

# SÜREÇ ESNEKLİĞİ VARSAYIMI ALTINDA STOKASTİK STOK OPTİMİZASYONU PROBLEMİNİN DİNAMİK PROGRAMLAMA İLE ÇÖZÜMÜ

Mustafa ÇİMEN<sup>1</sup>

Sedat BELBAĞ<sup>2</sup>

## ÖZ

Rekabetin yüksek olduğu sektörlerde, üretim süreçleri esnek yapıda olan işletmeler rakiplerine karşı rekabet avantajı sağlayabilmektedir. Süreç esnekliği, birden çok ürün çeşidininin bir ya da birçok tesiste üretilebilme yeteneğidir. İşletmeler gerekli teknolojiye sahip makinelerin alınması, işgörenlerin eğitimi, tesislerin yeniden tasarımı gibi faaliyetler ile süreç esnekliğine sahip sistemler oluşturabilir. Süreç esnekliği rekabet avantajı sağlamasına rağmen üretilen ürün sayısını ve çeşidini arttırmamasından dolayı stok yönetimini karmaşık hale getirmektedir. Bu çalışmada, süreç esnekliği ve kapasite kısıtı varsayımları altında stokastik stok optimizasyonu problemi Markov Karar Süreci olarak modellenip, Dinamik Programlama yöntemi ile çözülmektedir. Önerilen model için 4 farklı süreç esnekliği problemini optimal olarak çözmüştür. Optimal sonuçlar, karar vericilerin eksik bilgi ile aldığı kararları temsil edecek basit bir politika olan Deterministik Miyopik Politika ile karşılaştırılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Süreç Esnekliği, Stokastik Stok Optimizasyonu, Markov Karar Süreci, Dinamik Programlama

---

<sup>1</sup> Dr., Hacettepe Üniversitesi, İ.İ.B.F., İşletme Bölümü, Sayısal Yöntemler Ana Bilim Dalı, mcimen@hacettepe.edu.tr

<sup>2</sup> Dr., Gazi Üniversitesi, İ.İ.B.F., İşletme Bölümü, Üretim Yönetimi Ana Bilim Dalı, sedatbelbag@gazi.edu.tr

**STOCHASTIC INVENTORY OPTIMIZATION PROBLEMS UNDER  
PROCESS FLEXIBILITY ASSUMPTION: DYNAMIC  
PROGRAMMING SOLUTION**

**ABSTRACT**

Flexible manufacturing process provides competitive advantage over rivals in high competitive industries. Process Flexibility is an ability to change the volumes and range of products in one or more production facilities. Companies integrate process flexibility into their systems by using high technology machines, educating workers or redesigning facility layouts. Although process flexibility ensures competitive advantage, it complicates inventory management due to high product volumes and ranges. This study aims to model stochastic inventory optimization problem under process flexibility assumption as a Markov Decision Process and solve the model with Dynamic Programming. Our model optimally solve four different process flexibility problem. To illustrate importance of optimal policies, optimal results compare with Deterministic Myopic Policy which represents the imperfect decisions of decision makers.

Keywords: Process Flexibility, Stochastic Inventory Optimization, Markov Decision Process, Dynamic Programming

## GİRİŞ

Esneklik, kısaca değişime uyum sağlama yeteneği olarak tanımlanmaktadır (Gustavson, 1984). Bir işletme için değişim kaynağı faktörler talepteki değişim, hammadde fiyatlarındaki değişim, yasal düzenlemeler gibi dışsal olabileceği gibi, işgücündeki değişim, üretim araçlarındaki veya yöntemlerindeki değişim gibi içsel kaynaklı da olabilir. Esnek bir yapıya yatırım yapan işletmeler, değişimler ile başa çıkmayı ve herhangi bir değişim karşısında hızlıca tepki vererek olumsuz durumlardan az derecede etkilenip, fırsatlardan yüksek derecede fayda sağlamayı amaçlamaktadır.

Tedarik zinciri yönetimi açısından esneklik, tedarik zincirinin, çevresindeki değişimlere hızla cevap verebilmesidir (Seebacher ve Winkler, 2015). Bu kapsamda esnekliği arttıracak stratejiler geliştirilmesi ile rakiplere karşı avantaj sağlanması amaçlanmaktadır (Wadhwa vd., 2008). Tedarik zinciri yönetiminde esneklik çeşitlerine makine esnekliği, işgören esnekliği, rotalama esnekliği ve süreç esnekliği örnek olarak gösterilebilir (Tang ve Tomlin, 2008; Sethi ve Sethi, 1990; Stevenson ve Spring, 2009). Bu çalışmada, bahsedilen esneklik çeşitleri içerisinde süreç esnekliği incelenmektedir.

Süreç esnekliği, tesislerin üretim hacimlerini ve/veya tesiste üretilmekte olan ürünü kolayca değiştirebilme yeteneğidir (Jordan ve Graves, 1995). Süreç esnekliğinin temel amacı, uzun makine hazırlık süresi ve yüksek hazırlık maliyetine katlanmadan bir ürünün üretiminden başka bir ürünün üretimine geçebilmektir (Browne vd., 1984). Süreç esnekliğine sahip işletmeler, ürün karmasına yönelik değişen talepleri karşılayabilmek için tesislerinde üretilen ürünlerin çeşidini ve sayısını yeniden düzenleyebilmektedir. Bu sayede stok miktarlarının ve stok maliyetlerinin düşürülmesi amaçlanmaktadır (Carter, 1986). Ancak, süreç esnekliğine sahip bir üretim sistemi oluştururken gerekli teknolojiye sahip makinelerin alınması, işgörenlerin eğitimi ve tesis içi yerleşimin değiştirilmesi gibi yatırım maliyetleri ortaya çıkabilmektedir. Bu sebeple, süreç esnekliğinin en büyük olası dezavantajı ortalama üretim maliyetlerinde artışa neden olmasıdır (Chou vd., 2008).

Diğer yandan, süreç esnekliği işletmelerin üretim stratejilerini de doğrudan etkiler. Süreç esnekliğine gerekli yatırımları yapan bir işletme üretim stratejisini, her bir ürünü farklı üretim tesislerinde veya tüm ürünleri tek bir üretim tesisinde üretme olarak belirleme şansına sahip olur (Upton, 1995). Otomotiv endüstrisinde yaygın üretim stratejisi her bir ürünün farklı üretim tesislerinde üretilmesi yerine tek bir üretim tesisinde birçok ürünün üretilmesi olarak değişmektedir (Chou vd., 2008). Örneğin, Chrysler ve Volkswagen üretim tesislerini gerektiği zaman farklı ürünleri aynı üretim tesisinde

üretebilecek esnek bir yapıya sahip olacak şekilde dönüştürmüştür (Francas vd., 2009). Biesebroeck (2007), çalışmasında Japonya ve Amerika menşeli araba üreticilerinin üretim sistemlerindeki esneklik artışını incelemektedir. Çalışmaya göre, eğer otomobil üreticisi işletmeler iç kaynaklarını kullanarak esnek bir yapıya ulaşırsa, birden fazla ürün üretmenin neden olduğu verimlilik düşüşünden daha az etkilenmektedir.

Süreç esnekliği, stok yönetimi literatüründe ürünleri birçok kaynak<sup>3</sup> kullanarak üretilmesini sağlayan bir uygulama türüdür. Treleven ve Schweikhart (1988) çoklu kaynak kullanımının talebin karşılanamaması riskini azalttığını belirtmektedir. Benzer olarak Berger ve Zeng (2006), tek kaynak kullanımının tedarik zincirinde yer alan aktörler arasındaki ilişkileri kuvvetlendirmesine rağmen, birçok durumda talep kaynaklı riski azaltmada etkili olmadığını söylemektedir. Ferdows ve Carabetta (2006) çok kaynak kullanımı ile üretim yapan bir sistemdeki süreç esnekliğinin stok bulundurma ve stoksuz kalma durumları üzerindeki etkisini incelemektedir. Süreç esnekliğine sahip üretim sistemlerinin sahip olmayan sistemlere göre daha az stok bulundurması yeterli olurken, stoksuz kalma olasılığı azalmaktadır. Iravani vd. (2014), süreç esnekliğinin ürün ikamesi yoluyla sağlanmasına olanak veren modelin optimizasyonuna odaklanmaktadır. Bu problemi stoğa üretim, stokastik üretim zamanı ve stokastik talep varsayımları altındaki bir model üzerinde ele almaktadır. Modelin sonuçlarına göre süreç esnekliğinin düzeyi arttıkça ikame ürünün üretim maliyetleri düşmekte, tesisin üretim kapasitesi artmakta ve stok bulundurma maliyetleri düşmektedir.

Süreç esnekliği, işletmelere bu ve benzeri faydalar sağlamakla beraber, stok yönetimini karmaşık hale getirmektedir. Stok yönetiminin temel amacı talebi zamanında karşılayabilecek üretim ve stok miktarlarını tahmin edebilmektir. İşletmelerin gereğinden fazla stok bulundurması maliyetleri arttırırken, gereğinden az stok bulundurması ise taleplerin karşılanamamasına neden olmaktadır. Süreç esnekliği özellikle talepteki değişime hızla ayak uydurmayı sağladığından, yüksek stok ihtiyacını ortadan kaldırır ve satış kayıplarını azaltır. Ancak, birden çok ürünün bir üretim tesisinde üretilmesi, optimal üretim ve stok miktarlarının hesaplanmasını zorlaştırmaktadır. Süreç esnekliğine sahip üretim sistemlerinde stok optimizasyonu çok boyutlu bir karar problemidir. Her tesiste farklı ürünlerin üretilmesi karar alternatiflerinin ve olası stok pozisyonlarının sayısını üssel olarak arttırmaktadır. Esnek üretim sistemlerinde ürün ve üretim tesisi sayısı arttıkça problemin karmaşıklık seviyesi artmaktadır. Bunun yanında, üretim tesislerinin sınırlı kapasiteye sahip

---

<sup>3</sup> Burada kaynak (source) işletmenin sahip olduğu tesis ya da üretim hattı olabilir.

olması ve her bir ürüne ayrılacak kapasite miktarının belirlenmesi gibi etkenler problemi giderek zorlaştırmaktadır.

Bu çalışma, süreç esnekliğine sahip üretim sistemlerinin optimal stok kararlarını belirlemek için Dinamik Programlama (DP) yöntemini önermektedir. Bu amaçla süreç esnekliği ve kapasite kısıtı varsayımları altında stokastik stok optimizasyonu problemi (buradan itibaren süreç esnekliği problemi olarak anılacaktır) Markov Karar Süreci (MKS) olarak modellenip, DP yöntemi ile çözülmektedir. Bu makale şu şekilde devam edecektir: Çalışmanın ikinci bölümünde dikkate alınan stokastik stok optimizasyonu probleminin varsayımları sunulmaktadır. Üçüncü bölümde problemin MKS modeli detaylı olarak anlatılmaktadır. Dördüncü bölümde küçük boyutlu örnek problemler, dinamik programlama yöntemi ile çözülmekte ve bu çözümler deterministik miyopik politikanın (DMP) sonuçlarıyla karşılaştırılmaktadır. Son bölümde ise, gelecekte yapılabilecek çalışmalara ilişkin öneriler sunulmaktadır.

## 1. SÜREÇ ESNEKLİĞİ VARSAYIMI ALTINDA STOKASTİK STOK OPTİMİZASYONU PROBLEMİ

Bu çalışmada, stokastik stok optimizasyonu problemi, süreç esnekliği ve kapasite kısıtı varsayımları altında incelenmektedir. Süreç esnekliği varsayımı gereği olarak bir ürün birden çok üretim tesisinde üretilebilir ve bir üretim tesisi birden çok ürünü üretebilir.  $f$  üretim tesisinde  $p$  ürünü üretme olanağı bu çalışmada  $f$  ve  $p$  arasındaki bir bağlantı (link) şeklinde sembolize edilecek ve  $l_{f,p}$  şeklinde gösterilecektir ( $l_{f,p} = 1$  bağlantının varlığını,  $l_{f,p} = 0$  ise bağlantının olmadığını göstermektedir). Varsayılan üretim sisteminde maksimum üretim tesisi sayısı  $F$  ve maksimum ürün sayısı  $P$  ile gösterilmektedir.

Üretim tesislerinde üretilen ürünler depolarda stoklanır ve talepler bu stoklardan karşılanır. Bir üretim tesisinde üretilen ürün miktarı ile depoda tutulan stok miktarı sırasıyla üretim tesisi ve depo kapasiteleri ile sınırlıdır. Bir üretim tesisinde üretilen ürünün değiştirilmesi için yapılacak makine hazırlık zamanları göz ardı edilmiştir. Maksimum stok kapasitesini aşan ürünlerin maliyetsiz olarak imha edildiği varsayılmıştır. Stoksuz kalma durumunda talep ertelenemediği için satış kaybı olduğu kabul edilir ve toplam maliyete, kaybedilen talep miktarı ile doğru orantılı bir ceza maliyeti ( $\Theta$ ) eklenir. Her dönemin sonunda elde kalan stoklar ise, elde kalan stok miktarı ile doğru orantılı bir elde bulundurma maliyetine ( $H$ ) sebep olur. Üretim tesislerinde üretilen ürün çeşidinin sayısı, tesislerin bulunduğu konuma göre değişen taşıma maliyetleri ve farklı teknolojik özelliklere sahip makinelerden dolayı üretim maliyetleri, her bir ürün ve tesisi ikilisi için farklılık gösterir. Bu yüzden birim

üretim maliyeti ( $u_{f,p}$ ) her üretim tesisi-ürün ikilisi için ayrı olarak tanımlanmıştır.

Sonuç olarak, modelde birim üretim maliyeti, elde bulundurma maliyeti ve ceza maliyeti olmak üzere üç doğrusal maliyet, üretim tesisi ve depoların sınırlı kapasiteleri ve stokastik talep olduğu varsayılmaktadır. Modelin amacı, uzun dönemde beklenen indirgenmiş stok maliyetlerini minimize edecek optimal stok politikasını bulmaktır.

## 2. PROBLEMİN MARKOV KARAR SÜRECİ MODELİ

Markov Karar Süreci ardışık karar verme problemlerinin modellenmesinde sık kullanılan yöntemlerden biridir. Ele alınan süreç esnekliği probleminde, modeldeki durumlar ( $s$ ), sistemdeki ürünlerin üretim seviyeleri ile tanımlanmıştır. Matematiksel ifade ile,  $P$  sistemdeki ürün sayısı,  $i_p$  ise  $p$  ürününün dönem başındaki stok durumuysa herhangi bir durum:

$$S = \{i_1, i_2, \dots, i_P\} \quad (2.1)$$

şeklinde gösterilebilir. Bu durumda,  $i_p^{max}$  bir  $p$  ürünü için maksimum ürün depolama kapasitesi ise durum uzayı:

$$S = \{(i_1, i_2, \dots, i_P); 0 \leq i_p \leq i_p^{max} \quad \forall 1 \leq p \leq P\} \quad (2.2)$$

olacaktır.

Her dönemin başında sistemin durumu kontrol edilir. Karar verici üretim merkezleri ve ürünler arasındaki bağlantıları dikkate alarak her bir üretim tesisinde ( $f = 1, 2, \dots, F$ ) üretilen her ürünün ( $p = 1, 2, \dots, P$ ) o tesisteki üretim miktarını ( $q_{f,p}$ ) belirler. Tüm bağlantılardaki üretim miktarı kararları, olası bir kararı ( $a$ ) oluşturur. Bir tesisteki toplam üretim miktarı o tesisin kapasitesini geçemeyeceğinden, eğer  $A$  tüm olası kararların (üretim kapasiteleri dikkate alınarak verilen olası üretim kararları) kümesi ise, bu kümeyi oluşturan her bir karar şu şekilde tanımlanabilir:

$$a = q_{f,p}; \sum_{p=1}^P \frac{q_{f,p}}{c_f} \leq 1 \quad \forall f \text{ ve } p; l_{f,p} = 1 \quad (2.3)$$

Burada,  $c_f, f$  üretim tesisinin maksimum kapasitesini göstermektedir. Stok seviyeleri gerçekleşen üretim ve talebe göre değişir. Karar öncesindeki

stok seviyesi ( $i_p$ ) herhangi bir  $a$  kararının tercih edilmesi ile karar sonrası stok seviyesine ( $i_p^a$ ) şu şekilde dönüşür:

$$i_p^a = i_p + \sum_{f=1}^F q_{f,p} \quad (2.4)$$

Karar sonrasındaki durum, ilgili dönemde talebi karşılamak için kullanılabilecek stok miktarlarını gösterir. Bir sonraki dönem başındaki stok durumu her bir ürün için gerçekleşen talep ( $D_p$ ) miktarına göre şu şekilde belirlenir:

$$i_p \leftarrow \max(0, \min(i_p^{max}, i_p^a - D_p)) \quad (2.5)$$

Bir sonraki dönemin başında elde bulunan stok miktarı, tesislerin kapasite sınırı bulunduğu ve kapasite fazlası stoklar imha edildiği için maksimum depolama kapasitesi ya da elde kalan stok miktarı arasından minimum olan olacaktır. Ayrıca, talebin stoklar ve üretim miktarı toplamından büyük olduğu durumlarda ise, bir sonraki döneme negatif stok aktarılamayacağı için bir sonraki dönem başlangıç stoğu sıfır olacaktır. Özetle, her bir ürünün stok seviyesine ait geçiş fonksiyonu şu şekilde yazılabilir:

$$i_p \leftarrow \max\left(0, \min\left(i_p^{max}, \left[i_p + \sum_{f=1}^F q_{f,p} - D_p\right]\right)\right) \quad (2.6)$$

Bir durumdan başka bir duruma geçerken elde edilen beklenen ödül<sup>4</sup> ( $R$ ), üretim, elde bulundurma ve ceza maliyetlerinin toplamından oluşur. Üretim maliyetinin doğrusal olduğu varsayılmıştır. Herhangi bir  $p$  ürünü için ilgili dönemdeki toplam üretim maliyeti şu şekilde hesaplanır:

$$U_p = \sum_{f=1}^F u_{f,p} q_{f,p} \quad (2.7)$$

---

<sup>4</sup> Beklenen ödül, problemin yapısına göre maliyet ya da gelir olabilir.

Bir dönem içerisindeki toplam elde bulundurma maliyeti ( $H$ ), toplam ceza maliyeti ( $\Theta$ ), dönem sonunda elde bulunan stok miktarı ( $i^+$ ) ve dönem sonunda karşılanamayan talep miktarı ( $i^-$ ) sırasıyla şu şekilde hesaplanır:

$$H = h_p i_p^+ \quad (2.8)$$

$$\Theta = \theta_p i_p^- \quad (2.9)$$

$$i_p^+ = \sum_{d=0}^{i_p^a} \Gamma_p(d) (i_p^a - d) \quad (2.10)$$

$$i_p^- = \sum_{d=i_p^a}^{\infty} \Gamma_p(d) (d - i_p^a) \quad (2.11)$$

Burada  $\Gamma_p(d)$ ,  $p$  ürünü için talebin Poisson olasılık dağılımı gösterir. Özetle,  $s$  başlangıç durumunda iken herhangi bir  $a$  kararının tercih edilmesi neticesinde beklenen ödül bu üç maliyetin toplamıdır.

$$R_s^a = \left( \sum_{p=1}^P \sum_{f=1}^F u_{f,p} q_{f,p}^a + \sum_{p=1}^P h_p i_p^+ + \sum_{p=1}^P \theta_p i_p^- \right) \quad (2.12)$$

Markov karar süreci ile modellenen bu optimizasyon problemi dinamik programlama kullanılarak çözülecektir. Dinamik programlama, çok aşamalı karar problemlerinin çözümünde kullanılan en genel ve bilinen yöntemlerden biridir. Bu yöntem, ana problemi aşama olarak tanımlanan çözümleri daha kolay küçük boyutlu problemler haline getirir (Powell, 2007). Son aşamadan ilk aşamaya doğru her aşama bir öncekinden bağımsız olarak çözümlenerek optimal sonuca ulaşılır. Bellman'ın Optimallik prensibine göre başlangıç kararı ne olursa olsun geri kalan aşamalarda verilen kararlar ilk karardan bağımsız olarak bir optimal politika (karar dizisi) oluşturacaktır. Dinamik programlamada,



herhangi bir  $s$  durumunun değer fonksiyonunu gösteren Bellman denklemi şu şekildedir:

$$V_s \leftarrow \min_a \left\{ R_s^a + \gamma \sum_{s'} \beta_{ss'}^a V(s') \right\} \quad (2.13)$$

$\beta_{ss'}^a$ ,  $s$  durumundan  $a$  kararını tercih ederek  $s'$  durumuna geçmenin geçiş olasılığını göstermektedir.  $V(s')$ ,  $s'$  durumunun değer fonksiyonunu,  $\gamma$  ise iskonto oranını göstermektedir. Denklemin tüm aşamalarının çözülmesi ile optimal politikaya ulaşılır.

Dinamik programlamaya konu olan problemler, belli bir  $T$  zamanı ile sınırlanan sonlu planlama ufku problemi ya da belli bir zaman sınırına bağlı olmayan sonsuz planlama ufku problemi olabilir. Sonlu planlama ufku problemlerinde  $T$  döneminden başlayarak her durumun değer fonksiyonu hesaplanır ve  $T-1$  dönemine geçilir.  $T-1$  dönemde, her durumun değer fonksiyonu hesaplanırken  $T$  dönemdeki durumların değer fonksiyonlarından faydalanılır (Bakınız denklem 2.13). Bu işlem ilk döneme ulaşılan kadar devam ederek optimal sonuç elde edilir.

Sonsuz planlama ufku problemlerinde herhangi bir zaman sınırı bulunmadığı için bu tür problemler yukarıda bahsedilen şekilde çözülemez. Bu tür problemleri çözmek için değer yineleme, politika yineleme ve hibrid değer-politika yineleme gibi teknikler bulunur. Değer yineleme, kolay uygulanabilmesinden dolayı en çok kullanılan tekniklerden biridir. Bu yöntemde her durumun başlangıç değeri sıfır olarak kabul edilir ( $V(s)=0$ ). Yapılan her yineleme  $n$  sayaç değişkeni ile takip edilir ve durma kriterini sağlayacak sabit bir parametre ( $\epsilon$ ) tanımlanır. Bütün durumlar ve bu durumlardaki her karar için beklenen ödüller ( $R_s^a$ ) hesaplanır. Değer fonksiyonları içerisinde minimum maliyete (maksimum gelire) sahip olan durum bir sonraki dönemdeki durumun değeri olarak kabul edilir. Teorik olarak bu işlemin yeterli sayıda tekrarlanması ile değer fonksiyonları optimal değere yaklaşacaktır. Diğer yandan, optimal değere ulaşılması çok uzun sürebilir. Bu sebeple yineleme işlemi durma kriteri olan  $\|v^n - v^{n-1}\| < \epsilon(1 - \gamma)/2\gamma$  eşitsizliği sağlanana kadar devam eder (Powell, 2007). Sonsuz planlama ufku problemlerinin kararlı duruma (steady-state) ulaştığı nokta tespit edilmeye çalışılır. Kararlı durum, bir sistemde yer alan değişkenlerin bir süre sonra belli değerlere yakınsayıp, bu değerlerde zamanla birlikte önemli değişiklik olmamasıdır. Değer yineleme tekniğinin uygulandığı tipik bir dinamik programlama algoritması Algoritma 1'de gösterilmektedir.

**Algoritma 1:** Değer yineleme tekniğinin kullanıldığı dinamik programlama algoritması

---

Başla  $V(s) = 0 \quad \forall s \in S$   
Durma kriteri sağlanana kadar tekrarla  
Her bir  $s \in S$  durumu için;  
Her bir  $a \in A$  kararı için;  
Beklenen ödülü hesapla  $R_s^a$   
Değer fonksiyonunu hesapla  $v_s^a = R_s^a + \gamma \sum_s \beta_{ss'}^a V(s')$   
En küçük değeri durumun yeni değeri olarak belirle  $V'(s) = \min_a v_s^a$   
Eski değer fonksiyonunu güncelle  $V(s) = V'(s) \quad s \in S$   
Durma kriteri sağlandığında tekrardan çık  
Bitir

---

### 3. SAYISAL ÖRNEKLER

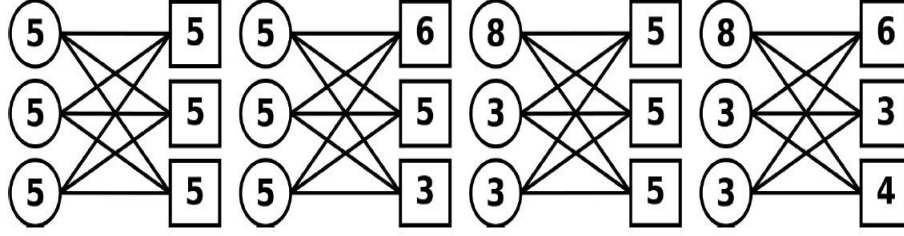
Bu bölümde, yukarıda anlatılan MKS modeli örnek problemlere uygulanacak ve bu problemler için bulunan optimal maliyetler, basit bir sezgisel politika ile karşılaştırılacaktır. Burada amaç, süreç esnekliği problemi için sunulan karar modelinin yöneticiler tarafından kullanılabilirliğini göstermektir.

Çözülen örnek problemlerde üç ürün ve üç üretim tesisinden oluşan bir sistem ele alınmaktadır. Her üretim tesisinin herhangi bir ürüne ayırabileceği bir üretim kapasitesi bulunmaktadır. Bütün ürün çeşitlerinin üretilmesinde eşit miktarda kaynak kullanıldığı varsayılmaktadır. Ürünlerin talep dağılımları ve tesislerin üretim kapasiteleri için örneklerde kullanılan 4 farklı kombinasyon Şekil 1'de gösterilmiştir. Her ürün için depolama kapasitesi, o ürünün bir dönemlik beklenen talep miktarına eşittir ( $i_p^{max} = \bar{d}_p$ ). Talep stokastik olup karar anında talebin olasılık dağılımı bilinmektedir.  $p$  ürününün talebi  $d_p$  ortalamalı Poisson dağılımına sahiptir ve kullanılan maliyetlere ilişkin parametreler Tablo 1'de verilmektedir.

**Tablo 1:** Örnek Problemlerde Kullanılan Parametreler

Ürün sayısı	3
Üretim tesisi sayısı	3
Elde bulundurma maliyeti	1
Ceza maliyeti	7
Başlangıç stoğu	0

	Üretim Maliyetleri			
	Ürünler			
	1	2	3	
Üretim Merkezleri	1	1,0	1,1	1,21
	2	1,21	1,0	1,1
	3	1,1	1,21	1,0



**Şekil 1:** Sayısal örnekler için kullanılan ortalama talep ve tesis kapasitesi miktarları. Daireler üretim tesisi kapasitelerini, kareler talep ortalamalarını, çizgiler ise bağlantıları göstermektedir.

Süreç esnekliği problemlerinde optimal politikaları kullanmamasının maliyetini göstermek için dinamik programlama çözümü ile elde edilen optimal sonuçlar, deterministik miyopik politikalar (DMP) ile elde edilen sonuçlarla karşılaştırılmıştır. DMP kullanılmasının amacı, dinamik programlama çözümünden elde edilen optimal sonuçların gerçek veriler ile karşılaştırılmaması sebebiyle karar vericilerin eksik bilgi ile aldığı kararları temsil edecek basit bir politikaya ihtiyaç duyulmasıdır. Bir miyopik politika, her dönem için o dönemi sanki son dönemmiş gibi varsayarak karar verir (Dirickx ve Jennergen, 1975). Bir başka deyişle, miyopik politika sadece bir dönem için karar verirken, o kararın sonraki dönemler üzerindeki etkisini göz önünde bulundurmaz. Bu sebeple, sadece bir dönem için beklenen ödülü maksimum/minimum yapacak kararı verir. DMP sadece bir dönem için en düşük ödülü belirler ve bir sonraki dönemde talebin karşılanması için güvenlik stoğu ayırmaz. Aynı zamanda stokastik talebin gerektirdiği hesaplamalardan kaçınmak için her ürünün beklenen talep miktarını deterministik talep olarak kabul eder. Bu durum kararların kalitesini düşürse de, hızlı ve karar vericinin subjektif kararlarını temsil edebilecek politikalar elde edilmesini sağlar.

Test edilen iki politikanın karşılaştırılması amacıyla, her iki politika için uzun dönemde beklenen indirgenmiş stok maliyetleri Monte Carlo Simülasyonu ile 10,000 yinleme kullanılarak hesaplanmıştır. Hesaplanan bu değerler Tablo 2’de verilmiştir. DMP ile elde edilen sonuçların optimal sonuçlardan yüzde farkı şu şekilde hesaplanmaktadır:

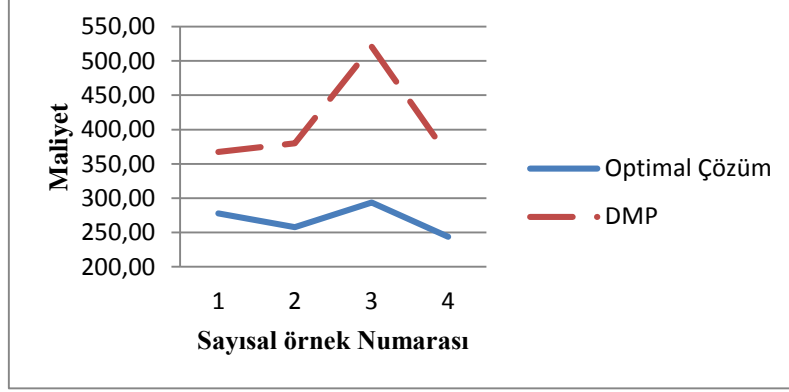
$$\frac{DMP - DP}{DP} * 100$$

**Tablo 2:** DP ve DMP Sonuçları

Sayısal Örnek Numarası	Optimal Çözüm	DMP	Yüzde Fark (%)
1	277,82	367,66	32,3
2	257,61	379,94	47,5
3	293,56	521,13	77,5
4	243,84	362,01	48,5

Süreç esnekliği problemlerinin çözümünden elde edilen en önemli sonuç, dinamik programlama algoritmasının her ürün için bir eşik seviyesi (threshold) oluşturmasıdır. Optimal politikalar stok miktarlarını bu eşik değerine olabildiğince yakın tutmaya çalışmaktadır. Dinamik programlama çözümlerine göre hiçbir ürün için karar sonrası stok, o ürün için belirlenen eşik değerini aşmamaktadır. Eşik değeri, karar vericiye belli bir ortalamaya sahip talep için bulundurulması gereken stok miktarını göstermektedir. Böylece karar verici ürünlere yönelik talebi en düşük toplam maliyetlerle karşılayabilmektedir.

Diğer yandan dinamik programlama ile elde edilen optimal sonuçlar ve DMP yönteminin sonuçları karşılaştırıldığında, DMP'nin sonuçlarının dinamik programlama ile elde edilen sonuçlara yakın olmadığı gözlemlenmiştir. Optimal çözüm ile DMP çözümleri arasındaki fark en düşük %32,3 iken en fazla %77,5 olarak belirlenmiştir. Dinamik programlama ile süreç esnekliği problemlerini çözmek dört örnek açısından ortalama %50'lik bir maliyet avantajı sağlar. Şekil 2'de dinamik programlama ve DMP ile elde edilen maliyetler grafik üzerinde verilmiştir.



Şekil 2: Örneklerin Optimal Çözüm ve DMP Sonuçlarının Karşılaştırması

## SONUÇ

Süreç esnekliği birden çok ürünü bir üretim tesisinde üretebilme yeteneğidir. Bu çalışmada, süreç esnekliği probleminde optimal stok kararlarını belirlemek için DP yöntemini önerilmiştir. Ayrıca, dinamik programlama ile elde edilen optimal sonuçlar gerçek verilerle karşılaştırılmadığı için basit bir çözüm politikası olan DMP'nin sonuçları ile kıyaslanmıştır.

Süreç esnekliği problemlerinin dinamik programlama ile çözümü sonucunda optimal politikalara ulaşılmıştır. Bu optimal politikalar belli bir eşik değeri ortaya koymaktadır. Bu eşik değeri özellikle talep miktarına göre bulundurulması gereken stok miktarını belirlemede kullanılabilir yönetimsel bir araçtır. DMP'den elde edilen sonuçlarla optimal sonuçlar arasındaki fark en az %32,3 olarak bulunmuştur. Bu fark süreç esnekliği problemlerinin dinamik programlama çözümü ile elde edilen maliyet avantajını göstermektedir. Böylece yöneticiler talebi karşılamak için gereken doğru stok miktarını minimum toplam maliyete katlanarak belirleyebilir.

Dinamik programlama ile çözülen MKS modelinin kısıtları bulunmaktadır. Büyük boyutlu stok problemlerinde çok sayıda üretim tesisi ve ürün bulunduğu için optimal sonuca ulaşamamaktadır. Bunun temel nedeni, ürün ve tesis sayısı, tesis kapasitesi, her ürün için depolama kapasitesi gibi unsurlardan kaynaklanan durum ve karar tercihi sayısındaki üssel artıştır. Kullanılan yazılımların problemin boyutu ile doğru orantıda hafızaya ihtiyaç duyması, ve çözüm için gereken işlemci süresinin de yine durum ve karar

sayısıyla doğru orantılı olarak artması, büyük boyutlu problemlerin DP kullanılarak çözümlenmesini mevcut teknolojilerle olanaksız kılmaktadır.

Bu durum, gelecek çalışmalar için büyük boyutlu problemlerin çözümüne yönelik sezgisel yöntemlerin geliştirilmesini doğal bir yönelim haline getirmektedir. Ek olarak, süreç esnekliğine sahip üretim sistemleri ile süreç esnekliğine sahip olmayan üretim sistemleri karşılaştırılarak süreç esnekliğinin optimal stok politikalarıyla sağladığı faydaların gözlemlenmesi de yine literatüre önemli bir katkı sağlayabilir. Bunun yanında, dinamik programlama ile elde edilen optimal sonuçların ileriye dönük politika (look ahead policy), politika fonksiyonu tahmini (policy function approximation) ve değer fonksiyonu tahmini (value function approximation) gibi yöntemlerin sonuçlarıyla karşılaştırılması da süreç esnekliği problemi için karar vericilere etkin ve kullanışlı alternatifler sunabilecektir.

## KAYNAKÇA

- BERGER, P. D., ZENG, A. Z. (2006), "Single Versus Multiple Sourcing in the Presence of Risks", *Journal of the Operational Research Society*, Vol. 57, pp. 250-261.
- BIESEBROECK, J. V. (2007), "Complementarities in Automobile Production", *Journal of Applied Econometrics*, Vol. 22, pp. 1315-1345.
- BROWNE, J., DUBOIS, D., RATHMILL, K., SETHI, S. P., STECKE, K. E. (1984), "Classification of Flexible Manufacturing Systems", *The FMS magazine*, Vol. 2, No. 2, pp. 114-117.
- CARTER, Michael F. (1986), "Designing Flexibility into Automated Manufacturing Systems", *Proceedings of the Second ORSA/TIMS Conference on Flexible Manufacturing Systems*, Elsevier Science Publishers, BV, Amsterdam, The Netherlands.
- CHOU, M. C., TEO, C. P., ZHENG, H. (2008), "Process Flexibility: Design, Evaluation, and Applications", *Flexible Services and Manufacturing Journal*, Vol. 20, pp. 59-94.
- DIRICKX, Y. M. O., JENNERGEN, L. P. (1975), "On the Optimality of Myopic Policies in Sequential Decision Problems", *Management Science*, Vol. 21, No. 5, pp. 550-556.
- FERDOWS, K., CARABETTA, C. (2006), "The Effect of Inter-Factory Linkage Flexibility on Inventories and Backlogs in Integrated Process Industries", *International Journal of Production Research*, Vol. 44, No. 2, pp. 237-255.
- FRANCAS, D., KREMER, M., MINNER, S., FRIESE, M. (2009), "Strategic Process Flexibility Under Lifecycle Demand", *International Journal of Production Economics*, Vol. 121, pp. 427-440.
- GUSTAVSON, Sten-Olof (1984), "Flexibility and Productivity in Complex Production Processes", *International Journal of Production Research*, Vol. 22, No. 5, pp. 801-808.
- JORDAN, W. C., GRAVES, S. C. (1995), "Principles on the Benefits of Manufacturing Process Flexibility", *Management Sciences*, Vol. 41, No. 4, pp. 577- 594.
- IRAVANI, S. M. R., KOLFAL, B., VAN OYEN, M. P. (2014), "Process Flexibility and Inventory Flexibility via Product Substitution", *Flexible Services and Manufacturing Journal*, Vol. 26, pp. 320-343.
- POWELL, W. B. (2007), *Approximate Dynamic Programming: Solving the Curses of Dimensionality*, 2nd Edition, John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey.
- SEEBACHER, G., WINKLER, H. (2015), "A Capability Approach to Evaluate Supply Chain Flexibility", *International Journal of Production Economics*, Vol. 167, pp. 177-186.
- SETHI, A. K., SETHI, S. P. (1990), "Flexibility in Manufacturing: A Survey", *The International Journal of Flexible Manufacturing Systems*, Vol. 2, pp. 289-328.
- STEVENSON, M., SPRING, M. (2009), "Supply Chain Flexibility: An Inter-firm Empirical Study.", *International Journal of Operations & Production Management*, Vol. 29, No. 9, pp. 946-971.
- TANG, C., TOMLIN, B. (2008). "The Power of Flexibility for Mitigating Supply Chain Risks", *International Journal of Production Economics*, Vol. 116, No. 1, pp. 12-27.

- TRELEVEN, M., SCHWEIKHART, S. B. (1988), "A Risk/Benefit Analysis of Sourcing Strategies: Single vs. Multiple Sourcing", *Journal Of Operations Management*, Vol. 7, No. 3, pp. 93-114.
- UPTON, D. M. (1995), "Flexibility as Process Mobility: The Management of Plant Capabilities for Quick Response Manufacturing", *Journal of Operations Management*, Vol. 12, pp. 205-224.
- WADHWA, S., SAXENA, A., CHAN, F.T.S. (2008), "Framework for Flexibility in Dynamic Supply Chain Management", *International Journal of Production Research*, Vol. 46, No. 6, pp. 1373-1404.