



Received: June 11, 2019
Accepted: September 09, 2020
Published Online: December 31, 2020

AJ ID: 2020.08.02.OR.05
DOI: 10.17093/alphanumeric.575234
Research Article

Multi-product Production-Inventory Model and Analysis within the Context of Environmental Sensitivity

Harun Öztürk, Ph.D. *



Assoc. Prof., Department of Business Administration, Faculty of Business Administration, Suleyman Demirel University, Isparta, Turkey.
harunozturk@sdu.edu.tr

* Süleyman Demirel Üniversitesi, İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi, 32260, Çünür, Isparta, Türkiye

ABSTRACT

In recent years, accounting of carbon (CO₂) emissions in the modeling of supply chains has become as important as achieving an effective coordination between supplier(s) and buyer(s). Because, carbon emissions are a measure of the sensitivity to the environment. In this study, a multi-product inventory problem containing defective products is considered under the assumptions of environmental sensitivity and limited storage space, and mathematical models are developed. The total cost of the problem comprise of cost of setup, cost of production, cost of screening, cost of disposal, cost of holding, cost of carbon emission and carbon emission tax. The optimal production cycle time and production quantities that minimize the expected total cost are obtained with the help of a developed algorithm. All calculations in the developed algorithm are performed using Microsoft Excel program. Two numerical examples with sensitivity analysis are provided to illustrate the results.

Keywords:

Inventory Control, Economic Production Quantity (EPQ), Cycle Time, Defective Items, Environmental Sensitivity, Limited Storage Space

Çevreye Karşı Duyarlılık Kapsamında Çok Ürünlü Üretim Stok Kontrol Modeli ve Analizi

Öz

Son yıllarda, tedarik zincirlerinin modellenmesinde karbondioksit (CO₂) gazı salınımının hesaplanması, tedarikçi(ler) ile alıcı(lar) arasında etkili bir koordinasyon sağlamak kadar önemli hale gelmiştir. Çünkü, karbon gazı emisyon miktarları, çevreye karşı duyarlılığın bir ölçütü olarak görülmektedir. Bu çalışmada, kusurlu ürünler içeren çok ürünlü stok problemi; çevreye karşı duyarlı olma ve sınırlı depolama alanı varsayımları altında ele alınmaktadır ve problemin matematiksel modelleri geliştirilmektedir. Problemdaki toplam maliyet; üretime hazırlık, üretim, tarama, hurda, stokta tutma, karbon emisyon ve emisyon vergi maliyetlerini içermektedir. Beklenen toplam maliyeti minimum yapacak optimal üretim çevrim süresi ve üretim miktarları, geliştirilen bir algoritma yardımıyla elde edilmektedir. Geliştirilen algoritmadaki tüm hesaplamalar, Microsoft Excel programı kullanılarak yapılmaktadır. Sonuçları göstermek amacıyla duyarlılık analizine sahip iki sayısal örnek çalışmada verilmektedir.

Anahtar Kelimeler:

Stok Kontrolü, Ekonomik Üretim Miktarı (EÜM), Çevrim Süresi, Kusurlu Ürün, Çevresel Duyarlılık, Sınırlı Depolama Alanı



1. Giriş

Klasik Ekonomik Sipariş Miktarı (ESM) ve Ekonomik Üretim Miktarı (EÜM) modellerindeki temel varsayımlarından biri, üretilen ya da teslim alınan her bir partideki ürünlerin tamamının yüksek kalitede olduğudur. Ancak; üretim süreçlerindeki aksaklıklar ve taşıma sırasında yaşanabilecek problemler sebebiyle, üretilen ya da teslim alınan bir parti kusurlu ürünler içermektedir. Porteus (1986), kusurlu ürünlerin yeniden işlenmesi varsayımı ile ekstra bir maliyete katlanılacağından, parti hacminin azaltılmasıyla daha az kusurlu ürün elde edilebileceğini öne sürmüştür. Bununla birlikte Porteus (1986); üretim sürecinin kalitesinin geliştirilmesinin ve dolayısıyla üretilen ürünlerin beklenen kalite standartlarına uymasının; stokta tutma maliyetini ve optimal parti hacmini artırdığını, kusurlu üretim miktarını ve üretime hazırlık maliyetini ise azalttığını elde etmiştir. Salameh ve Jaber (2000), klasik ESM modelini, teslim alınan her bir partide belirli bir oranda kusurlu ürün bulunması varsayımı ile genişletmişlerdir. Kusurlu ürünleri ayırmak için teslim alınan partinin tamamı için bir tarama işlemi yapılmaktadır ve tarama bittikten sonra bu kusurlu ürünler tek parti halinde indirimli fiyattan satılmaktadır. Ayrıca, kusurlu ürün oranının rassal bir değişken olduğu ve sürekli düzgün dağılıma uyduğu varsayılmıştır. Salameh ve Jaber (2000) bu çalışma sonucunda, bir partideki kusurlu ürün oranının artması ile optimal sipariş miktarının arttığını elde etmişlerdir. Salameh ve Jaber (2000)'in çalışması, akademisyenler ve araştırmacılar tarafından oldukça ilgi çekmiş ve bu çalışma baz alınarak yeni varsayımlarla farklı matematiksel modeller geliştirilmiştir. Bu çalışmalardan bazıları; Papachristos ve Konstantaras (2006), Maddah ve Jaber (2008), Jaber vd. (2008), Hsu ve Yu (2009), Khan vd. (2011), Taheri-Tolgari vd. (2012), Jaggi vd. (2013), Lee ve Kim (2014), Aslani vd. (2017) ve Liao vd. (2018)'dir.

Diğer taraftan, Ben-Daya ve Hariga (2000), çok ürünlü üretim stok kontrol probleminde, ortak çevrim süresi ve üretilen ürünlerin bazılarının yüksek kalitede bazılarının da kusurlu olduğu varsayımları altında matematiksel modeller türetmişlerdir. Üretilen kusurlu ürün miktarını azaltmak amacıyla, kusurlu ürünler içeren modele, tarama ve üretim sürecinin geliştirilmesinden kaynaklanan tamir etme maliyetlerini eklemişlerdir. Ardından Moon vd. (2002), Ben-Daya ve Hariga (2000)'nin modelini, stoksuzluk durumuna izin verilmemesi ve üretime hazırlık için gereken sürenin dikkate alınması varsayımları altında genişletmişlerdir. Öner ve Bilgiç (2008), çok ürünlü stok kontrol probleminde ortak/birlikte-üretim (co-production) varsayımının optimum parti hacmi üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Bu amaçla, talebin tamamen eldeki stoktan karşılanması ve elde stok bulundurmamaya izin verilmesi varsayımları altında iki matematiksel model geliştirmişlerdir. Yarı iletken, cam ve otomobil parçaları üretimi süreçlerinde farklı boylarda ya da simetrik parçaların aynı zamanda üretimi, ortak/birlikte-üretim işlemine örnek olarak verilebilmektedir. Bu süreçlerdeki temel problem; talep miktarındaki farklılığın, elde bulundurma maliyetlerini artırma ya da beklenmedik şekilde stoksuz kalma sonuçlarını doğurduğudur (Ağralı, 2012). Çevresel duyarlılığın ve enerji tüketiminin optimum üretim miktarı üzerindeki etkisi, Zavanella vd. (2019) tarafından yapılan çalışmada ele alınmış ve iki aşamalı üretim-stok kontrol probleminin değişken üretim oranı (üretim miktarı) varsayımı altında matematiksel modeli geliştirilmiştir. Manna vd. (2020), üretim sırasında üretilen kusurlu ürünlerin bir kısmının tamir edilebilir özellikte olduğu çok ürünlü üretim stok kontrol modelinde, üreticinin alıcıya ödemede kolaylıklar

sağladığını ve ödemenin bir kısmının sipariş teslimatından önce (ön ödeme/avans), kalan kısmının ise teslimat sırasında yapıldığını varsayımlardır. Bu ödeme şekli, kısmi ön ödeme (partial advance payment) olarak bilinmektedir ve güvenli ve daha az riskli olması açısından üreticiler tarafından uygulamada oldukça fazla tercih edilen yöntemlerden biridir. Taleizadeh vd. (2010), Chan vd. (2013), Mousavi vd. (2014), Nia vd. (2014), Nobil vd. (2016), Liao vd. (2017) ve Khalilpourazari vd. (2020) farklı varsayımlar altında çok ürünlü EÜM modelleri öneren literatürdeki diğer çalışmalardan bazılarıdır. Bununla birlikte; çok çeşitli ürün üretebilme kapasitesine sahip yüksek hızlı bir makine satın almanın, sadece tek kalem ürün üretmek için pek çok makine satın almaktan daha ekonomik olması sebebiyle; son yıllarda üretim endüstrisinde, tek bir tesis ya da makinede çeşitli ürünler üretmek oldukça yaygın bir uygulama olarak karşımıza çıkmaktadır. Bu tür problemlerdeki temel amaç, toplam maliyeti (toplam kârı) minimum (maksimum) yapacak şekilde her bir ürün için optimal üretim miktarını ve hangi ürünün ne zaman üretileceğini belirlemektir.

Çevre kirliliği konusunda artan endişe, stok yönetim kararlarında ekonomik hedeflerin yanı sıra çevresel hedeflerin de gözetilmesi gerektiğini göstermektedir. Günümüzde işletmeler, çevre dostu bir işletme olmanın, müşteri memnuniyetini artırdığını ve müşteri tutundurmada etkili bir araç olduğunu fark etmişlerdir (Ay ve Ecevit, 2005). Dolayısıyla; bilinen klasik parti hacmi belirleme problemlerinde, üretim ya da sipariş verme maliyetleri ve stokta tutma maliyetlerinin yanı sıra çevresel maliyetlerin de dikkate alınması gerektiği görülmüştür (Bonney ve Jaber, 2011; Battini vd., 2014; Zaroni vd., 2014).

Çevresel kirlilik, beraberinde iklim değişikliğini getirmiştir. İklim değişikliğinin en önemli nedenlerinden biri, kontrol edilemeyen zararlı gaz salınımlarıdır (Crowley, 2000). Bu tür kirliliğe sebep olan eylemler, birçok ülkede öncelikle çözülmesi gereken problemler haline gelmiştir (Jaber vd., 2013). Zararlı gaz emisyon envanteri; Karbondioksit (CO₂), Metan (CH₄), Nitrozoksit (N₂O), Hidroflorokarbon (HFC), Kükürthekzaflořit (SF₆), Perflorokarbon (PFC), Azotoksit (NO_x), Karbonmonoksit (CO) ve Kükürtdioksit (SO₂) gibi sera gazlarını kapsamaktadır. Bu tür zararlı gazların salınımı; enerji tüketimi, kömür madenciliği, endüstriyel faaliyetler, tarımsal faaliyetler, ulaşım faaliyetleri ve atıklardan kaynaklanmaktadır (TÜİK, 2011). Artan çevre kirliliğinin önüne geçmek ve işletme faaliyetlerinden kaynaklanan zararlı gaz salınımını sınırlandırmak amacıyla yasal düzenlemeler ve önemli mali yaptırımlar getirilmiş ve çevresel duyarlılığın artırılması hedeflenmiştir.

Zararlı gaz salınımı maliyetleri, her işletmenin sermaye yatırım kararlarını önemli ölçüde etkilemektedir (Büyüközkan ve Vardaloğlu, 2008). Bu amaçla herhangi bir işletme; üretim, stok bulundurma, stokları depolama ve taşıma faaliyetlerindeki değişiklikler ile daha az zararlı gaz salınımı meydana getirmekte ve çevre dostu bir işletme olabilmektedir (Wahab vd., 2011; Toptal vd., 2014; Sarkar vd., 2015; Taleizadeh vd., 2018). Bu çalışmada, kusurlu ürünler içeren çok ürünlü stok kontrol problemi çevreye karşı duyarlı olma ve sınırlı depolama alanı varsayımları altında tekrar ele alınmaktadır ve kusurlu ürünler, üretim işlemleri tamamlandıktan sonra eldeki stoktan çıkarılmaktadır. Bu çalışmanın amacı iki yönlüdür: (1) kusurlu ürünler içeren çok ürünlü EÜM modelinin, literatürdeki farklı çalışmalarda kabul edilen üretim, tarama, kusurlu ürünler üretim maliyeti varsayımları altında matematiksel formülasyonunu yeniden elde etmek. (2) tek bir makinede üretilen tüm ürünler için üretim ve üretime hazırlık süreleri toplamının çevrim süresinden fazla olamayacağını

ifade eden sınırlı üretim kapasitesi ve sınırlı depo alanı kısıtları ile stoklanan ürünlerin depolanmasından kaynaklanan maliyetleri, stokta tutma ve karbon emisyon maliyetleri olarak ayrı değerlendirip; matematiksel formülasyonu, karbon emisyonu ve emisyon vergi maliyetleri varsayımları altında genişletmek.

Bu doğrultuda çalışma şu şekilde organize edilmiştir: İkinci bölümde, matematiksel modeli geliştirmede kullanılacak varsayımlar ve simgeler verilmiştir. Üçüncü bölümde, kusurlu ürünler içeren çok ürünlü EÜM problemi tanımlanmış ve matematiksel formülasyonu tekrar elde edilmiştir. Dördüncü bölümde, çevreye karşı duyarlı olma, sınırlı üretim kapasitesi ve sınırlı depolama alanı varsayımları altında yeni çok ürünlü EÜM modeli geliştirilmiştir. Beşinci bölümde, sayısal örnekler ve duyarlılık analizleri yardımıyla geliştirilen modelin uygulanabilirliği gösterilmiştir. Sonuç bölümünde ise çalışmanın özeti ve gelecekte yapılabilecek çalışmalara yer verilmiştir.

2. Varsayımlar ve Simgeler

Bu bölümde, çalışmada ele alınan çok ürünlü üretim stok kontrol probleminin matematiksel modelini geliştirmede kullanılacak varsayımlar ve simgeler verilmektedir. Matematiksel modeli geliştirmek için kullanılacak varsayımlar aşağıdaki gibidir:

- I. Birden çok ürün tek bir makinede üretilmektedir.
- II. Bir defada sadece bir ürün üretilmektedir.
- III. Üretim hızları, talep hızları, tarama hızları sabit ve süreklidir.
- IV. Üretim süreci kusurlu ürünler üretmektedir.
- V. Kusurlu ürünler, üretim tamamlanıncaya kadar stokta bekletilmektedir,
- VI. üretim tamamlandığında stoktan çıkarılmaktadır.
- VII. Kusurlu ürün oranı, rassal bir değişkendir ve bilinen bir olasılık dağılımına uymaktadır.
- IX. Ürünleri stoklamak için gerekli depolama alanı sınırlıdır.
- X. Stoksuzluğa izin verilmemektedir.

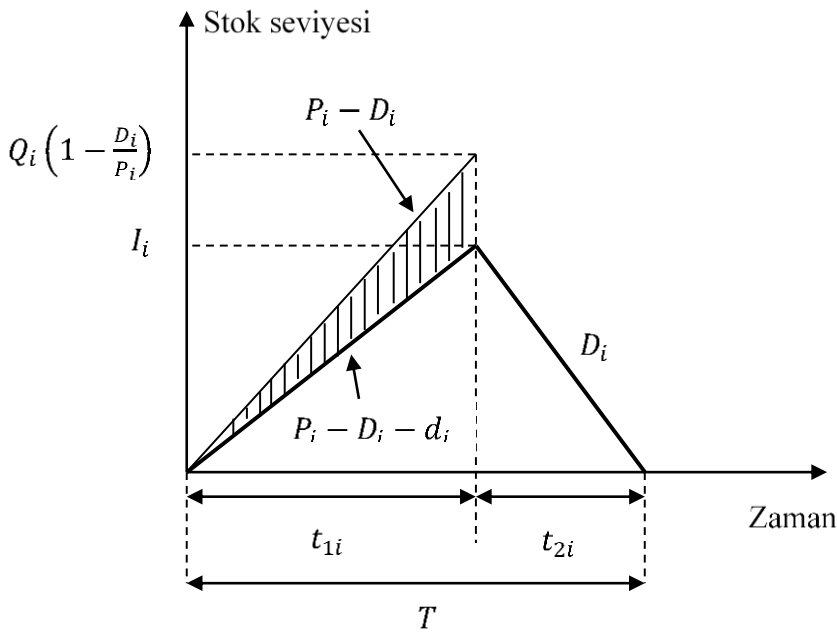
Matematiksel modeli geliştirmek için ise aşağıdaki simgeler kullanılacaktır. $i = 1, 2, \dots, n$ olmak üzere;

<u>SİMGE</u>	<u>AÇIKLAMA</u>
n	ürün sayısı
P_i	üretim hızı
q_i	kusurlu ürün oranı
D_i	talep hızı
Q_i	üretim miktarı, karar değişkeni
I_i	yüksek kaliteli ürünler için maksimum stok seviyesi
T	çevrim süresi, karar değişkeni
t_{1i}	herbir çevrimdeki üretim süresi
t_{2i}	herbir çevrimdeki eldeki yüksek kaliteli ürünleri tüketme süresi
S_i	üretime hazırlık süresi
K_i	üretime hazırlık maliyeti
C_{iP}	birim üretim maliyeti (\$/birim)
C_{iH}	bir birim ürünü bir birim zaman stokta tutma maliyeti (\$/birim/birim zaman)

C_{iS}	birim ıskarta maliyeti (\$/birim)
C_{iN}	birim tarama maliyeti (\$/birim)
C_{iE}	birim emisyon maliyeti (\$/birim)
C_{iV}	birim emisyon vergi maliyeti (\$/birim)
d_i	kusuru ürün üretim oranı
a_i	bir birim ürün için depolama alanı gereksinimi (m^3 /birim)
g_i	bir birimin ağırlığı (ton/birim)
A	maksimum depo alanı

3. Kusurlu Ürünler İçeren Çok Ürünlü EÜM Modeli

Bu çalışmaya konu olan çok ürünlü üretim stok kontrol modeli Şekil 1 ile verilmiştir. n -adet ürünün tek bir makinede üretildiği bir üretim sisteminde, i . ürünün birim zamandaki talep miktarı D_i ve birim zamandaki üretim hızı P_i 'dir ($P_i > D_i$). Herbir çevrim süresi, iki zaman aralığından oluşmaktadır. Birinci zaman aralığında (t_{1i}), üretimin yapıldığı ve talebin karşılandığı, ikinci zaman aralığında (t_{2i}) sadece talebin karşılandığı varsayılmaktadır. Bununla birlikte, üretim sürecindeki aksaklıklardan dolayı kusurlu ürün üretilmektedir. Kusurlu ürün üretim hızı d_i ve üretilen ürünler içerisindeki kusurlu ürün oranı q_i 'dir. Bu durumda, $d_i = P_i q_i$ eşitliği elde edilmektedir. Talep, sadece yüksek kaliteli ürünlerden karşılanacağından, üretilen ürünler için bir tarama süreci gerekmektedir. Ürün tarama işlemi, üretimin başladığı andan itibaren yapılmaktadır ve üretim süresi tamamlandığında sona ermektedir. Bu işlem, literatürde yaygın olarak kullanılan tarama stratejilerinden "üretim sırasında tarama" olarak bilinmektedir (Hayek ve Salameh, 2001; Chiu, 2003). Tarama sırasında elde edilen kusurlu ürünler, üretim tamamlanıncaya kadar stokta bekletilmektedir ve üretim tamamlandığında, ıskarta ürün olarak stoktan çıkartılmaktadır. Kusurlu ürünlere ait stok seviyesi, Şekil 1'de taralı alan ile gösterilmiştir.



Şekil 1. Stok Seviyesinin Zamanla Değişimi.

Üretim tamamlandığında eldeki maksimum stok seviyesine ulaşmak için geçen süre, Eşitlik (1) ile hesaplanmaktadır.

$$t_{1i} = \frac{I_i}{P_i - D_i - d_i} \quad (1)$$

Çevrim başına üretim süresi, üretim miktarının üretim hızına oranlanmasıyla Eşitlik (2)'deki gibi elde edilmektedir.

$$t_{1i} = \frac{Q_i}{P_i} \quad (2)$$

Üretim tamamlandığında eldeki maksimum stok seviyesi; (1) ve (2) Eşitliklerinden aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır.

$$I_i = (P_i - D_i - d_i) \frac{Q_i}{P_i} \quad (3)$$

Ayrıca, Şekil 1'den Eşitlik (4)'teki ifade elde edilmektedir.

$$t_{2i} = \frac{I_i}{D_i} \quad (4)$$

Yukarıda belirtilen modelde bütün ürünlerin, sınırlı üretim kapasitesine sahip tek bir makinede üretildiği ve çevrim süresinin ortak olduğu; yani her bir ürün için çevrim süresinin eşit uzunlukta olduğu varsayılmıştır. Bu varsayım, "Ortak Çevrim süresi yaklaşımı (Common Cycle (CC) approach)" olarak bilinmektedir (Ben-Daya ve Hariga, 2000; Moon vd., 2002; Ma vd., 2010). O halde, $i = 1, 2, \dots, n$ olmak üzere; her i için $T_1 = T_2 = \dots = T_n = T$ dir. Şekil 1'den görüleceği üzere çevrim süresi, üretimin yapıldığı süre ve eldeki ürünlerin tamamının tükenmesi için gereken süre (üretimin yapılmadığı süre) toplamlarından oluşmaktadır.

$$T = \sum_{k=1}^2 t_{ki} = \frac{Q_i(1 - q_i)}{D_i} \quad (5)$$

Üretim süresi boyunca talep sadece yüksek kaliteli ürünlerden karşılanacağından, bu süre içerisinde stoksuzluk durumunun ortaya çıkmaması için i . ürün dikkate alındığında üretim oranı P_i , talep oranı D_i 'den büyük ya da eşit olmalıdır. Yani,

$$P_i - D_i \geq 0 \quad (6)$$

Bu çalışmada, üretilen ürünler içerisinde belirli bir oranda kusurlu ürünler bulunduğu varsayıldığından; yüksek kaliteli ürünlerin üretim hızı, talep hızı ve kusurlu ürünlerin üretim hızı toplamından büyük ya da eşit olmalıdır. O halde i . ürün için Eşitlik (7)'deki koşullar sağlanmalıdır.

$$P_i - D_i - d_i \geq 0 \text{ ya da} \quad (7)$$

$$\frac{D_i}{P_i(1 - E(q_i))} \leq 1$$

Çevrim başına toplam maliyet; üretime hazırlık maliyeti (CK), üretim maliyeti (CP), stokta tutma maliyeti (CH), kusurlu ürünler maliyeti (CS) ve tarama maliyetlerinden (CN) oluşmaktadır. O halde, çevrim başına toplam maliyet fonksiyonu $TMC(Q_i)$, Eşitlik (8)'deki gibi ifade edilmektedir.

$$\begin{aligned} TMC(Q_i) = & \text{üretime hazırlık maliyeti} \\ & + \text{üretim maliyeti} \\ & + \text{stokta tutma maliyeti} \\ & + \text{kusurlu ürünler maliyeti} \\ & + \text{tarama maliyeti} \end{aligned} \quad (8)$$

$$TMC(Q_i) = CK + CP + CH + CS + CN$$

Çevrim başına toplam maliyet fonksiyonunu meydana getiren her bir maliyet kalemi aşağıda detaylı açıklanmaktadır.

Çevrim başına üretime hazırlık maliyeti (CK)

i . ürün için üretime hazırlık maliyeti K_i 'dir. O halde, $i = 1, 2, \dots, n$ olmak üzere n adet ürün için çevrim başına toplam üretime hazırlık maliyeti Eşitlik (9)'daki gibidir.

$$CK = \sum_{i=1}^n K_i \quad (9)$$

Çevrim başına üretim maliyeti (CP)

i . ürünün bir biriminin üretim maliyeti C_{iP} ve çevrim başına üretim miktarı Q_i 'dir. Dolayısıyla, i . ürünün çevrim başına üretim maliyeti $C_{iP}Q_i$ 'dir. Buradan, $i = 1, 2, \dots, n$ olmak üzere çevrim başına toplam üretim maliyeti Eşitlik (10)'da verildiği gibi elde edilmektedir.

$$CP = \sum_{i=1}^n C_{iP}Q_i \quad (10)$$

Çevrim başına stokta tutma maliyeti (CH)

Bu çalışmada, üretilen ürünlerin belirli bir oranının kusurlu olduğu varsayılmaktadır. Ayrıca; her bir ürün ile ilgili olarak kusurlu ürünler, üretim tamamlanıncaya kadar stokta bekletilmektedir. Dolayısıyla stokta tutma maliyeti, hem yüksek kaliteli ürünler için hem de kusurlu ürünler için hesaplanmaktadır. O halde, hem yüksek kaliteli ürünler hem de kusurlu ürünler için i . ürünün bir birimini birim zaman başına (bir birim zaman) stokta tutma maliyeti C_{iH} 'dir. Şekil 1'den yola çıkarak, yüksek kaliteli ürünler için çevrim başına stokta tutma maliyeti Eşitlik (11)'deki gibi ifade edilmektedir.

$$\sum_{i=1}^n C_{iH} \left(\frac{(t_{1i} + t_{2i})I_{1i}}{2} \right) \quad (11)$$

t_{1i} , t_{2i} ve I_{1i} değerleri Eşitlik (11)'de yerine yazılırsa, yüksek kaliteli ürünler için çevrim başına stokta tutma maliyeti Eşitlik (12)'deki gibi hesaplanmaktadır.

$$\begin{aligned} & \sum_{i=1}^n C_{iH} \left[\frac{1}{2} \left(\frac{Q_i}{P_i} + \frac{(P_i - D_i - d_i)Q_i}{D_i P_i} \right) \left(\frac{(P_i - D_i - d_i)Q_i}{P_i} \right) \right] \\ & = \sum_{i=1}^n C_{iH} \left[\frac{Q_i^2}{2D_i} (1 - q_i) \left(1 - q_i - \frac{D_i}{P_i} \right) \right] \end{aligned} \quad (12)$$

Yine Şekil 1'den yola çıkarak, kusurlu ürünler için çevrim başına stokta tutma maliyeti Eşitlik (13)'teki gibi ifade edilmektedir.

$$\sum_{i=1}^n C_{iH} \left[\frac{(Q_i(1 - \frac{D_i}{P_i}) - I_{1i})t_{1i}}{2} \right]. \quad (13)$$

t_{1i} ve I_{1i} değerleri Eşitlik (13)'te yerine yazılırsa, kusurlu ürünler için çevrim başına stokta tutma maliyeti aşağıdaki gibi elde edilmektedir.

$$\sum_{i=1}^n C_{iH} \left[\frac{1}{2} \left(Q_i \left(1 - \frac{D_i}{P_i} \right) - (P_i - D_i - d_i) \frac{Q_i}{P_i} \right) \frac{Q_i}{P_i} \right] = \sum_{i=1}^n C_{iH} \left[\frac{Q_i^2 q_i}{2P_i} \right]. \quad (14)$$

Sonuç olarak, yüksek kaliteli ürünler ve kusurlu ürünler için çevrim başına toplam stokta tutma maliyeti Eşitlik (15)'teki gibidir.

$$CH = \sum_{i=1}^n C_{iH} \left[\frac{Q_i^2}{2D_i} (1 - q_i) \left(1 - q_i - \frac{D_i}{P_i} \right) \right] + \sum_{i=1}^n C_{iH} \left[\frac{Q_i^2 q_i}{2P_i} \right]. \quad (15)$$

Çevrim başına kusurlu ürünler maliyeti (CS)

i . ürün ile ilgili olarak kusurlu ürünler için birim iskarta (hurda) maliyeti C_{iS} ve çevrim başına üretim miktarı $q_i Q_i$ 'dir. Dolayısıyla, i . ürün için çevrim başına hurda maliyeti $C_{iS} q_i Q_i$ 'dir. O halde, çevrim başına toplam hurda maliyeti Eşitlik (16)'daki gibi elde edilmektedir.

$$CS = \sum_{i=1}^n C_{iS} (q_i Q_i). \quad (16)$$

Çevrim başına tarama maliyeti (CN)

i . ürünün bir biriminin tarama maliyeti C_{iN} ve çevrim başına üretim miktarı Q_i 'dir. Dolayısıyla, i . ürünün çevrim başına tarama maliyeti $C_{iN} Q_i$ 'dir. Buradan, çevrim başına toplam tarama maliyeti aşağıdaki gibi elde edilmektedir.

$$CN = \sum_{i=1}^n C_{iN} Q_i. \quad (17)$$

Sonuç olarak, çevrim başına toplam maliyet fonksiyonu ($TMC((TMC(Q_1, \dots, Q_n)))$), Eşitlik (18)'deki hale gelmektedir.

$$TMC(Q_1, \dots, Q_n) = CK + CP + CH + CS + CN \quad (18)$$

$$\begin{aligned}
&= \sum_{i=1}^n K_i + \sum_{i=1}^n (C_{iP}Q_i) + \sum_{i=1}^n \left[\frac{C_{iH}Q_i^2}{2D_i} \right] (1 - q_i) \left(1 - q_i - \frac{D_i}{P_i} \right) \\
&+ \sum_{i=1}^n \left[\frac{C_{iH}Q_i^2}{2P_i} \right] (q_i) + \sum_{i=1}^n (C_{iS}Q_i)(q_i) + \sum_{i=1}^n (C_{iN}Q_i)
\end{aligned}$$

Birim zamandaki toplam maliyet $TMB(Q_1, \dots, Q_n)$, yenileme ödül teoremi (Ross, 1989) kullanılarak; çevrim başına toplam maliyet fonksiyonu $TMC(Q_i)$ 'nin çevrim uzunluğu T 'ye oranlanmasıyla Eşitlik (19)'da sunulan forma dönüştürülmektedir.

$$\begin{aligned}
TMB(Q_1, \dots, Q_n) &= \frac{TMC(Q_1, \dots, Q_n)}{T} \\
&= \sum_{i=1}^n \frac{K_i D_i}{Q_i (1 - q_i)} + \sum_{i=1}^n \frac{C_{iP} D_i}{(1 - q_i)} + \sum_{i=1}^n \left[\frac{C_{iH} Q_i}{2} \right] \left(1 - q_i - \frac{D_i}{P_i} \right) \\
&+ \sum_{i=1}^n \left[\frac{C_{iH} D_i Q_i}{2 P_i} \right] \left[\frac{q_i}{1 - q_i} \right] + \sum_{i=1}^n C_{iS} D_i \left[\frac{q_i}{1 - q_i} \right] + \sum_{i=1}^n \frac{C_{iN} D_i}{(1 - q_i)}
\end{aligned} \tag{19}$$

Eşitlik (5)'de verilen formüle göre; üretim miktarı (Q_1, \dots, Q_n), çevrim süresi T ile yer değiştirebilir. Bu değişim Eşitlik (19)'da yerine yazılırsa, birim zamandaki toplam maliyet Eşitlik (20)'deki gibi ifade edilebilmektedir.

$$\begin{aligned}
TMB(T) &= \sum_{i=1}^n \frac{K_i}{T} + \sum_{i=1}^n \frac{C_{iP} D_i}{(1 - q_i)} + \sum_{i=1}^n \left[\frac{C_{iH} D_i T}{2} \right] \left[\frac{1 - q_i - D_i/P_i}{1 - q_i} \right] \\
&+ \sum_{i=1}^n \left[\frac{C_{iH} D_i^2 T}{2 P_i} \right] \left[\frac{q_i}{(1 - q_i)^2} \right] + \sum_{i=1}^n C_{iS} D_i \left[\frac{q_i}{1 - q_i} \right] + \sum_{i=1}^n \frac{C_{iN} D_i}{(1 - q_i)}
\end{aligned} \tag{20}$$

Bu çalışmada, kusurlu ürünler oranının, rassal bir değişken olduğu ve bilinen bir olasılık dağılımına uyduğu varsayılmıştır. Bu durumda, çevrim süresi T sabit olamaz. Eşitlik (5)'ten çevrim süresinin beklenen değeri $E(T)$ aşağıdaki gibi elde edilmektedir.

$$E(T) = \frac{Q_i [1 - E(q_i)]}{D_i} \tag{21}$$

Benzer olarak; birim zamandaki toplam maliyetin beklenen değeri, yine yenileme ödül teoremi kullanılarak, çevrim başına toplam maliyetin beklenen değerinin çevrim süresinin beklenen değerine oranlanmasıyla Eşitlik (22)'deki gibi hesaplanmaktadır.

$$\begin{aligned}
E(TMB(T)) &= \sum_{i=1}^n \frac{K_i}{T} + \sum_{i=1}^n C_{iP} D_i \left[\frac{1}{1 - E(q_i)} \right] \\
&+ \sum_{i=1}^n \left[\frac{C_{iH} D_i T}{2} \right] \left[\frac{1 - E(q_i) - D_i/P_i}{1 - E(q_i)} \right] + \sum_{i=1}^n \left[\frac{C_{iH} D_i^2 T}{2P_i} \right] \left[\frac{E(q_i)}{(1 - E(q_i))^2} \right] \\
&+ \sum_{i=1}^n C_{iS} D_i \left[\frac{E(q_i)}{1 - E(q_i)} \right] + \sum_{i=1}^n C_{iN} D_i \left[\frac{1}{1 - E(q_i)} \right].
\end{aligned} \tag{22}$$

Optimal çevrim süresini veren eşitlik, birim zamandaki beklenen toplam maliyet fonksiyonunun, çevrim süresine göre birinci mertebeden türevinin sıfıra eşitlenmesiyle elde edilebilmektedir. Birim zamandaki beklenen toplam maliyet fonksiyonunun konveks olduğu, basit bir şekilde gösterilebilmektedir. Eşitlik (22)'deki üçüncü ve dördüncü ifadeler lineer fonksiyondurlar ve lineer fonksiyonlar hem konveks hem de konkavdırlar. Yine Eşitlik (22)'deki ikinci ve beşinci ifadeler, sabit ve aynı zamanda pozitif olduklarından konveksliği etkilememektedirler. Eşitlik (22)'deki birinci ifadenin konveks bir fonksiyon olduğu, ikinci türevinin sıfırdan büyük olduğunun irdelenmesiyle kolayca görülebilmektedir.

Birim zamandaki beklenen toplam maliyet fonksiyonun ($E(TMB(T))$), çevrim süresi T 'ye göre birinci mertebeden türevi aşağıdaki gibidir.

$$\begin{aligned}
\frac{dE(TMB(T))}{dT} &= - \sum_{i=1}^n \frac{K_i}{T^2} + \sum_{i=1}^n \left[\frac{C_{iH} D_i}{2} \right] \left[\frac{1 - E(q_i) - D_i/P_i}{1 - E(q_i)} \right] \\
&+ \sum_{i=1}^n \left[\frac{C_{iH} D_i^2}{2P_i} \right] \left[\frac{E(q_i)}{(1 - E(q_i))^2} \right].
\end{aligned} \tag{23}$$

Sonuç olarak; birim zamandaki beklenen toplam maliyet fonksiyonu minimum yapan optimal çevrim süresi T^* , birinci mertebeden türevin sıfıra eşitlenmesiyle Eşitlik (24)'te gösterildiği gibi elde edilmektedir.

$$T^* = \sqrt{\frac{2 \sum_{i=1}^n K_i}{\sum_{i=1}^n C_{iH} D_i \left[\frac{1 - E(q_i) - D_i/P_i}{1 - E(q_i)} \right] + \sum_{i=1}^n \left[\frac{C_{iH} D_i^2}{P_i} \right] \left[\frac{E(q_i)}{(1 - E(q_i))^2} \right]}}. \tag{24}$$

Eğer, kusurlu ürünler oranının rassal bir değişken değil bir sabit olduğu ve üretim sürecinin kusurlu ürünler üretmeye başlaması anına kadar geçen sürenin üstel dağılıma uyan rassal bir değişken olduğu varsayılırsa; bu durumda optimal çevrim

süresi, Ben-Daya ve Hariga (2000)'nin çalışmasındaki kusurlu ürünler içeren çok ürünlü EÜM modeli için elde edilen eşitliğe indirgenmektedir.

Eğer, üretilen ürünlerin sadece yüksek kaliteli ürünlerden oluştuğu varsayılırsa, yani kusurlu ürünler oranı sıfır olursa ($q_i = 0$); bu durumda optimal çevrim süresi, Ben-Daya ve Hariga (2000)'nin çalışmasındaki klasik çok ürünlü EÜM modeli için elde edilen Eşitlik (25)'e indirgenmektedir.

$$T_{BH}^* = \sqrt{\frac{2 \sum_{i=1}^n K_i}{\sum_{i=1}^n C_{iH} D_i \left(1 - \frac{D_i}{P_i}\right)}} \quad (25)$$

4. Çevreye Karşı Duyarlılık ile Yeni Çok Ürünlü EÜM Modeli

İşletme stoklarının yönetimindeki amaç; stok maliyetinin iki ana bileşeni olan stok bulundurma maliyeti ve talebin karşılanamaması sonucu ortaya çıkabilecek stoksuzluk maliyeti toplamalarını minimum yapacak optimal sipariş veya üretim miktarının belirlenmesidir. Stok miktarındaki değişimden direkt olarak etkilenen stok maliyet kalemleri arasında depolama maliyetleri, vergi ve sigorta maliyetleri büyük yekün teşkil etmektedir. Ayrıca, günümüz dünyasında çevresel duyarlılığın artması, stok yönetim kararlarında ekonomik ve çevresel sürdürülebilirliğin sağlanması amaçlarının da dikkate alınması gerektiğini belirtmektedir. Bu kanaatin oluşmasındaki ana etkenlerden biri; işletme faaliyetleri sonucu ortaya çıkan zararlı gaz salınımının, önlenemeyecek çevresel sorunlara yol açmasıdır.

Karbon salınımının sektörel faaliyetlere göre önemli ölçüde değişkenlik göstermesi kaçınılmazdır. Literatürde, karbon salınımının çevreye verdiği zararları konu edinen üretim ve stok kontrol modelleri üzerine oldukça fazla çalışma bulunmaktadır (Wang ve Ye, 2018; Sinha ve Modak, 2019; Wangsa vd., 2020; Huang vd., 2020). Karbon salınımı sonucu çevresel zararlara yol açabilecek işletme faaliyetlerinin başında; üretim, depolama, kusurlu ürün ya da atık oluşturma ve taşıma gelmektedir.

Çalışmanın bu bölümünde; son yıllarda işletme kararlarını önemli ölçüde etkileyen çevresel duyarlılık varsayımı ekseninde, toplam maliyeti minimum yapan optimal üretim çevrim süresinin ve dolayısıyla üretim miktarının belirlenmesi problemi ele alınmaktadır.

Çevresel duyarlılık dahilinde geliştirilen çok ürünlü EÜM modelinde çevrim başına toplam maliyet; yine üretime hazırlık maliyeti (CK), üretim maliyeti (CP), stokta tutma maliyeti (CH), kusurlu ürünler maliyeti (CS) ve tarama maliyeti (CN) toplamından oluşmaktadır. Fakat bu çalışmada düşünülen çevresel faktörler nedeniyle, stokta tutma maliyetinin tekrar ele alınması ve varsayımlar altında yeniden incelenmesi gerekmektedir. Ayrıca geliştirilen modelde, n adet ürünün tek bir makinede üretilmesi ile ilgili olarak makine kapasite sınırlaması ve ortak stok alanı için depolama alanı sınırlaması kısıtları birlikte düşünülmektedir.

Stokların depolanmasından kaynaklanan maliyetler, hem stokta tutma maliyetinden hem de karbon salınımı ile ilgili maliyetlerden oluşmaktadır. Bu çalışmada karbon salınım maliyetleri, Jaber vd. (2013), Battini vd. (2014) ve Kazemi vd. (2018)'nin

çalışmalarında olduğu gibi emisyon maliyeti (CE) ve emisyon vergisi maliyeti (CEV) ile ilişkilendirilmektedir. Ancak belirtilen çalışmalardan farklı olarak bu çalışmada; çok ürün, kusurlu üretim, sınırlı depolama alanı ve sınırlı üretim kapasitesi içeren yeni bir EÜM modeli önerilmektedir. Buna göre; i . ürünün bir biriminin depoda işgal ettiği alan a_i ve emisyon maliyeti C_{iE} 'dir. Benzer biçimde, i . ürünün bir biriminin ağırlığı g_i ve emisyon vergi maliyeti C_{iV} 'dir.

Şekil 1 baz alınarak; yüksek kaliteli ürünler ve kusurlu ürünler için çevrim başına emisyon maliyeti ve emisyon vergisi maliyeti, sırasıyla Eşitlik (26) ve (27)'deki gibi ifade edilmektedir.

$$CE = \sum_{i=1}^n C_{iE} \left[\left(\frac{Q_i^2}{2D_i} (1 - q_i) \left(1 - q_i - \frac{D_i}{P_i} \right) \right) a_i \right] + \sum_{i=1}^n C_{iE} \left[\left(\frac{Q_i^2 q_i}{2P_i} \right) a_i \right] \quad (26)$$

$$CEV = \sum_{i=1}^n C_{iV} \left[\left(\frac{Q_i^2}{2D_i} (1 - q_i) \left(1 - q_i - \frac{D_i}{P_i} \right) \right) g_i \right] + \sum_{i=1}^n C_{iV} \left[\left(\frac{Q_i^2 q_i}{2P_i} \right) g_i \right] \quad (27)$$

Üretime hazırlık süresi, birçok çalışmada model oluşturma sürecinde kısıtlayıcı bir etmen olmuştur. Bunun en önemli nedeni, makine kurulumu için gerekli zamanın kayda değer olduğudur. Üretim süresi ile karşılaştırıldığında, üretime hazırlık süresinin genelde oldukça az olduğu görülmektedir. Oysa ki, üretime hazırlık süresinin optimal sonuçlar üzerindeki etkisi düşünüldüğünde; n adet ürün için her bir çevrimde yeteri kadar üretime hazırlık süresi ve üretim süresinin varlığının incelenmesi gerekmektedir. O halde, her bir ürün için üretime hazırlık süresi ile üretim süresi toplamları, çevrim süresini geçemez. Yani, çevrim süresi ile ilgili olarak Eşitlik (28)'deki kısıt sağlanmalıdır.

$$\sum_{i=1}^n t_{1i} + \sum_{i=1}^n S_i \leq T \quad (28)$$

t_{1i} değeri Eşitlik (28)'de yerine yazıldığında ve çevrim başına üretim miktarı Q_i ile çevrim süresi T arasındaki ilişki göz önüne alındığında Eşitlik (29) elde edilmektedir.

$$T_{min} = \frac{\sum_{i=1}^n S_i}{\left[1 - \sum_{i=1}^n \frac{D_i}{P_i} \left(\frac{1}{1 - E(q_i)} \right) \right]} \leq T \quad (29)$$

Depolama alanı sınırlaması için; i . ürünün bir biriminin depoda işgal ettiği alan a_i ve çevrim başına üretim miktarı Q_i olmak üzere $a_i Q_i$ kadar alan depoda işgal edilmektedir. O halde; maksimum depolama alanı A olmak üzere, tüm ürünler göz önüne alındığında, Eşitlik (30) sağlanmalıdır.

$$\sum_{i=1}^n a_i Q_i \leq A \quad (30)$$

Aynı şekilde, üretim miktarı ile çevrim süresi arasındaki ilişki dikkate alındığında, Eşitlik (31) elde edilmektedir.

$$T \leq \frac{A}{\left[\sum_{i=1}^n a_i D_i \left(\frac{1}{1 - E(q_i)} \right) \right]} = T_{max} \quad (31)$$

Tüm bu bilgiler doğrultusunda, çevrim başına toplam maliyet fonksiyonu $TMC_E(Q_1, \dots, Q_n)$, Eşitlik (32)'de verildiği gibi yazılmaktadır.

$$\begin{aligned} TMC_E(Q_1, \dots, Q_n) &= CK + CP + CH + CS + CN + CE + CEV \\ &= \sum_{i=1}^n K_i + \sum_{i=1}^n (C_{iP} Q_i) + \sum_{i=1}^n \left[\frac{C_{iH} Q_i^2}{2D_i} \right] (1 - q_i) \left(1 - q_i - \frac{D_i}{P_i} \right) \\ &+ \sum_{i=1}^n \left[\frac{C_{iH} Q_i^2}{2P_i} \right] (q_i) + \sum_{i=1}^n (C_{iS} Q_i)(q_i) + \sum_{i=1}^n (C_{iN} Q_i) \\ &+ \sum_{i=1}^n C_{iE} \left[\left(\frac{Q_i^2}{2D_i} (1 - q_i) \left(1 - q_i - \frac{D_i}{P_i} \right) \right) a_i \right] + \sum_{i=1}^n C_{iE} \left[\left(\frac{Q_i^2 q_i}{2P_i} \right) a_i \right] \\ &+ \sum_{i=1}^n C_{iV} \left[\left(\frac{Q_i^2}{2D_i} (1 - q_i) \left(1 - q_i - \frac{D_i}{P_i} \right) \right) g_i \right] + \sum_{i=1}^n C_{iV} \left[\left(\frac{Q_i^2 q_i}{2P_i} \right) g_i \right]. \end{aligned} \quad (32)$$

Eşitlik (22)'de sunulan yaklaşımın benzerini, çevreye karşı duyarlı olma ve sınırlı depolama alanı varsayımlarının dikkate alan çevrim başına toplam maliyet fonksiyonuna uygulamak mümkündür. Bu durumda, yenileme ödül teoremi kullanılarak, birim zamandaki toplam maliyetin beklenen değeri elde edilmektedir. Sonuç olarak, birim zamandaki toplam maliyet ve kısıtlar Eşitlik (33)'teki gibi ifade edilmektedir.

$$\begin{aligned} E(TMB_E(T)) &= \sum_{i=1}^n \frac{K_i}{T} + \sum_{i=1}^n C_{iP} D_i \left[\frac{1}{1 - E(q_i)} \right] + \sum_{i=1}^n C_{iS} D_i \left[\frac{E(q_i)}{1 - E(q_i)} \right] \\ &+ \sum_{i=1}^n C_{iN} D_i \left[\frac{1}{1 - E(q_i)} \right] \\ &+ \sum_{i=1}^n \left[\frac{(C_{iH} + C_{iE} a_i C_{iV} g_i) D_i T}{2} \right] \left[\frac{1 - E(q_i) - \frac{D_i}{P_i}}{1 - E(q_i)} \right] \\ &+ \sum_{i=1}^n \left[\frac{(C_{iH} + C_{iE} a_i + C_{iV} g_i) D_i^2 T}{2P_i} \right] \left[\frac{E(q_i)}{(1 - E(q_i))^2} \right] \end{aligned}$$

Kısıtlar:

$$T_{min} = \frac{\sum_{i=1}^n S_i}{\left[1 - \sum_{i=1}^n \frac{D_i}{P_i} \left(\frac{1}{1 - E(q_i)}\right)\right]} \leq T$$

$$T \leq \frac{A}{\left[\sum_{i=1}^n a_i D_i \left(\frac{1}{1 - E(q_i)}\right)\right]} = T_{max} \quad (33)$$

Eşitlik (33) ile tanımlanan model; çevre maliyetleri, ortak çevrim süresi, sınırlı depolama alanı ve sınırlı üretim kapasitesi varsayımları altında çok ürünlü EÜM modelinin matematiksel formülasyonunu vermektedir. Eşitlik (33) incelendiğinde; bu eşitlikteki her bir ifadenin, örneğin $\sum_{i=1}^n \left[\frac{C_{iH} D_i T}{2}\right] \left[\frac{1 - E(q_i) - D_i/P_i}{1 - E(q_i)}\right]$, konveks fonksiyon olduğu ya da konveksliği etkilemediği, örneğin $\sum_{i=1}^n C_{iP} D_i \left[\frac{1}{1 - E(q_i)}\right]$, görüldüğünden; optimal çevrim süresini veren eşitlik, birim zamandaki beklenen toplam maliyet fonksiyonunun $(E(TMB_E(T)))$, çevrim süresi T 'ye göre birinci mertebeden türevinin sıfıra eşitlenmesiyle elde edilebilmektedir.

$$\frac{dE(TMB(T))}{dT} = - \sum_{i=1}^n \frac{K_i}{T^2}$$

$$+ \sum_{i=1}^n \left[\frac{(C_{iH} + C_{iE} a_i + C_{iV} g_i) D_i}{2} \right] \left[\frac{1 - E(q_i) - D_i/P_i}{1 - E(q_i)} \right] \quad (34)$$

$$+ \sum_{i=1}^n \left[\frac{(C_{iH} + C_{iE} a_i + C_{iV} g_i) D_i^2}{2 P_i} \right] \left[\frac{E(q_i)}{(1 - E(q_i))^2} \right] = 0$$

Sonuç olarak, çevresel maliyetler varsayımı altında çevrim süresi T_E , Eşitlik (35)'teki gibi hesaplanmaktadır.

$$T_E = \sqrt{\frac{2 \sum_{i=1}^n K_i}{\sum_{i=1}^n (C_{iH} + C_{iE} a_i + C_{iV} g_i) D_i \left[\frac{1 - E(q_i) - D_i/P_i}{1 - E(q_i)} \right] + \sum_{i=1}^n \left[\frac{(C_{iH} + C_{iE} a_i + C_{iV} g_i) D_i^2}{P_i} \right] \left[\frac{E(q_i)}{(1 - E(q_i))^2} \right]}} \quad (35)$$

Buradan, optimal üretim miktarı Q_{iE}^* 'yi veren eşitlik aşağıdaki gibidir.

$$Q_{iE}^* = \frac{D_i T_E^*}{(1 - E(q_i))} \quad (36)$$

5. Sayısal Analiz

Bu bölümde, geliştirilen modelin uygulanabilirliğini ve geçerliliğini göstermek amacıyla iki sayısal örnek verilmektedir. Model parametrelerinin optimal çözüm sonuçları üzerindeki etkisi, duyarlılık analizi yardımıyla incelenmektedir. Birinci örnek, Moon vd. (2002) tarafından yapılan çalışmadan; ikinci örnek ise, Taleizadeh vd. (2013) tarafından yapılan çalışmadan alınmaktadır. Moon vd. (2002) çok ürünlü EÜM modelinde, üretim sırasında üretilen kusurlu ürünlerin ve dolayısıyla ürün tarama işlemiyle üretim sürecinin yeniden işlevsel hale gelmesinin optimal çözüm sonuçları üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Matematiksel modelde, üretim sürecinin işlevsel hale getirilmesindeki maliyetler ve üretim süresi dikkate alınırken, bu sürecin yeniden işlevsel hale gelmesine kadar geçen sürenin ihmal edilebilir olduğunu varsayımlarıdır. Diğer yandan, Taleizadeh vd. (2013) çok ürünlü EÜM modelini; kusurlu ürünlerin yeniden işlenmesi, yeniden işleme sonunda bazı ürünlerin ıskarta olarak ayrılması, sınırlı üretim kapasitesi ve bütçe kısıtlarına sahip üretim hattında stoksuzluk varsayımları altında tekrar ele almışlar ve bir model geliştirmişlerdir.

Her iki çalışmada ele alınan problem aynı olsa da farklı varsayımlar altında optimal çözüm elde edilmiştir. Bu çalışmada ise aynı problem; üretilen ürünler içerisinde kusurlu ürünlerin bulunması, bu ürünlerin üretim tamamlanıncaya kadar stokta bekletilmesi ve üretim sonunda stoktan çıkarılması, üretim kapasitesinin sınırlı olması, sınırlı depolama alanı ve çevresel duyarlılık varsayımları altında yeniden ele alınmaktadır.

Yukarıda belirtilen varsayımlar altında; optimal çevrim süresini (T_E^*) ve optimal üretim miktarını (Q_{iE}^*) bulmak için geliştirilen algoritmanın adımları aşağıda verilmektedir. Geliştirilen algoritmanın adımlarına bağlı olarak, sayısal örneklerin çözümü için gerçekleştirilen tüm hesaplamalar Microsoft Excel uygulaması üzerinden yapılmıştır.

- Adım 1: Başla.
- Adım 2: Eğer $\sum_{i=1}^n \frac{D_i}{P_i(1-E(q_i))} > 1$ ise problem olumsuz hale gelir, Adım 8'e git.
- Adım 3: Eşitlikler (29) ve (31)'u kullanarak T_{min} ve T_{max} değerlerini hesapla.
- Adım 4: Eşitlik (35)'i kullanarak T_E^* 'yi hesapla.
- Adım 5: Eğer $T_{max} < T_{min}$ ise problem olumsuz hale gelir, Adım 8'e git.
- Adım 6: Eğer $T_{min} \leq T_E^* \leq T_{max}$ ise $T_E^* = T_E$ dir.
Eğer $T_E^* \geq T_{max}$ ise $T_E^* = T_{max}$ dir.
Eğer $T_E^* \leq T_{min}$ ise $T_E^* = T_{min}$ dir.
- Adım 7: T_E^* kullanarak Eşitlik (33)'den $E(TMB_E(T))$ ve Eşitlik (36)'dan Q_{iE}^* hesapla.
- Adım 8: Bitir.

5.1. Sayısal Örnek 1

Tablo 1'de Moon vd. (2002) tarafından ele alınan problemdeki parametre değerleri bulunmaktadır.

Ürün	K_i (\$)	P_i (birim/gün)	D_i (birim/gün)	C_{iN} \$	C_{iH} \$	S_i (Gün)	C_{iS} \$
1	75	1550	300	2	0.5	0.05	8
2	90	1890	400	2	0.4	0.08	5
3	50	1415	250	2	0.8	0.06	10
4	100	1260	300	2	1.0	0.05	12
5	80	1625	200	2	0.6	0.15	6

Tablo 1. Birinci Sayısal Örnek için Parametre Değerleri

Diğer parametreler için uygun değerler ise Tablo 2’de rassal olarak verilmektedir. Eğer kusurlu ürün oranı q_i nin sürekli düzgün dağılıma uyan rassal bir değişken olduğu varsayılırsa; bu durumda b_i ve c_i sırasıyla alt ve üst sınırlar olmak üzere olasılık yoğunluk fonksiyonu aşağıdaki gibidir.

$$f(q_i) = \begin{cases} \frac{1}{c_i - b_i}, & b_i \leq q_i \leq c_i \\ 0, & d. d. \end{cases} \quad (37)$$

İlgili dağılım için beklenen değer, $E(q_i) = \frac{b_i + c_i}{2}$ eşitliğinden yararlanılarak hesaplanmaktadır. Olasılık yoğunluk fonksiyonu ile ilgili parametre değerleri Tablo 2’nin yedinci ve sekizinci sütunlarında verilmektedir.

Ürün	C_{iP} (\$)	a_i (m3/birim)	C_{iE} (\$)	g_i (ton/birim)	C_{iV} (\$)	b_i	c_i
1	8	0.017	0.55	0.0020	13	0	0.02
2	5	0.020	0.56	0.0022	14	0	0.04
3	10	0.021	0.57	0.0025	15	0	0.12
4	12	0.015	0.54	0.0020	12	0	0.01
5	6	0.030	0.60	0.0021	16	0	0.10

Tablo 2. Birinci Sayısal Örnek için Gerekli Parametre Değerleri

Optimum çözümleri elde etmek için gerekli algoritma adımları aşağıdaki gibidir:

Adım 1: Başla.

Adım 2: $\sum_{i=1}^n \frac{D_i}{P_i(1-E(q_i))} = 0.968265 < 1$ sağlandığından, problemin olurlu bir çözümü bulunmaktadır. Sonraki adıma geçilir.

Adım 3: Eşitlikler (29) ve (31)’den $T_{min} = 12.28926$ ve $T_{max} = 16.81334$ olarak hesaplanır.

Adım 4: Eşitlik (35)’ten $T_E = 0.99738$ olarak hesaplanır.

Adım 5: $T_{max} \geq T_{min}$ olduğundan problemin olurlu bir çözümü vardır. Sonraki adıma geçilir.

Adım 6: $T_E \leq T_{min}$ olduğundan $T_E^* = T_{min}$ olarak belirlenir.

Adım 7: $T_E^* = 12.28926$ gün, Eşitlik (34)’ten Q_{iE}^* (Tablo 3) ve Eşitlik (33)’ten $E(TCU(T_E^*)) = \$20202.07$ olarak hesaplanır.

Geliştirilen algoritma yardımıyla elde edilen optimum ortak çevrim süresi, üretim miktarları ve günlük beklenen toplam maliyet, Tablo 3’te verilmektedir.

Ürün	T_{min} (gün)	T_{max} (gün)	T_E (gün)	T_E^* (gün)	Q_{iE}^* (birim)	$E(TCU(T))$ (\$)
1	12.289	16.813	0.997	12.289	3724.017	20202.07
2					5016.023	
3					3268.42	
4					3705.304	
5					2587.212	

Tablo 3. Çevreye Karşı Duyarlılık Dikkate Alındığında Hesaplanan Optimal Sonuçlar

Geliştirilen modelde çevresel duyarlılık dikkate alınmadığı durumda, elde edilen sonuçlar Tablo 4’de verilmektedir. Tablo 4’ten görüldüğü üzere; optimal çevrim süresi ve dolayısıyla üretim miktarları değişmezken, ilgili toplam maliyet $E(TCU(T^*))$ azalmaktadır.

Ürün	T_{min} (gün)	T_{max} (gün)	T (gün)	T^* (gün)	Q_i^* (birim)	$E(TCU(T))$ (\$)
1	12.289	16.813	1.029	12.289	3724.017	19904.79
2					5016.023	
3					3268.42	
4					3705.304	
5					2587.212	

Tablo 4. Çevreye Karşı Duyarlılık Dikkate Alınmadığında Hesaplanan Optimal Sonuçlar

Önemli model parametrelerinin optimal sonuçlar üzerindeki etkisi duyarlılık analizleri ile incelenecektir. Talep hızı (D_i), üretim hızı (P_i), üretime hazırlık süresi (S_i), emisyon maliyeti (C_{iE}) ve emisyon vergisi (C_{iV}) değerlerinin -%50 ve +%25 oranlarında azaldığı ya da +%25 ve +%50 oranlarında arttığı durumlar için optimal çevrim süresi ve birim zamandaki beklenen toplam maliyetteki değişim Tablo 5'te gösterilmektedir.

Parametre	Değişim (%)	Değişimler (%)					
		T_{min} (%)	T_{max} (%)	T_E (%)	$\sum_{i=1}^n \frac{D_i}{P_i(1-E(q_i))}$	T_E^* (%)	$E(TCU(T^*))$ (%)
D_i	+50	-107.02	-33.33	-12.81	1.452	Olursuz çözüm	
	+25	-115.09	-20	-7.67	1.210	Olursuz çözüm	
	-25	-88.41	+33.33	+12.07	0.726	-88.41	-39.63
	-50	-93.85	+100	+33.44	0.484	-89.17	-59.22
P_i	+50	-91.05	0	-3.87	0.646	-91.05	-20.20
	+25	-85.92	0	-2.38	0.775	-85.92	-19.62
	-25	-110.91	0	+4.376	1.291	Olursuz çözüm	
	-50	-103.39	0	+15.18	1.937	Olursuz çözüm	
S_i	+50	+50.00	0	0	0.968	Olursuz çözüm	
	+25	+25.00	0	0	0.968	+25.00	+6.01
	-25	-25.00	0	0	0.968	-25.00	-5.99
	-50	-50.00	0	0	0.968	-50.00	-11.92
C_{iE}	+50	0	0	-0.42	0.968	0	+0.20
	+25	0	0	-0.21	0.968	0	+0.10
	-25	0	0	+0.21	0.968	0	-0.10
	-50	0	0	+0.42	0.968	0	-0.20
C_{iV}	+50	0	0	-1.09	0.968	0	+0.53
	+25	0	0	-0.55	0.968	0	+0.27
	-25	0	0	+0.56	0.968	0	-0.27
	-50	0	0	+1.12	0.968	0	-0.53

Tablo 5. Model Parametrelerinin Optimal Sonuçlar Üzerindeki Etkisi

Tablo 5'ten aşağıdaki sonuçları çıkarmak mümkündür:

- Optimal çevrim süresi T_E^* , talep hızındaki değişimlere karşı oldukça duyarlı iken, birim zamandaki beklenen toplam maliyet $E(TCU(T_E^*))$ orta düzeyde duyarlıdır. Talep hızı azalırken, çevrim süresi ve toplam maliyet azalmaktadır. Talep hızı, +%25 ve +%50 oranlarında artırıldığında, problem olursuz hale gelmektedir. Bu durumda optimal çözüm elde edilemez. T_{min} ve T_{max} , talep hızındaki değişimlere karşı duyarlı iken, T_E daha az duyarlıdır.
- Üretim hızındaki değişimler, optimal çevrim süresi T_E^* 'ni önemli ölçüde etkilerken, beklenen toplam maliyet $E(TCU(T_E^*))$ 'i orta düzeyde etkilemektedir. Üretim hızı artarken, çevrim süresi ve toplam maliyet azalmaktadır. Üretim hızı, -%25 ve -%50 oranlarında azaltıldığında, olursuz çözüm ile karşılaşılır. T_{min} , üretim hızındaki değişimlere karşı oldukça duyarlı iken, T_E oldukça az duyarlıdır, T_{max} ise duyarlı değildir.
- Optimal çevrim süresi T_E^* , üretime hazırlık süresindeki değişimlerden orta düzeyde etkilenirken, beklenen toplam maliyet $E(TCU(T_E^*))$ daha az düzeyde etkilenmektedir. Hazırlık süresi artarken, çevrim süresi ve toplam maliyet artmaktadır. Üretim hazırlık

süresi +%50 oranında artırıldığında, problemin çözümü mevcut değildir. T_{min} , üretim hızındaki değişimlere karşı önemli ölçüde duyarlıdır, T_{max} ve T_E duyarlı değildir.

- Optimal çevrim süresi T_E^* , emisyon maliyetindeki ve emisyon vergisi maliyetindeki değişimlerden etkilenmemekte; beklenen toplam maliyet $E(TCU(T_E^*))$ ise oldukça az etkilenmektedir. Beklendiği gibi, emisyon maliyetleri artarken, toplam maliyet artmaktadır. T_{min} ve T_{max} değerleri emisyon maliyetindeki değişimlere karşı duyarlı kalırlarken; T_E , emisyon maliyeti arttığında azalmaktadır.

5.2. Sayısal Örnek 2

Taleizadeh vd. (2013) tarafından yapılan çalışmadan alınan parametre değerleri Tablo 6'da verilmektedir.

Kusurlu ürün oranının, sürekli düzgün dağılıma uyan rassal bir değişken olduğu varsayılmaktadır ve olasılık dağılım fonksiyonunun parametre değerleri Tablo 6'nın dokuzuncu ve onuncu sütunlarında verilmektedir. Diğer parametre değerleri Tablo 7'de gösterilmektedir.

Ürün	K_i	P_i	D_i	C_{iP}	C_{iH}	S_i	C_{iS}	b_i	c_i
1	450	1800	200	15	5	0.001	1	0	0.1
2	450	2500	300	12	4	0.002	0.8	0	0.15
3	450	3000	400	10	3	0.003	0.6	0	0.2
4	450	3500	500	8	2	0.004	0.4	0	0.25
5	450	4500	600	6	1	0.005	0.2	0	0.3

Tablo 6. İkinci Sayısal Örnek için Parametre Değerleri

Ürün	C_{iN}	a_i	C_{iE}	g_i	C_{iV}
	(\$)	(m3/birim)	(\$)	(ton/birim)	(\$)
1	0.05	0.001	0.83	0.015	6.5
2	0.06	0.002	0.84	0.016	7
3	0.07	0.003	0.86	0.017	7.5
4	0.08	0.004	0.89	0.018	6
5	0.09	0.005	0.90	0.020	8

Tablo 7. İkinci Sayısal Örnek için Gerekli Parametre Değerleri

Optimum çözümler, algoritma adımlarının uygulanmasıyla aşağıdaki gibi elde edilir:

Adım 1: Başla.

Adım 2: $\sum_{i=1}^n \frac{D_i}{P_i(1-E(q_i))} = 0.714965 < 1$ koşulu sağlandığından, problemin olurlu bir çözümü bulunmaktadır. Sonraki adıma geçilir

Adım 3: Eşitlikler (29) ve (31)'den $T_{min} = 0.052625$ ve $T_{max} = 62.44041$ olarak hesaplanır.

Adım 4: Eşitlik (35)'ten $T_E = 0.989361$ olarak hesaplanır.

Adım 5: $T_{max} \geq T_{min}$ olduğundan problemin olurlu bir çözümü vardır. Sonraki adıma geçilir.

Adım 6: $T_{min} \leq T_E \leq T_{max}$ olduğundan $T_E^* = T_E$ olarak belirlenir.

Adım 7: $T_E^* = 0.989361$ yıl, Eşitlik (34)'ten Q_{iE}^* (Tablo 8) ve Eşitlik (33)'ten $E(TCU(T_E^*)) = \$25126.08$ hesaplanır.

Adım 8: Bitir.

Algoritma prosedürünün uygulanması sonucunda elde edilen optimum sonuçlar Tablo 8’de özetlenmektedir.

Ürün	T_{min}	T_{max}	T_E	T_E^*	Q_{iE}^*	$E(TCU(T))$
1	0.053	62.440	0.989	0.989	208.29	25126.08
2					320.87	
3					439.72	
4					565.35	
5					698.37	

Tablo 8. Çevreye Karşı Duyarlılık Dikkate Alındığında Hesaplanan Optimal Sonuçlar

Çevre maliyetlerinin geliştirilen model üzerindeki etkisi dikkate alınmadığında, hesaplanan optimal sonuçlar Tablo 9’da özetlenmektedir. Tablo 9’dan, optimal çevrim süresi artmaktadır; fakat, yıllık toplam maliyet $E(TCU(T^*))$ azalmaktadır.

Ürün	T_{min}	T_{max}	T	T^*	Q_i^*	$E(TCU(T))$ (\$)
1	0.053	62.440	1.015	1.015	213.62	25012.56
2					329.09	
3					450.97	
4					579.82	
5					716.25	

Tablo 9. Çevreye Karşı Duyarlılık Dikkate Alınmadığında Hesaplanan Optimal Sonuçlar

Birinci sayısal örnekteki gibi; talep hızı (D_i), üretim hızı (P_i), üretime hazırlık süresi (S_i), emisyon maliyeti (C_{iE}) ve emisyon vergisi (C_{iV}) değerlerinin -%50, -%25, +%25 ve +%50 oranlarında değiştiği durum için duyarlılık analizi yapıldığında, optimal çevrim süresi ve birim zamandaki beklenen toplam maliyetteki değişim Tablo 10’da gösterilmektedir.

Parametre	Değişim (%)	Değişimler (%)					
		T_{min} (%)	T_{max} (%)	T_E (%)	$\sum_{i=1}^n \frac{D_i}{P_i(1-E(q_i))}$	T_E^* (%)	$E(TCU(T^*))$ (%)
D_i	+50	-493.44	-33.33	-15.24	1.072	Olursuz çözüm	
	+25	+168.16	-20	-8.90	0.894	-8.90	+22.24
	-25	-38.54	+33.33	+13.44	0.536	+13.44	-22.62
	-50	-55.64	+100	+36.58	0.357	+36.58	-45.80
P_i	+50	-45.54	0	-2.32	0.477	-2.32	-0.43
	+25	-33.41	0	-1.41	0.572	-1.41	-0.26
	-25	+510.18	0	+2.49	0.953	+2.49	-0.44
	-50	-166.30	0	+8.10	1.430	Olursuz çözüm	
S_i	+50	+50.00	0	0	0.715	0.00	0.00
	+25	+25.00	0	0	0.715	0.00	0.00
	-25	-25.00	0	0	0.715	0.00	0.00
	-50	-50.00	0	0	0.715	0.00	0.00
C_{iE}	+50	0	0	-0.03	0.715	-0.03	+0.01
	+25	0	0	-0.01	0.715	-0.01	0.00
	-25	0	0	+0.01	0.715	+0.01	0.00
	-50	0	0	+0.03	0.715	+0.03	-0.01
C_{iV}	+50	0	0	-1.18	0.715	-1.18	+0.22
	+25	0	0	-0.60	0.715	-0.60	+0.11
	-25	0	0	+0.61	0.715	+0.61	-0.11
	-50	0	0	+1.23	0.715	+1.23	-0.22

Tablo 10. Model Parametrelerinin Optimal Sonuçlar Üzerindeki Etkisi

Tablo 10’dan aşağıdaki çıkarımlar yapılabilmektedir:

- Optimal çevrim süresi T_E^* talep hızındaki değişimlere karşı orta düzeyde duyarlı iken, yıllık toplam maliyet $E(TCU(T_E^*))$ oldukça duyarlıdır. Talep hızı azalırken, çevrim süresi artmaktadır, fakat, toplam maliyet azalmaktadır. Talep hızı, +%50 oranında artırıldığında, Adım 2’de yer alan olurluluk koşulu sağlanmadığından problem optimal

çözüm vermez. T_{min} , talep hızındaki değişimlere karşı önemli ölçüde duyarlı iken, T_{max} orta düzeyde, T_E ise daha az duyarlıdır.

- Optimal çevrim süresi T_E^* , üretim hızındaki değişimlerden az düzeyde etkilerken, yıllık toplam maliyet $E(TCU(T_E^*))$ daha az düzeyde etkilenmektedir. Üretim hızı artarken, çevrim süresi ve toplam maliyetin azaldığı görülmektedir. Üretim hızı, -%50 oranında azaltıldığında, Adım 2'de bulunan olurluluk şartı sağlanmadığından problem olursuz hale gelir. Bu durum, Tablo 10'nun altıncı sütununda gösterilmektedir. T_{min} , üretim hızındaki değişimlere karşı oldukça duyarlı iken, T_E daha az duyarlıdır, T_{max} ise üretim hızındaki değişimlerden etkilenmemektedir.
- Optimal çevrim süresi T_E^* ve yıllık toplam maliyet $E(TCU(T_E^*))$, üretime hazırlık süresindeki değişimlere karşı duyarlı değildirler. T_{min} , üretim hızındaki değişimlere karşı oldukça duyarlıdır, T_{max} ve T_E duyarlı değildir.
- Optimal çevrim süresi T_E^* ve yıllık toplam maliyet $E(TCU(T_E^*))$, emisyon maliyetindeki ve emisyon vergisi maliyetindeki değişimlerden etkilenmektedirler. Emisyon maliyetleri arttığında, optimal çevrim süresi azalırken, toplam maliyet artmaktadır. T_{min} ve T_{max} , emisyon maliyetlerindeki değişimlerden etkilenmezken, T_E , emisyon maliyeti arttığında azalmaktadır.

6. Sonuç

Günümüzde çevreye karşı duyarlı olma düşüncesi kapsamında işletmelerin, faaliyetlerinden kaynaklanan zararlı gaz emisyonunun kontrolünü sağlamaları gerekmektedir. Çünkü çevresel duyarlılığın artması; sadece daha fazla maliyete katlanmayı değil, aynı zamanda endüstriyel alıcılarla birlikte nihai tüketicilerde bir artışı ve müşteri memnuniyetini beraberinde getirmektedir. Bu çalışmada, farklı çalışmalarda ele alınan çok ürünlü envanter probleminde toplam maliyeti oluşturan alt maliyetler birlikte düşünülerek matematiksel model tekrar elde edilmiş; ardından, çevreye karşı duyarlı olma varsayımı altında kusurlu ürünler üreten üretim sistemleri için çok ürünlü EÜM modeli geliştirilmiştir. Ortak çevrim süresi varsayımı altında, optimal üretim çevrim süresi ve çevresel duyarlılık düşüncesiyle optimal üretim miktarları geliştirilen modeldeki karar değişkenleridir. Bu nedenle, çevre maliyetlerinin, ilk defa bu çalışmada çok ürünlü bir EÜM modelinde yer alan toplam stok maliyetine dahil edilmesiyle stok literatürüne katkıda bulunulmuştur. Gıda, temizlik malzemeleri üretimi, tıbbi ilaç üretimi gibi bazı endüstrilerde kusurlu ürünlerin yeniden işlenerek ya da indirimli fiyattan satılarak değerlendirilmesi mümkün olmadığından, üretim sırasında üretilen kusurlu ürünlerin iskarta ürün olarak ayrılması söz konusudur. Bu çalışmada bu tarz endüstrilere model önerisi sunulmaktadır.

Geliştirilen model, iki sayısal örnek yardımıyla açıklanmış ve önemli model parametrelerinin optimal sonuçlar üzerindeki etkisi duyarlılık analizleri ile incelenmiştir. Sayısal örnek sonuçları, çevresel duyarlılık varsayımını dikkate alan modelde toplam maliyetin arttığını, işletmeler açısından düşünüldüğünde çevreci bir performans ortaya koyduklarından uzun vadede daha rakabetçi olabileceklerini göstermiştir (Klassen & McLaughlin, 1996). Duyarlılık analizleri sonuçlarından; talep miktarının, üretim oranının ve emisyon vergi maliyetinin toplam maliyeti ve optimal çevrim süresini önemli ölçüde etkilediği, emisyon maliyetinin ise toplam maliyeti ve optimal çevrim süresi üzerinde daha az etkisi olduğu görülmüştür.

Bu çalışmada ele alınan problem, çevreye karşı duyarlı olma varsayımı ile artan finansal yükümlülükleri, sınırlı üretim kapasitesi ve sınırlı depolama alanı varsayımları ile birlikte modele dahil ettiğinden, karar vermede etkili bir araç olarak kullanılabilir. Ayrıca; makine arızalanması ve bakım, kusurlu ürünlerin bir kısmının tamir edilebilir özellikte olması, elde stok bulunmaması, enflasyon, paranın zaman değeri ve ödemelerde gecikmeye izin verilmesi varsayımlarının modele dahil edilmesi ile çalışmanın geliştirilmesi söz konusudur.

Kaynakça

- Ağralı, S. (2012). A Dynamic Uncapacitated Lot-Sizing Problem with Co-Production. *Optimization Letters*, 6(6), 1051-1061.
- Aslani, A., Taleizadeh, A.A. ve Zanoni, S. (2017). An EOQ model with Partial Backordering with regard to Random Yield: Two Strategies to Improve Mean and Variance of the Yield. *Computers & Industrial Engineering*, 112, 379-390.
- Ay, C. ve Ecevit, Z. (2005). Çevre Bilinçli Tüketiciler. *Akdeniz Üniversitesi, İ.İ.B.F. Dergisi*, 5(10), 238-264.
- Battini, D., Persona, A. ve Sgarbossa, F. (2014). A Sustainable EOQ Model: Theoretical Formulation and Applications. *International Journal of Production Economics*, 149, 145-153.
- Ben-Daya, M. ve Hariga, M. (2000). Economic Lot Scheduling Problem with Imperfect Production Processes. *The Journal of the Operational Research Society*, 51(7), 875-881.
- Bonney, M. ve Jaber, M.Y. (2011). Environmentally responsible inventory models: Non-classical models for a non-classical era. *International Journal of Production Economics*, 133(1), 43-53.
- Büyükköçkan, G. ve Vardaloğlu, Z. (2008). Yeşil Tedarik Zinciri Yönetimi. *Lojistik Dergisi*, 8, 66-73.
- Chan, H.K., Chung, S.h. ve Lim, M.K. (2013). Recent Research Trend of Economic-Lot Scheduling Problems. *Journal of Manufacturing Technology Management*, 24(3), 465-482.
- Chiu, Y.P. (2003). Determining The Optimal Lot Size for The Finite Production Model with Random Defective Rate, The Rework Process, and Backlogging. *Engineering Optimization*, 35(4), 427-437.
- Crowley, T.J. (2000). Causes of Climate Change over the past 1000 Years. *Science*, 289(5477), 270-277.
- Hayek, P. A., & Salameh, M. K. (2001). Production Lot Sizing with The Reworking of Imperfect Quality Items Produced. *Production Planning & Control*, 12(6), 584-590.
- Hsu, W.K.K. ve Yu, H.F. (2009). EOQ Model for Imperfective Items under a One-Time-Only Discount. *Omega*, 37(5), 1018-1026.
- Huang, Y.S., Fang, C.C. ve Lin, Y.A. (2020). Inventory Management in Supply Chains with Consideration of Logistics, Green Investment and Different Carbon Emissions Policies. *Computers & Industrial Engineering*, 139, 1-16.
- Jaber, M.Y., Glock, C.H. ve El Saadany, A.M.A. (2013). Supply Chain Coordination with Emissions Reduction Incentives. *International Journal of Production Research*, 51(1), 69-82.
- Jaber, M.Y., Goyal, S.K. ve Imran, M. (2008). Economic Production Quantity Model for Items with Imperfect Quality Subject to Learning Effects. *International Journal of Production Economics*, 115, 143-150.
- Jaggi, C.K., Goel, S.K. ve Mittal, M. (2013). Credit Financing in Economic Ordering Policies for Defective Items with Allowable Shortages. *Applied Mathematics and Computation*, 219, 5268-5282.
- Kazemi, N., Abdul-Rashid, S.H., Ghazilla, R.A.R., Shekarian, E. ve Zanoni, S. (2018). Economic Order Quantity Models for Items with Imperfect Quality and Emission Considerations. *International Journal of Systems Science: Operations & Logistics*, 5(2), 99-115.
- Khalilpourazari, S., Mirzazadeh, A., Weber, G.-W. ve Pasandideh, S.H.R. (2020). A Robust Fuzzy Approach for Constrained Multi-Product Economic Production Quantity with Imperfect Items and Rework Process. *Optimization*, 69(1), 63-90.

- Khan, M., Jaber, M.Y. ve Bonney, M. (2011). An Economic Order Quantity (EOQ) for Items with Imperfect Quality and Inspection Errors. *International Journal of Production Economics*, 133,113–118.
- Klassen, R.D., McLaughlin, C.P. (1996). The Impact of Environmental Management on Firm Performance. *Management Science*, 42(8), 1199-1214.
- Lee, S. ve Kim, D. (2014). An Optimal Policy for A Single-Vendor Single-Buyer Integrated Production–Distribution Model with both Deteriorating and Defective Items. *International Journal of Production Economics*, 147, 161-170.
- Liao, J.J., Huang, K.N., Chung, K.J., Lin, S.D., Ting, P.S. ve Srivastava, H.M. (2018). Retailer's Optimal Ordering Policy in The EOQ Model with Imperfect-Quality Items under Limited Storage Capacity and Permissible Delay. *Mathematical Methods in the Applied Sciences*, 41(17), 7624-7640.
- Liao, Z., Leung, S.Y.S., Du, W. ve Gou, Z. (2017). A Me-Based Rough Approximation Approach for Multi-Period and Multi-Product Fashion Assortment Planning Problem with Substitution. *Expert Systems with Applications*, 84, 127-142.
- Ma, W.-N., Gong, D.-C. ve Lin, G.C. (2010). An Optimal Common Production Cycle Time for Imperfect Production Processes with Scrap. *Mathematical and Computer Modelling*, 52, 724–737.
- Maddah, B. ve Jaber, M.Y. (2008). Economic Order Quantity for Items with Imperfect Quality: Revisited. *International Journal of Production Economics*, 112, 808–815.
- Manna, A.M., Da, B. ve Tiwari, S. (2020). Impact of Carbon Emission on Imperfect Production Inventory System with Advance Payment Base Free Transportation. *RAIRO-Operations Research*, 54, 1103-1117.
- Moon, I., Giri, B.C. ve Choi, K. (2002). Economic Lot Scheduling Problem with Imperfect Production Processes and Setup Times. *Journal of the Operational Research Society*, 53, 620-629.
- Mousavi, S.M., Hajipour, V, Niaki, S.T.A. ve Aalifar, N. (2014). A Multi-Product Multi-Period Inventory Control Problem under Inflation and Discount: A Parameter-Tuned Particle Swarm Optimization Algorithm. *International Journal of Advance Manufacturing Technology*, 70, 1739–1756.
- Nia, A.R., Far, M.H. ve Niaki, S.T.A. (2014). A Fuzzy Vendor Managed Inventory of Multi-Item Economic Order Quantity Model under Shortage: An Ant Colony Optimization Algorithm. *International Journal of Production Economics*, 155, 259-271.
- Nobil, A.H., Sedigh, A.H.A. ve Cárdenas-Barrón, L.E. (2016). A Multiproduct Single Machine Economic Production Quantity (E_{pq}) Inventory Model with Discrete Delivery Order, Joint Production Policy and Budget Constraints. *Annals of Operations Research*, 1-37, doi: 10.1007/s10479-017-2650-9.
- Öner, S. ve Bilgiç, T. (2008). Economic Lot Scheduling with Uncontrolled Co-production. *European Journal of Operational Research*, 188, 793–810.
- Papachristos, S. ve Konstantaras, I. (2006). Economic Ordering Quantity Models for Items with Imperfect Quality. *International Journal of Production Economics*, 100, 148–154.
- Porteus, E.L. (1986). Optimal lot sizing, process quality improvement and setup cost reduction. *Operations Research*, 34, 137-144.
- Raporu 1990-2009, www.tuik.gov.tr/Kitap.do?metod=KitapDetay&KT_ID=3&KITAP_ID=243 (13.02.2018)
- Ross, S.M. (1989). *Introduction to Probability Models*. Academic Press Inc., USA.
- Salameh, M.K. ve Jaber, M.Y. (2000). Economic Production Quantity Model for Items with Imperfect Quality. *International Journal of Production Economics*, 64, 59–64.
- Sarkar, B., Saren, S., Sinha, D. ve Hur, S. (2015). Effect of Unequal Lot Sizes, Variable Setup Cost, and Carbon Emission Cost in a Supply Chain Model. *Mathematical Problems in Engineering*, 1-13, doi:10.1155/2015/469486.
- Sinha, S. ve Modak, N.M. (2019). An EPQ Model in The Perspective of Carbon Emission Reduction. *International Journal of Mathematics in Operational Research*, 14(3), 338-358.
- Taheri-Tolgari, J., Mirzazadeh, A. ve Jolai, F. (2012). An Inventory Model for Imperfect Items Under Inflationary Conditions with Considering Inspection Errors. *Computers and Mathematics with Application*, 63, 1007-1019.

- Taleizadeh, A.A., Najafi, A.A. ve Niaki, S.T.A. (2010). Economic Production Quantity Model with Scrapped Items and Limited Production Capacity. *Scientia Iranica Transaction E: Industrial Engineering*, 17(1), 58-69.
- Taleizadeh, A.A., Soleymanfar, V.R. ve Govindan, K. (2018). Sustainable Economic Production Quantity Models for Inventory Systems with Shortage. *Journal of Cleaner Production*, 174, 1011-1020.
- Taleizadeh, A.A., Wee, H.M. ve Jalali-Naini, S.G (2013). Economic Production Quantity Model with Repair Failure and Limited Capacity. *Applied Mathematical Modelling*, 37, 2765-2774.
- Toptal, A., Özlü, H. ve Konur, D. (2014). Joint Decisions on Inventory Replenishment and Emission Reduction Investment Under Different Emission Regulations. *International Journal of Production Research*, 52(1), 243-269.
- Türkiye İstatistik Kurumu-TÜİK (2011). Ulusal Seragazı Emisyon Envanteri
- Wahab, M.I.M., Mamun, S.M.H. ve Ongkunaruk, P. (2011). EOQ Models for A Coordinated Two-Level International Supply Chain Considering Imperfect Items and Enviromental Impact. *International Journal of Production Economics*, 134, 151-158.
- Wang, S. ve Ye, B. (2018). A Comparison Between Just-in-Time and Economic Order Quantity Models with Carbon Emissions. *Journal of Cleaner Production*, 187, 662-671.
- Wangsa, I.D., Tiwari, S., Wee, H.M. ve Reong, S. (2020). A Sustainable Vendor-Buyer Inventory System Considering Transportation, Loading and Unloading Activities. *Journal of Cleaner Production*, 271, 1-18.
- Zanoni, S., Mazzoldi, L., Zavanella, L.E. ve Jaber, M.Y. (2014). A Joint Economic Lot Size Model with Price and Environmentally Sensitive Demand. *Production & Manufacturing Research*, 2(1), 341-354.
- Zavanella, L.E., Marchi, B., Zanoni, S. ve Ferretti, I. (2019). Energy Considerations for The Economic Production Quantity and The Joint Economic Lot Sizing. *Journal of Business Economics*, 89(7), 845-865.