepler önceden bilinmektedir. Üretim kapasitesinin ortalama talebe oranının farklı esneklik tasarımlarını nasıl etkilediğini sınamak amacıyla fabrika kapasitelerinin talepten düşük olduğu, talebe eşit olduğu ve talepten yüksek olduğu 3 farklı kapasite oranı test edilmiştir ($c = 0,9 \times \bar{d}$; $c = \bar{d}$; $c = 1,1 \times \bar{d}$). Her bir kapasite oranı, 4 farklı talep ortalaması için ($\bar{d} = \{5, 10, 50, 100\}$) ayrı ayrı hesaplanmıştır.



Şekil 2: Farklı Esneklik Düzeyindeki Üretim Sistemleri. Daireler Fabrikaları, Kareler Talepleri Temsil Etmektedir.

Birim elde bulundurma maliyeti ve birim ceza maliyeti, tüm ürünler için sırasıyla 1 ve 7 olarak belirlenmiştir. Üretim maliyetleri ise her bir ürün-fabrika çifti için farklıdır ve Tablo 1’de gösterilmektedir. Ürünler için planlama ufku başında herhangi bir stok bulunmadığı varsayılmaktadır. Bu varsayımlarla 1.000 farklı örnek oluşturulmuştur. Her bir örnek için farklı esneklik tasarımlarının elde edeceği optimal politikalar ve maliyetler, C++ diliyle kodlanan algoritmada IBM ILOG CPLEX 12.6 yazılımının doğrusal programlama kütüphaneleri kullanılarak bulunmuştur.

Tablo 1: 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

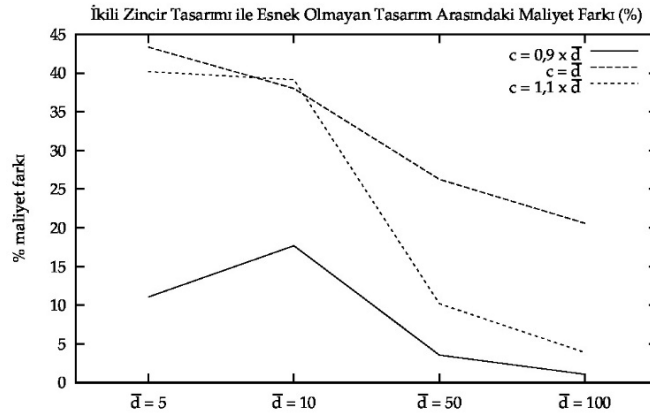
3.2. Sonuçlar

Tablo 2, esneklik tasarımlarının farklı problemlerde elde ettiği indirgenmiş maliyetlerin ortalamalarını göstermektedir. Tablodan da anlaşıldığı üzere, süreç esnekliğine sahip sistemler, stok maliyetleri açısından işletmelere önemli avantajlar sağlamaktadır. Süreç esnekliğine yapılacak yatırımlar, ortalama stok maliyetlerinde %40’ı aşan tasarruflar sağlayabilmektedir. Özellikle üretim kapasitelerinin, ortalama talep miktarından yüksek olduğu durumlarda bu farklar daha belirgindir. Bunun sebebi, fabrikalarda diğer ürünlerin üretimine ayrılacak daha fazla artık kapasite bulunmasıdır. Kapasite oranı düştüğünde fabrikalar, en düşük maliyetle ürettikleri ürüne odaklanmakta, çoğunlukla o ürünün talebine ancak karşılık verebildiğinden diğer ürünlerin üretimine kapasite ayıramamaktadır. Bu da süreç esnekliğinin faydalarını nispeten kısıtlamaktadır. Ancak her durumda esnek sistemlerin esnek olmayan sisteme nazaran daha düşük maliyetler üreteceği ortadadır. Bu durum, esnekliğin faydalarının tek dönemli sistemlerle sınırlı olmadığını göstermektedir. Çok dönemli bir planlama ufkunda elde kalan stoğun diğer dönemlere taşındığı varsayıldığında dahi esnek sistemler daha düşük stok maliyetleri üretmektedir.

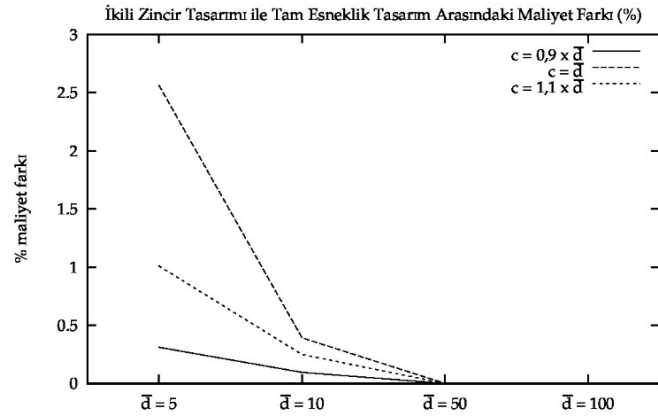
Tablo 2: Farklı Esneklik Düzeyindeki Üretim Sistemlerine Ait Ortalama Maliyetler.

		$\bar{d}=5^*$	$\bar{d}=10$	$\bar{d}=50$	$\bar{d}=100$
$c = 0,9 \times \bar{d}$	Esnek Olmayan Sistem	1093,66	1436,97	6063,35	11813,60
	İkili Zincir	972,67	1182,89	5848,45	11687,80
	Tam Esnek Sistem	969,64	1181,76	5848,45	11687,80
$c = \bar{d}$	Esnek Olmayan Sistem	610,66	993,75	3382,19	5905,46
	İkili Zincir	345,87	616,02	2493,92	4689,54
	Tam Esnek Sistem	337,00	613,60	2493,92	4689,54
$c = 1,1 \times \bar{d}$	Esnek Olmayan Sistem	361,03	718,09	2287,12	4267,30
	İkili Zincir	215,94	436,97	2054,18	4101,92
	Tam Esnek Sistem	213,76	435,88	2054,18	4101,92

* $\bar{d}=5$ durumunda kapasite hesaplaması ondalıklı sonuçlar verdiği için, bu talep miktarı için düşük kapasite oranı 4, yüksek kapasite oranı 6 olarak belirlenmiştir.

**Şekil 3: İkili Zincir Tasarımının Kullanımıyla Esnek Olmayan Tasarıma Nazaran Tasarruf Edilecek Ortalama Stok Maliyeti (%)**

Diğer yandan, ikili zincirleme tasarımına sahip kısmî esneklik ile tam esnekliğin maliyet performansları arasında belirgin bir fark yoktur. Şekil 3'te de görüleceği üzere sayısal örneklerimiz, kısmî esnekliğin literatürde belirtilen kapasite kullanım oranı, talep karşılama oranı gibi göstergelere ek olarak stok maliyetlerini düşürmek açısından da tam esnekliğe yakın bir performans gösterebildiğini ortaya koymaktadır. Tam esneklik ile zincirleme tasarımı arasındaki ortalama maliyet farkı, tüm talep ve kapasite oranları için yüzde iki buçuğun altında kalmıştır (bkz. Şekil 4). Sayısal çalışmada çözülen 1.000 örnek içinde her ne kadar kısmî esnekliğin yeterliliğini zorlayacak uç örnekler bulunsa da, bu örneklerin sayısı oldukça sınırlıdır. Bu da kısmî esnekliğin ortalama maliyetinin tam esnekliğe yakın olmasını sağlamaktadır.



Şekil 4: Tam Esneklik Tasarımının Kullanımıyla İkili Zincir Tasarımına Nazaran Tasarruf Edilecek Ortalama Stok Maliyeti (%)

3.3. Senaryo Analizleri

Yukarıda sunulan sayısal örnekler, kısmî esnekliğin stok maliyetleri açısından tam esnekliğe oldukça yakın, hatta çoğu zaman aynı sonuçlar üretebildiğini göstermektedir. Ancak karar probleminde meydana gelecek değişiklikler esneklik tasarımlarının maliyet performanslarını etkileyebilir. Bu bölümde işletmelerin karşı karşıya kalabilecekleri sıradışı durumlarda esneklik tasarımlarının performanslarının nasıl etkilendiği incelenecektir.

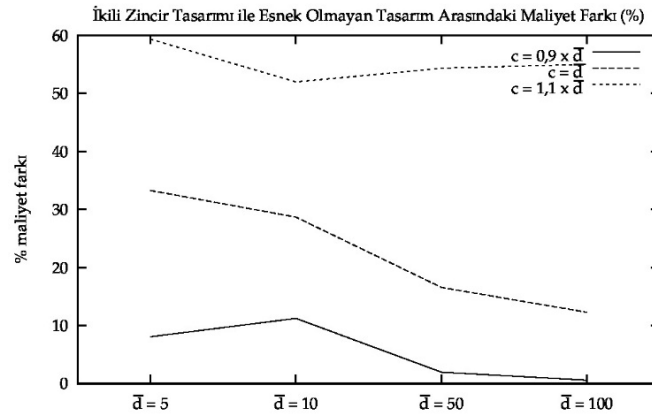
Bu kapsamda üretim sistemlerinde ortaya çıkabilecek iki farklı senaryo incelenecektir. Birinci senaryo, bir üretim hattında oluşabilecek bir makine arızası veya kaza ya da fabrikanın kapatılması veya satılması gibi sebeplerle fabrikalardan birinin üretimi durdurmasıdır. Bu senaryonun incelenmesi amacıyla yukarıda sunulan örnek problemde bir fabrikanın (5 numaralı fabrika) devre dışı kaldığı varsayılarak deney tekrarlanmıştır. Tablo 3, bu yeni varsayım altında farklı esneklik tasarımlarıyla elde edilecek optimal maliyetleri göstermektedir.

Tablo 3: Üretim Sisteminden Bir Fabrika Çıktığı Durumda Farklı Esneklik Düzeyindeki Üretim Sistemlerinde Oluşan Ortalama Maliyetler.

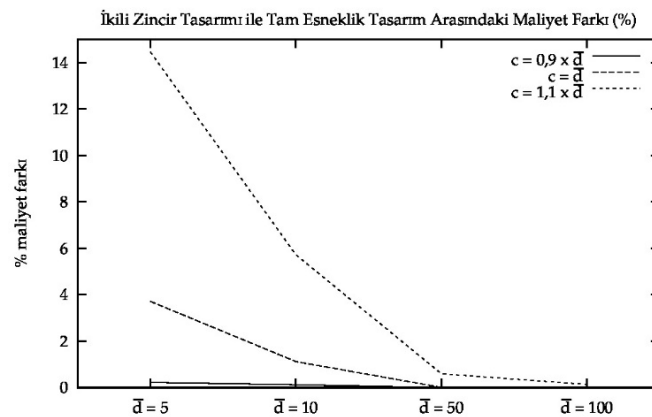
		$\bar{d}=5^*$	$\bar{d}=10$	$\bar{d}=50$	$\bar{d}=100$
$c = 0,9 \times \bar{d}$	Esnek Olmayan Sistem	1386,09	2095,70	9460,99	18632,10
	İkili Zincir	1274,23	1860,20	9274,90	18524,70
	Tam Esnek Sistem	1271,41	1857,97	9274,90	18524,70
$c = \bar{d}$	Esnek Olmayan Sistem	963,92	1697,38	6997,21	13350,30
	İkili Zincir	643,09	1210,53	5838,38	11712,10
	Tam Esnek Sistem	619,21	1197,02	5837,98	11712,10
$c = 1,1 \times \bar{d}$	Esnek Olmayan Sistem	726,98	1434,68	6065,34	11831,00
	İkili Zincir	295,60	688,98	2768,68	5322,77
	Tam Esnek Sistem	252,86	649,57	2752,16	5315,55

* $\bar{d}=5$ durumunda kapasite hesaplaması ondalıklı sonuçlar verdiği için, bu talep miktarı için düşük kapasite oranı 4, yüksek kapasite oranı 6 olarak belirlenmiştir.

Bir fabrikanın devre dışı kalması, sistemdeki toplam üretim kapasitesinin düşmesine neden olacaktır. Bu da üretim sisteminin talepleri karşılama daha fazla zorlanması demektir. Esnek sistemler bu durumda fabrikalar arasında farklı ürünlerin üretimine ihtiyaç doğrultusunda geçiş yaparak ortalama stoksuz kalma miktarını azaltmaktadır. Bu da esnek sistemlerle esnek olmayan sistemler arasındaki stok maliyetlerinin artması demektir (bkz. Şekil 5). Sonuçlarda buna ek olarak kısmî esneklik ile tam esneklik arasındaki maliyet farkında da belirgin bir artış gözlenmektedir (bkz. Şekil 6). Bu artış, özellikle kapasitenin talep ortalamalarından yüksek olduğu ($c = 1,1 \times \bar{d}$) problemlerde, fabrikalarda farklı ürünlere aktarılabilecek artık kapasitelerin daha fazla bulunması sebebiyle %15'e kadar çıkmaktadır. Bu durum, tam esnekliğin üretim kapasitesindeki ani daralmalarda işletmelere daha büyük maliyet avantajları sağladığını ortaya koymaktadır.



Şekil 5: Üretim Sisteminden Bir Fabrika Çıktığı Durumda İkili Zincir Tasarımının Kullanımıyla Esnek Olmayan Tasarıma Nazaran Tasarruf Edilecek Ortalama Stok Maliyeti (%)



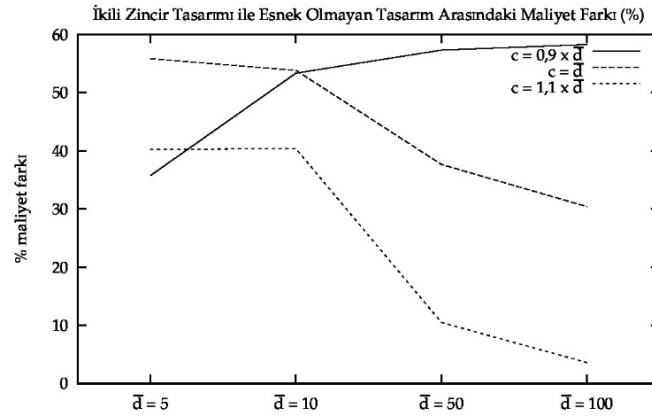
Şekil 6: Üretim Sisteminden Bir Fabrika Çıktığı Durumda Tam Esneklik Tasarımının Kullanımıyla İkili Zincir Tasarımına Nazaran Tasarruf Edilecek Ortalama Stok Maliyeti (%)

Ele alınacak ikinci senaryo, talepte meydana gelecek daralmalardır. Bu amaçla işletme tarafından üretilen ürünlerden birisinin, piyasadan çekilmesi, yasal düzenlemeler, yüksek stok miktarı gibi sebeplerle üretimine ara veya son verilmesi durumu incelenecektir. İlk senaryoda olduğu gibi örnek problemde bu sefer bir ürünün (5 numaralı ürün) devre dışı kaldığı varsayılarak deney tekrarlanmıştır. Tablo 4, bu varsayım altında farklı esneklik tasarımlarıyla elde edilecek optimal maliyetleri göstermektedir.

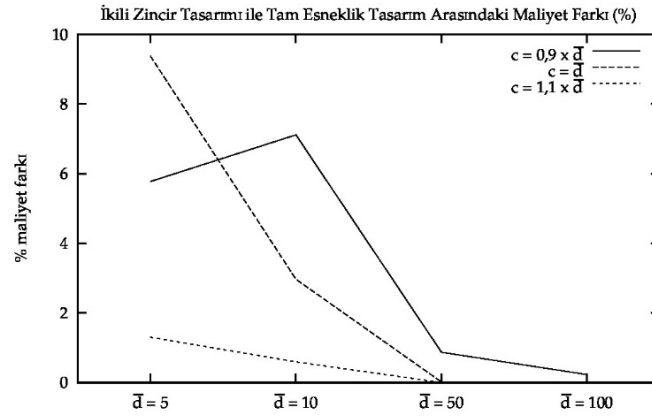
Tablo 4: Üretim Sisteminden Bir Ürün Çıktığı Durumda Farklı Esneklik Düzeyindeki Üretim Sistemlerinde Oluşan Ortalama Maliyetler.

		$\bar{d}=5^*$	$\bar{d}=10$	$\bar{d}=50$	$\bar{d}=100$
$c = 0,9 \times \bar{d}$	Esnek Olmayan Sistem	996,34	1295,24	5423,06	10663,50
	İkili Zincir	640,26	604,21	2314,52	4449,87
	Tam Esnek Sistem	603,29	561,23	2294,38	4439,67
$c = \bar{d}$	Esnek Olmayan Sistem	563,94	906,64	3027,07	5377,99
	İkili Zincir	248,95	418,44	1887,29	3742,79
	Tam Esnek Sistem	225,60	406,03	1886,98	3742,79
$c = 1,1 \times \bar{d}$	Esnek Olmayan Sistem	339,95	656,46	2079,66	3839,04
	İkili Zincir	202,97	391,52	1861,66	3701,37
	Tam Esnek Sistem	200,33	389,20	1861,66	3701,37
* $\bar{d}=5$ durumunda kapasite hesaplaması ondalıklı sonuçlar verdiği için, bu talep miktarı için düşük kapasite oranı 4, yüksek kapasite oranı 6 olarak belirlenmiştir.					

Tablo 4'ten anlaşılacağı üzere esnek tasarımların esnek olmayan tasarımlara üstünlüğü bu senaryoda da yüksektir (bkz. Şekil 7). Kısmî esneklik ile tam esneklik arasındaki fark ise bu senaryoda kapasitenin talep ortalamalarından düşük olduğu ($c = 0,9 \times \bar{d}$), problemlerde daha yüksektir (bkz. Şekil 8). Bu problemlerde üretimi duran ürün sebebiyle kapasitesi kullanılmayan fabrikanın diğer ürünleri üretmesi ön plandadır. Kapasitelerin düşük olduğu problemlerde boş kalan fabrikaya duyulan ihtiyaç fazla olduğu ve tam esneklik tasarımında fazla kapasite daha kolay biçimde dağıtıldığından maliyetler de düşmüştür.



Şekil 7: Üretim Sisteminden Bir Ürün Çıktığı Durumda İkili Zincir Tasarımının Kullanımıyla Esnek Olmayan Tasarıma Nazaran Tasarruf Edilecek Ortalama Stok Maliyeti (%)



Şekil 8: Üretim Sisteminden Bir Ürün Çıktığı Durumda Tam Esneklik Tasarımının Kullanımıyla İkili Zincir Tasarımına Nazaran Tasarruf Edilecek Ortalama Stok Maliyeti (%)

Bu sonuçlardan anlaşılacağı üzere, esnek tasarımlar yalnızca gerçekleşen farklı talepleri karşılamakla kalmamakta, aynı zamanda işletmede ortaya çıkabilecek sıra dışı durumlarda da firmaya önemli ölçüde maliyet avantajları sağlamaktadır. Kısmî esneklik tasarımı, özellikle bağlantılar kendi aralarında zincir şeklinde sıralandığında tam esnekliğin sağladığı avantajların büyük kısmını sağlayabilmektedir. Bu iki tasarım arasındaki maliyet avantajları arasındaki farkın miktarı problem tanımına göre değişkenlik gösterebilir. Ancak her problemde kısmî esnekliğin esnek olmayan tasarımlara belirgin bir üstünlük sağladığı görülmektedir. Bu sonuçlar, tam esnekliğin ideal esneklik tasarımı olduğunu, ancak özellikle tam esneklik için gereken yatırımın çok yüksek olduğu durumlarda kısmî esnekliğin tercih edilebilir olduğunu göstermektedir.

4. Sonuç ve Tartışma

Bu çalışmada kapasite kısıtı ve süreç esnekliği varsayımları altında çok dönemli deterministik stok sistemleri için indirgenmiş stok maliyetlerini optimize edecek DP modeli sunulmuştur. Sunulan model birden fazla ürün ve fabrikanın bulunduğu esnek sistemlerde elde bulundurma, üretim ve ceza maliyetlerini dikkate alarak optimal üretim

politikalarını bulmaktadır. Bildiğimiz kadarıyla, geliştirilen model, literatürde bu problemin çözümü için ilk defa sunulmaktadır.

Çalışmanın literatüre yaptığı diğer bir katkı, süreç esnekliğinde farklı tasarımların çok dönemli planlama ufkunda stok maliyetleri açısından karşılaştırılmasıdır. Mevcut literatürde süreç esnekliği kapasite kullanım oranı ve talep karşılama oranı gibi yönetsel göstergeler üzerinden değerlendirilmiştir. Bu göstergeler sistem tasarımının kabiliyetini ölçmede kullanıldığından geçmiş dönemlerden taşınan stok göz ardı edilmiştir. Bu çalışma kapsamında çözülen sayısal örnekler, geçmiş dönemden taşınan stokların süreç esnekliğinin faydalarını bertaraf etmediğini ortaya koymaktadır. Sayısal sonuçlar süreç esnekliğine sahip sistemlerin elde kalan stokların taşınması varsayımıyla dahi esnek olmayan sistemlere nazaran stok maliyetlerini düşürdüğünü ortaya koymaktadır. Buna ek olarak, elde edilen sonuçlar kısmî esneklik içeren sistemlerin neredeyse tam esnek sistemler kadar verimli olabileceğini göstermektedir.

Kısmî esneklik tasarımıyla tam esneklik tasarımı arasında yapılan karşılaştırmalarda elde edilen sonuçlar kısmî esneklik içeren sistemlerin neredeyse tam esnek sistemler kadar verimli olabileceğini göstermektedir. Ancak yapılan senaryo analizlerinde kısmî esnekliğin, tam esnekliğin sağladığı maliyet avantajlarının önemli bir bölümünü karşılayamadığı sıradışı örnekler de görülmektedir. Bu durum, tam esnekliğin stok maliyetleri açısından ideal esneklik tasarımı olduğunu, ancak farklı sebeplerle uygulanması mümkün olmadığında kısmî esnekliğin de maliyetleri önemli ölçüde düşürebilecek bir tercih olabileceğini ortaya koymaktadır.

Bu çalışmanın kısıtları arasında en önemlisi, sayısal örneklerde 10 ürün, 10 fabrika içeren, nispeten küçük bir sistemin kullanılmasıdır. Daha büyük sistemler için tam esneklik tasarımının kısmî esnekliğe nazaran daha belirgin bir fayda sağlaması mümkündür. Ayrıca deterministik taleplerin yerine stokastik taleplerin kullanılması, sisteme tedarik süresinin eklenmesi ve farklı kısmî esneklik tasarımlarının da sayısal karşılaştırmalara dahil edilmesi bu çalışmanın bulgularını geliştirmek adına gelecek çalışmalar için doğal yönelimler olacaktır.

KAYNAKÇA

- Akşin, O. Z., & Karaesmen, F. (2007). "Characterizing the performance of process flexibility structures", *Operations Research Letters*, 35(4), 477-484.
- Albino, V., Garavelli, A. C. (1999), "Limited Flexibility in Cellular Manufacturing Systems: A Simulation Study", *International Journal of Production Economics*, 60-61, 447-455.
- Andreou, S. A. (1990), "A Capital Budgeting Model for Product-Mix Flexibility", *Manufacturing and Operations Management*, 3 (1), 5-23.
- Athey, S., & Schmutzler, A. (1995). "Product and process flexibility in an innovative environment". *The Rand Journal of Economics*, 557-574.
- Browne, J., Dubois, D., Rathmill, K., Sethi, S. P., Stecke, K. E. (1984), "Classification of Flexible Manufacturing Systems", *The FMS magazine*, 2(2), 114-117.

- Chou, M. C., Teo, C. P., Zheng, H. (2008), “Process Flexibility: Design, Evaluation, and Applications”, *Flexible Services and Manufacturing Journal*, 20, 59-94.
- Chou, M. C., Chua, G. A., Teo, C.-P. (2010), “On range and response: Dimensions of Process Flexibility”, *European Journal of Operational Research*, 207(2), 711-724.
- De Toni, A., Tonchia S. (1998), “Manufacturing Flexibility: A Literature Review.” *International Journal of Production Research*, 36(6), 1587–1617.
- Fine, C. H., Freund, R. M. (1990), “Optimal Investment in Product-Flexible Manufacturing Capacity”, *Management Science*, 36 (4), 449-466.
- Francas, D., Kremer, M., Minner, S., Friese, M. (2009), “Strategic Process Flexibility Under Lifecycle Demand”, *International Journal of Production Economics*, 121, 427-440.
- Francas, D., Lohndorf N., Munner S. (2011), “Machine and Labor Flexibility in Manufacturing Networks.” *International Journal of Production Economics*, 131, 165–174.
- Garavelli, A. C. (2001), “Performance Analysis of a Batch Production System with Limited Flexibility”, *International Journal of Production Economics*, 69, 39-48.
- Graves, S. C., & Tomlin, B. T. (2003). “Process flexibility in supply chains”, *Management Science*, 49(7), 907-919.
- Gustavson, Sten-Olof (1984), “Flexibility and Productivity in Complex Production Processes”, *International Journal of Production Research*, 22(5), 801-808.
- He, P., Xu, X., Hua, Z. (2012), “A New Method For Guiding Process Flexibility Investment: Flexibility Fit Index”, *International Journal of Production Research*, 50(14), 3718-3737.
- Jaikumar, R. (1984), “Flexible Manufacturing Systems: A Managerial Perspective”, *Harvard Business School*, (Boston, MA).
- Jain, A., Jain, P. K., Chan, F. T. S., Singh, S. (2013), “A Review on Manufacturing Flexibility”, *International Journal of Production Research*, 51(19), 5946–5970.
- Jordan, W. C., Graves, S. C. (1995), “Principles on the Benefits of Manufacturing Process Flexibility”, *Management Sciences*, 41(4), 577- 594.
- Mandelbanm, M., Buzacott, J. (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.
- Rogers, P. P., Ojha, D., White R. E. (2011), “Conceptualizing Complementarities in Manufacturing Flexibility: A Compressive View.” *International Journal of Production Research* 49(12), 3767–3793.
- Sethi, A. K., Sethi, S. P. (1990), “Flexibility in Manufacturing: A Survey”, *The International Journal of Flexible Manufacturing Systems*, 2, 289-328.

- Upton, D. M. (1995), “Flexibility as process mobility: The Management of Plant Capabilities for Quick Response Manufacturing”, *Journal of Operations Management*, 12, 205-224.
- Van Biesebroeck, J. V. (2007), “Complementarities in Automobile Production”, *Journal of Applied Econometrics*, 22, 1315–1345.
- Yu, D. Z., Tang, S. Y., Niederhoff, J. (2011), “On The Benefits of Operational Flexibility in a Distribution Network with Transshipment”, *Omega*, 39, 350-361.

Production Flexibility and Inventory Management: A Decision Support Model For Inventory Optimization

Mustafa ÇİMEN
Hacettepe University
Faculty of Economics and
Administrative Sciences,
Department of Business
Administration
Ankara, Turkey
mcimen@hacettepe.edu.tr

Sedat BELBAĞ
Gazi University
Faculty of Economics and
Administrative Sciences,
Department of Business
Administration
Ankara, Turkey
sedatbelbag@gazi.edu.tr

Mehmet SOYSAL
Hacettepe University
Faculty of Economics and
Administrative Sciences,
Department of Business
Administration
Ankara, Turkey
mehmetsoysal@hacettepe.edu.tr

Extensive Summary

Uncertainty is one of the major factors considered by companies in order to gain competitive advantage. Shorter product life-cycles and delivery times, higher technology and global competition and more personalized products cause internal and external uncertainties (Jain et al., 2013: 5946). Demand is one of the most important uncertainty sources for a company in a highly competitive environment (De Toni and Tonchia, 1998: 1588). Increases or decreases in demands directly affects the production and inventory policies of the companies. Thus, companies try to change production systems into flexible system to decrease negative effects of demand uncertainties.

Flexibility for businesses can be defined as the skill of adaptation to the internal or external based uncertainties (Gustavson, 1984: 802). Flexibility provides a competitive advantage for companies by enabling manufacturing a wider range of products in their facilities (Upton, 1995: 206). For instance, BMW minimizes the negative effects of 2008 economic crisis with the implementation of flexibility in their production system (Rogers et al., 2011: 3767). According to Sethi and Sethi (1990: 289-328), the major flexibility variations can be listed as; machine flexibility (multi-functional machines), process flexibility (manufacturing two or more products in a single facility), product flexibility (ability to change product specifications without high costs), routing flexibility (ability of adding new production lines into the current system) and volume flexibility (ability to increase or decrease production volume with small changes in production system).

Process flexibility is the ability of changing the product variety or quantity in a facility with minimum resources (Jordan and Graves, 1995: 578). Process flexibility aims to change production from one product to another without enduring long machine setup times and high setup costs (Browne et al., 1984: 114). Improvements in production technologies allow companies to implement process flexibility for tackling with demand uncertainties. Equipping production systems with high technology multi-functional machines makes building facilities which can perform different tasks possible (Jain et al. 2013: 5948).

Academic interest in process flexibility began to increase in early 80's with developments of new technologies in production systems. The preliminary studies on process flexibility generally focused on either dedicated systems (a single product is manufactured in each facility) or full flexibility (each facility can manufacture every product). Due to the high setup costs, full flexibility restricts the applicability of process flexibility in real world applications. Hence, academic and practical interest remained limited until the seminal work of Jordan and Graves (1995: 577- 594). Jordan and Graves suggest a new flexibility variation, limited process flexibility. They show that limited flexibility can procure almost all of the benefits of full flexibility with significantly less investment, if it is designed properly. They suggest chaining the production links between the factories and the products. They define chains as "a group of products and plants which are all connected, directly or indirectly, by product assignment decisions". This strategy allows the decision maker to shift the production along the chain, so that higher demand variations can be accommodated through a limited flexibility investment, even by producing only two products in each factory. Figure 1 illustrates a sample design of different flexibility systems for 5 products and 5 facilities.

Even though process flexibility is a useful tool for tackling with demand uncertainty, it has a potential to increase production costs because of acquiring high technology machines, training employees and redesigning facility layout. Furthermore, process flexibility complicates production and inventory policies. Manufacturing two or more products in facilities turns finding the optimal production decisions into a multi-dimensional decision problem.

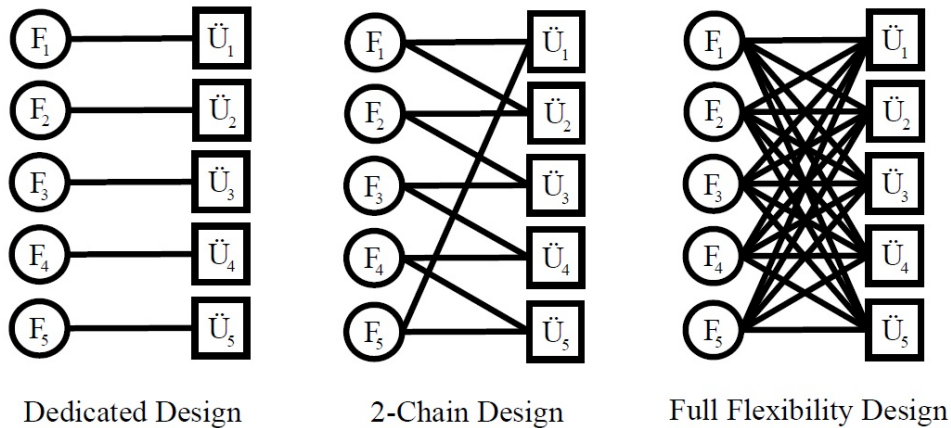


Figure 1: Sample System Designs for a 5-Product, 5-Factory System

This study aims to investigate the problem of determining the optimal production decisions with considering process flexibility in finite planning horizon. A Linear Programming (LP) model is developed and solved for this purpose. Moreover, using the LP model we made comparisons among different types of flexibility designs in terms of inventory costs.

We address a multi-product, multi-facility deterministic inventory optimization problem under process flexibility assumption. It is assumed that each product may be produced by one or more facilities and each facility may produce more than one product; however, any chaining strategy or full flexibility is not required. The ability of factory f to produce product p is called a *link* between factory f and product p . Periodic

review is assumed, meaning that the state of the system is checked and replenishment decisions are made periodically. The predefined time points to make these decisions are called the review points, and the fixed time between each review point is called a period or cycle.

The production cost of a product may vary among factories, because of specialization, different transportation costs, different technologies, etc., and is defined separately for each factory-product pair. Holding and penalty costs are defined for each product. Throwing away the excess inventory which exceeds the storage limit is assumed to have no cost, except for the production costs of the unused inventory. Finally, we use a discount rate in order to take the time value of money into account. The immediate costs and future costs are assumed to have different importance to the decision maker. Holding/not holding an amount of money by paying for any cost later/earlier causes an opportunity reward/cost. Hence, all of the future costs are discounted by a discount rate, reflecting the importance of this time value.

For this problem, the objective function of the developed LP model aims to minimize the inventory costs comprised of production, holding and shortage costs. This objective function is optimized subject to a number of constraints, including tracking inventory levels for calculating shortage and excess inventory quantities and ensuring that production and inventory amounts do not exceed corresponding capacities. The decision variables in the model to be optimized are the production amounts in each facility for each product.

The applicability of the model is tested on a hypothetical problem. The problem comprises three different process flexibility options (i.e., dedicated, 2-chain and full flexibility; see Figure 2) in a production system with 10 products and 10 facilities. Demands for the products are generated from Poisson distribution where average demand for each product is equal ($d_1 = d_2 = d_3 = \bar{d}$). The planning horizon has five periods and the demand is a priori for each period. Sensitivity analyses have been done through using different capacity limits and demand averages.

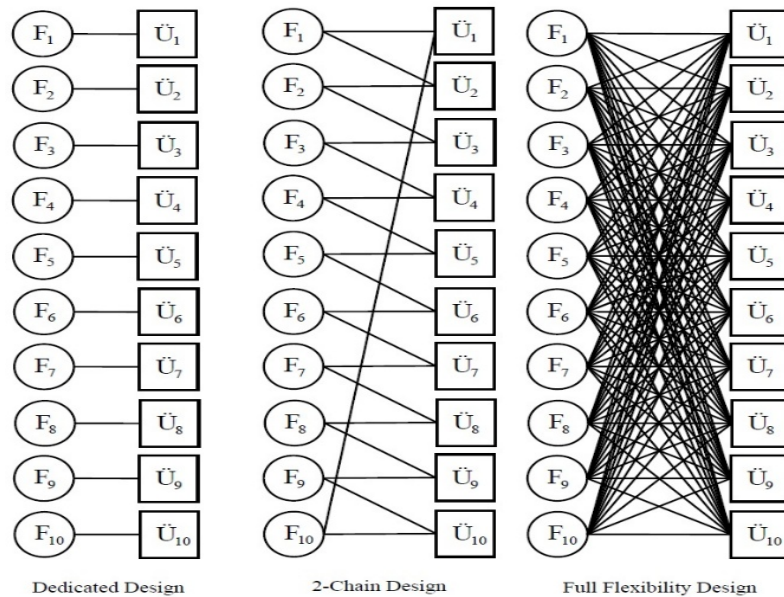


Figure 2: Experimental Flexibility Designs For Production and Inventory Systems

The results presented in Table 1 show that the systems with process flexibility (2-chain, full flexibility) outperform dedicated designs in terms of total inventory cost. Process flexibility integrated systems can provide up to 40% reductions in average total inventory costs compared to dedicated systems (Table 1). These savings are more significant especially for the cases where the production capacities are higher than average demand. This is due to the fact that process flexibility allows employing the excess capacity by manufacturing multiple products. In scenarios with lower capacities, facilities focus on manufacturing a single product to satisfy its demand, and do not have room for producing a second product. One more insight worth to be mentioned here is that the cost savings obtained from limited process flexibility and full flexibility systems are almost the same.

The literature on the topic claims that limited flexibility provides most of the benefits of using full flexibility in terms of demand coverage and capacity usage rate (see for instance Graves and Tomlin, 2003: 907-919; Chou et al., 2008: 59-94). Our findings, therefore, comply with the existing literature and extend it by showing that these systems perform closely to each other in terms of inventory costs as well.

Table 1: Average Total Inventory Costs of Different Flexibility Designs

		$\bar{d}^*=5$	$\bar{d}=10$	$\bar{d}=50$	$\bar{d}=100$
$Capacity = 0,9 \times \bar{d}$	Dedicated Design	1093,66	1436,97	6063,35	11813,60
	2-Chain Design	972,67	1182,89	5848,45	11687,80
	Full Flexibility Design	969,64	1181,76	5848,45	11687,80
$Capacity = \bar{d}$	Dedicated Design	610,66	993,75	3382,19	5905,46
	2-Chain Design	345,87	616,02	2493,92	4689,54
	Full Flexibility Design	337,00	613,60	2493,92	4689,54
$Capacity = 1,1 \times \bar{d}$	Dedicated Design	361,03	718,09	2287,12	4267,30
	2-Chain Design	215,94	436,97	2054,18	4101,92
	Full Flexibility Design	213,76	435,88	2054,18	4101,92

* \bar{d} refers to average demand.

In this study we present a decision support tool that can be used by decision makers in production management. The developed model also allows us to present the benefits of process flexibility in terms of total inventory costs. Moreover, we provide a comparison of dedicated, 2-chain and full flexibility designs by means of the model. The comparison shows that investing in limited flexibility can sufficiently provide most of the benefits of full flexibility in terms of inventory cost without bearing the high initialization costs of full flexibility.