



## TAMİR SÜRECİNİ İÇEREN GERİ DÖNÜŞÜM SÜRECİ İÇİN YENİ BİR ENVANTER MODELİ GELİŞTİRİLMESİ

Ramazan EROĞLU<sup>1</sup>, Erdal AYDEMİR<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup> Süleyman Demirel Üniversitesi, Sosyal Bilimler Enstitüsü, İşletme Anabilim Dalı, Isparta, Türkiye

<sup>2</sup> Süleyman Demirel Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, Isparta, Türkiye

### Anahtar Kelimeler

*Geri Dönüşüm,  
Envanter Modeli,  
Kusurlu Üretim,  
Tamir Süreci.*

### Öz

Bu çalışmada, geri dönüşüm süreci, kusursuz hale getirilmek için toplanan ürünlerin tamamının ya geri dönüşerek ya da kısmi geri dönüşerek işlendiği ve kalan kısmın ise tamir edildikten sonra geri dönüşüme verilmesi durumunu gösteren bir envanter modeli geliştirilmiştir. Önerilen model geri dönüşüm envanter modelinin tamir durumunu ele alan bir modelidir. Model örnek bir uygulama problemi ile desteklenerek çözümlenmiştir. Ayrıca talep, marjinal geri alım oranı ve kullanım oranı birim zamanda toplam maliyet gibi matematiksel maliyetleri ve çevrim sürelerinin değişim sonuçları için üç faktör üç seviye olacak şekilde bir tam faktöriyel L27 deney tasarımı uygulaması gerçekleştirilmiştir. Sonuçta geri dönüşüm ve tamir sürecinde marketlerden geri alınan ürünler hiç atık olmayacak şekilde ya geri dönüşüyor ya da tamir edildiği görülmektedir. Sonraki araştırma konusu olarak; geri dönüşüm envanter modelleri için araştırmacılar ve endüstri uygulamacıları için araştırma boşlukları ve fırsatları gösterilmiştir.

## A NEW INVENTORY MODEL TO RECOVERY PROCESS WITH REWORK

### Keywords

*Recovery Process,  
Inventory Model,  
Imperfect Production,  
Rework.*

### Abstract

A new inventory model has been developed for the reworked case that some of the products involved in the re-production process may be defective during the recovery process of the collected products on the recovery process in this paper. The proposed model has a reworked case of recycling inventory and it is supported by a numerical problem. In addition, a full factorial L27 test design was performed with three levels for three factors for a total cost per unit time, change in recycling and reproduction by batch size for marginal buyback rate, utilization rate and recycling good quality product ratio values with the different levels of demand. As a result, the effects of some defect of re-production processes in the recycling process have been shown with the proposed inventory model. In addition, research gaps and opportunities for researchers and industry practitioners for recycling inventory models are shown as further research of the model.

### Alıntı / Cite

Eroğlu, R., Aydemir, E., (2020). Tamir Sürecini İçeren Geri Dönüşüm Süreci İçin Yeni Bir Envanter Modeli Geliştirilmesi, Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi, 8(4), 1086-1098.

### Yazar Kimliği / Author ID (ORCID Number)

R. Eroğlu, 0000-0001-5262-2707  
E. Aydemir, 0000-0003-4834-725X

### Makale Süreci / Article Process

<b>Başvuru Tarihi / Submission Date</b>	01.08.2020
<b>Revizyon Tarihi / Revision Date</b>	15.11.2020
<b>Kabul Tarihi / Accepted Date</b>	28.11.2020
<b>Yayın Tarihi / Published Date</b>	25.12.2020

## 1. Giriş (Introduction)

Son yıllarda önemi giderek artan geri dönüşüm ve uygulamaları; kullanılan materyallerin toplanması, belirli bir süreçten geçirilmesi, yeniden üretilmesi ve yeniden kullanılması işlemlerinin tümü olarak tanımlanabilir. Benzer şekilde geri dönüşüm; atıkların yeni bir materyal olarak kullanılması için sistematik olarak toplanıp sınıflandırılmasını ve istenilmeyen maddelerden temizlenmesini kapsamaktadır. Başka bir ifadeyle; atıkların

\* İlgili yazar / Corresponding author: erdalaydemir@sdu.edu.tr, +90-246-211-1453

yeniden kullanım sürecinde fiziksel ve/veya kimyasal işlemlerden geçirilerek yoluyla ikincil hammaddeye dönüştürülmesi ve tekrar üretim sürecine dahil edilmesi şeklinde tanımlanabilir (Eroğlu, 2019). Kullanılmış ürünlerin geri dönüştürülme işlemi çoğu kez bertaraf edilmesinden daha ekonomik olabilmekte ve işletmeciler tarafından daha çekici olabilmektedir. Metal hurdalar, atık kağıt ve depozitolu meşrubat şişeleri geri dönüşümün tipik örnekleridir ve uzun zamandan beri geri dönüşümde varlığını sürdürmektedir. Yeniden kullanılabilir ambalaj ve elektronik hurda geri dönüşümü ise sıklıkla karşılaşılan daha yeni örneklerdir. Ayrıca çevresel kaygıların artması ürünlerin yeniden kullanımına olan önemin giderek artmasını sağlamaktadır (Fleischmann et al., 1997). Kullanılmış ürünlerin veya atıkların toplanması yeniden kullanımı son yıllarda önemi ekonomik açıdan artmıştır. Yani kullanılan ürünlerin geri kazanılması, çevreyi ve doğayı koruması endüstriyel anlamda ve akademik araştırmalarda ilgiyi artırmıştır (Pishchulov vd., 2014). Geri dönüşüm sanayi ürünlerinde tüm yaşam döngüsü boyunca çevresel maliyetlerin, toplam üretim maliyetlerinin içerisinde de önemli bir rol oynamaktadır. Ayrıca ekonominin gelişmesiyle birlikte, küresel iklim ısınmasının hızlanması ve kaynak sıkıntısı gibi sanayileşme ile birlikte çevresel ve kaynak sorunu ortaya çıkmaktadır (Saber, 2018). Geri dönüşüm endüstrisi; birçok alan ve sektörü içine alan ve ekonomik, çevresel ve sosyal farkındalık sağlayan devasa bir sektördür. Sektörün içinde birçok toplanacak malzeme ve işlenecek ürün portföyüne sahiptir. Ürünler toplama, parçalama ve ayırma daha sonrada geri dönüştürme gibi evreleri vardır (Akçalı ve Çetinkaya, 2011). Geri dönüşüm kullanılmış ürünlerin kullanım sürelerini artırdığı için atık ürünlerin azalmasına ve doğal kaynakların ve çevrenin korunmasını amaçlar. (Jaber ve El Saadany, 2009). Sonuç olarak; geri dönüşüm materyallerini girdi olarak kullanmak, başka girdi materyalleri için oluşabilecek kıtlık durumlarının oluşmasını azaltacaktır (Lafforgue ve Rouge, 2019). Diğer yandan, atıkların geri dönüştürülmesi enerji tasarrufu ve geri dönüşüm materyalleri depolama alanlarını azaltarak doğanın korunmasına etki etmekle birlikte çevresel sorunları en aza indirgemiş olunur (Mawandiya vd., 2017). Çevresel durumları en az şekilde etkilenmekle birlikte ekonomik açıdan da fayda sağlamaktadır. Örnek verilecek olursa, geri dönüşümden üretilen "yeni gibi" ürünün maliyeti çoğu zaman sıfırdan üretilen ürünün maliyetinden %30-50 oranında daha düşük fiyatlıdır ve bu sebeple geri dönüşüm toplam maliyeti sıfırdan üretilen ürünün toplam maliyetinden daha azdır (Giri ve Sharma, 2016). Geri dönüşüm sürecinde öne çıkan firmaların başında Dell, General Motors, Hewlett-Packard (HP), IBM, Kodak ve Xerox gibi öncü firmalar yer almaktadır (Akçalı ve Çetinkaya, 2011). Yeniden üretim sürecindeki aşamalar altı bölümden oluşmaktadır. Bu aşmalar toplama, ayırma, parçalama-sökme, stok kontrol, değerlendirme ve yeni ürünü ekonomiye kazandırma seklindedir. Yeniden üretilen ürünler ne amaçla ve yöntemle geri dönüştürülecek olursa olsun, geri dönüşüm materyallerin düzenli ve ekonomik olacak şekilde belirli toplama ünitelerine gönderilmesi gerekir (Eroğlu, 2019). Geri dönüşüm sayesinde birçok alanda hem tasarrufa hem de çevresel kaygıların azaldığı görülmektedir. Bunun somut örneklerinden söz edecek olursak 31 milyon ton atık toplanmasıyla birlikte 42 milyon ağaç tasarrufu, 585 milyon kg daha az sera gazı salınımı 69 milyon m<sup>3</sup> daha az su kullanımı, 20 milyar KWh daha az enerji tasarrufu ve 13 milyar TL kazanç elde edilebilmektedir (Internet-1, 2018).

Bu çalışmada hem geri dönüşümde hem de tamirden geri dönüşüme aktarılırken kurtarma seçeneği olarak "tamir yoluyla yeni" ürünlere odaklanılmaktadır. İncelenen duruma göre; tedarikçi bir ürün için sabit talep belirlenir ve talep karşılanır. Daha sonra kullanılmış ürünler müşterilerden tekrardan toplanır. Talebi karşılamak için üç alternatif kullanılır; bunlar üretim, geri dönüşüm ve tamirdir. Tamir edilen kısım tekrardan geri dönüşüm ünitesine gelerek işlem görmesiyle "tamir yoluyla yeni" ürün envanteri elde edilmektedir.

Çalışmanın ikinci bölümünde kusurlu ürünler, yeniden işleme ve geri dönüşüm sürecinde detaylı kaynak araştırmasına yer verilmiştir. Üçüncü bölümde tamir durumunu içeren önerilen envanter modelinin elde edilişi anlatılmıştır. Daha sonra örnek test problemi üzerinde hesaplamalı sonuçlar verilmiş ve parametrelerin farklı durumları için duyarlılık analizi çalışması yapılmıştır. Son bölümde ise çalışmadan elde edilen çıkarımlar ve gelecek araştırma konularına yer verilmiştir.

## 2. Kaynak Araştırması (Literature Survey)

Son zamanlarda üretim miktarlarının çoğalması ve yeşil üretimin gerek kaynaklar gerekse çevre korunmasında yeni bir aşama ortaya sunulmuştur. Geliştirilen envanter modelinde çevreci (yeşil) üretim benimsenmiş ve önemsenmiştir. Bu aşamada geri dönüşüm önemli bir yere sahiptir ve özellikle tedarik zinciri yönetimi bu süreçte kapalı- döngü yaklaşımıyla birden fazla yeni model ile desteklendiği bilimsel yazında etkili bir yere sahiptir (Aydemir, 2015). Bu sebeple çalışmanın konusu ile ilgili olan ve örtüşen kusurlu ürünler, kalite kontrol, yeniden işleme ve geri dönüşüm modellerini kapsayan bilimsel yazın örnekleri özetlenmiştir.

### 2.1. Kusurlu Ürünler Süreci (Imperfect Production)

Rosenblatt ve Lee (1986) üretim sürecinde bir miktar kusurlu ürün çıkması durumunu içeren optimal üretim çevrimi süresi üzerindeki etkileri incelenmiştir. Ayrıca hem doğrusal, üstel hem de çok durumlu bozulma süreçleri incelenmiştir. Kim ve Hong (1999) ise, Rosenblatt ve Lee (1986) modelinde olduğu gibi kusurlu ürünleri

incelerken geçen sürenin rassal dağılıma benzediğini kabul ederek genişletmiştir. Chung ve Hou (2003) çalışmasında ise stoksuzluğa izin vererek kusurlu ürünlerin üretim sistemi içinde en uygun çalışma belirleyen bir model geliştirmişlerdir. Salameh ve Jaber (2000) çalışmasında alınan veya üretilen ürünlerin kusursuz olmadığı bir envanter modelini benimsemişlerdir ve bu çalışma, ilgi duruma stoksuzluk genişletmesi yapan ilk çalışmadır. Eroğlu ve Özdemir (2007) çalışmasında ise sipariş edilen her partinin kusurlu ürünler içeren bir EÜM modeli geliştirmiştir. Sana (2010), çalışmasında ise rastgele zamanlarda kontrol altı durumundan kontrol dışı durumuna geçileceği kusurlu üretim sisteminden bir EÜM araştırması yapmıştır. Wee vd. (2013) çalışmasında, eksiklik ve tarama kısıtlaması olan kusurlu ürünler için ekonomik üretim miktarı (EÜM) modeli ve çözüm prosedürü geliştirmektedir. Rezaei (2016) tarafından yapılan çalışma, ekonomik sipariş miktarı (ESM) modellerine örnekleme planlama ve denetleme durumları koyarak genişletmiştir. De Giovanni (2019) çalışmasında Sananın modelini geliştirerek ürün arızalarının olumsuz etkisini göz önünde bulunduran optimal kontrol modeli oluşturmuştur. Sanjai ve Periyasamy (2019) çalışmaları ise; planlı bir envanter modelinde tek bir ürünle beraber ürün tek aşamada üretilmektedir ve üretim sistemi kusurlu ürünler içerir. Khara vd. (2020) tarafından yapılan çalışma ise, iki tip üretim vardır. Bir hammaddeden üretilen ürün ikincisi kullanılmış mamul üründen yeniden üretilmiş ürün döngüsü içerisinde yeniden işlenen bazı ürünler kusurlu olma durumlarını ele almaktadır.

## 2.2. Yeniden İşleme Süreci (Rework Process)

EÜM ve ESM modellerinde tamir (yeniden işleme) süreçleri incelendiği zaman optimal üretim miktarı ve yeniden işlenebilir ürün miktarına karar vermeye çalışan ilk model Schrady (1967) tarafından geliştirilmiştir. Nahmias ve Rivera (1979) ise çalışmasında tamir edilmiş ve edilmemiş iki tür öğeyi stoklayan bir envanter modeli incelemektedir. Richter (1997) çalışmasında ise hem üretim hem de onarım için değişken kurulum numaralarına sahip ESM modeline atık bertarafı eklemiştir. Hayek ve Salameh (2001) çalışmasında stoksuzluğa izin verilerek kusurlu ürünlerin tamamını yeni gibi yapabilen bir EÜM modeli geliştirmiştir. Chan vd. (2003) çalışmasında üç tip ürünü baz alarak bu ürünleri tamir edilebilir kusursuz ve iskarta olarak farklı fiyatlarla satıla bilirlüğünü ortaya koymuştur. Dobos ve Richter (2003) ve (2004) Son zamanlarda yaptıkları çalışmalarda tersine lojistik ile tamir/üretim ve atık materyallerini içeren model öne sürdüler daha sonra bu modele öğrenme etkisini ekleyerek yeni bir EÜM üzerine çalışmışlardır. Eroğlu vd. (2008) çalışmasında iyi ve kusurlu ürünlerin taranmasıyla sipariş edilen her partinin kusurlu ve eksiklikler içerdiği bir ESM modeli geliştirmişlerdir. Taleizadeh vd. (2013) çalışmasında hurda ve yeniden işleme süreçlerini kesintilerle birlikte ekonomik üretim miktarı envanter modeli geliştirmiş ve analiz edilmiştir. Glock ve Jaber (2013) çalışmasında optimal olmayan büyük partili mallar üretebilir ve tedarik zincirine kusurlu ürünlerin girebileceği bir çalışma ortaya koymuştur ve yeni bir matematiksel model geliştirmişlerdir. Kozlovskaya vd. (2015) yeniden işleme maliyeti, atık/hurda bertaraf etme maliyeti ve değiştirme maliyeti için net çözüm bu çalışmada ortaya konulmuştur. Shah vd. (2018) çalışmasında maksimum kar elde edilmesi için kusurlu ürünleri tamir edildikten sonra hızlı bir şekilde üretime verilmesi göz önüne alınarak çevrim süresi dikkate alınmıştır. Khalilpourazari vd. (2020) Bu çalışma yeniden işleme ve kusurlu ürünleri içeren ve çok bileşenli EÜM formülasyonunu geliştirmeyi amaçlamışlardır.

## 2.3. Geri dönüşüm (Recovery process)

Koh vd. (2002) çalışmasında sabit talebin geri dönüştürülmüş ürün ve yeni satın alınan ürünlerle karşılanabileceği ortak bir ESM ve EÜM modelini aynı anda sunmuştur. Teunter (2003) çalışmasında kurtarılan (geri kazanılan) ürünler yeni kadar iyi olduğu ve yeni ürünlerle aynı talebi karşılayan bir envanter sistemi üzerinde çalışmışlardır. Fleischmann ve Kuik (2003) çalışmasında tekrardan kullanım fonksiyonunun envanter kontrol sistematik analizi açısından önemi öne sürmüşlerdir. Choi vd. (2007) çalışmasında Koh vd (2002) deki çalışmasına benzer olarak yapılmış ek olarak kullanılmış ürünler sabit bir oranla müşterilerden toplandığı ESM ve EÜM modeli geliştirmiştir. Konstantaras ve Skouri (2010) çalışmasında talebin üretim ve geri dönüşümden karşılanabileceği bir üretim ve yeniden üretim sistemini ele almışlardır. Hishamuddin vd. (2012) çalışmasında tek aşamalı bir üretim ve envanter sistemi için geliştirilen kusurlu ürünlerinde yeni bir bozulma giderme modeli sunulmaktadır. Giri ve Sharma (2015) çalışmasında sabit talep ve arz kesintisi altında ham madde tedarikçisi, üretici, perakendeci ve kullanılmış ürünleri tüketiciden toplayan bir toptancıdan oluşan kapalı döngü seri tedarik zincirini ele alan optimum üretim politikası sunan bir model geliştirmişlerdir. Kozlovskaya vd. (2016) çalışmasında yeniden üretim sürecinde ürünleri birden fazla alıcı ve bir tedarikçiden oluşan bir model öne sürmüşlerdir. Marshall ve Vierstra (2018) çalışmasında iki tür yeniden üretim ile ürünlerin kazanılması ve kazanılan materyalleri birleştirerek yeni bir ürünün ortaya çıkmasını ele alan bir model ortaya sürmüştür. Chen ve Bidanda (2019) çalışması ise kaynak geri dönüşümü ve emisyon azaltımı şeklinde iki sürdürülebilir üretim stratejisine dayanmaktadır. Tam zamanda üretim lojistiği, bileşen geri kazanımı ve emisyon kontrolü ile birden çok fabrikanın üretim envanteri sorununu ele alınmıştır. Yapılan en güncel çalışma Rani vd. (2020) tarafından gerçekleştirilmiştir. Çalışmada yeşil tedarik zincirinde eşzamanlı üretim ve yeniden üretim ile yine bir entegre model geliştirmişlerdir.

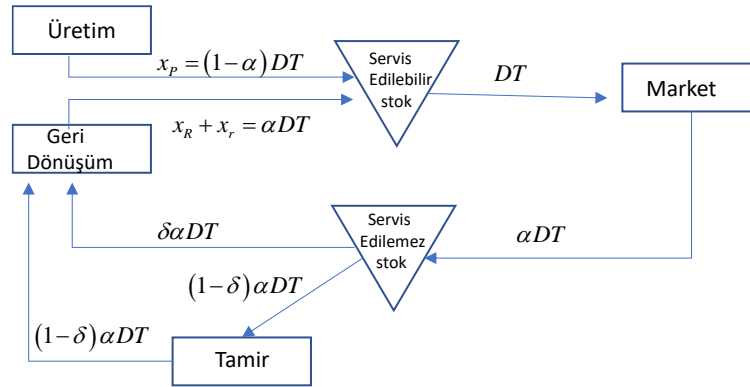
Bilimsel yazın araştırmaları sonucu bu çalışma ile; geri dönüşüm envanter modelleri ve geri dönüşüm yapılamayan

kısımda yeniden işleme sürecinin devreye girdiği durumları geliştirerek matematiksel model ve yeni araştırma ortaya konulması ile araştırmacılara, endüstri uygulayıcılarına ve bilimsel yazına katkı sağladığı düşünülmektedir.

### 3. Önerilen Envanter Modeli (Proposed Inventory Model)

Önerilen tamir durumunu içeren envanter geri dönüşüm modeli; Dobos ve Richter (2004) modeli ele alınarak geri dönüşüm sürecine ek olarak hurda olarak atılan ürünlerin tamamının tamir edilerek geri dönüşüme kazandırılması politikası ön görülmüştür. Matematiksel model kurma sürecinde endüstriyel (gerçek hayat) model hakkında ölçülemeyen ve/veya gerçekte var olan durumların modele yansıtılmasında bazı model varsayımlarına başvurulabilmektedir. Önerilen modele ait süreç işleyişi Şekil 1’de verilmiştir. Bu çalışma hem geri dönüşüm hem de iyileştirme durumları altında aşağıdaki varsayımlar altında geliştirilmiştir:

- Talep, belirleyici ve bilinendir.
- Kullanılmış ürünler, sabit ve belirli oranda müşterilerden toplanmışlardır.
- Toplanan ürünlerin belirli bir orandaki kısmı yenisi kadar iyileştirilebilmektedir.
- Maliyet parametreleri, bilinen sabitlerdir.
- Satın alma ve geri kazanım yönlendirme süreleri, belirli ve sabittir.
- Üretimde ve süreçte kesintilere/duraksamalara izin verilmemiştir.
- Ürünleri tamir etmek, satın almaktan daha ekonomiktir.
- Geri kazanım oranı toplama oranından daha küçüktür.
- Talep oranı, toplama oranından daha büyüktür.



Şekil 1. Önerilen tamir/yeniden işleme geri dönüşüm envanter modeli (The proposed inventory model for recovery items with rework)

#### Notasyon

$D$  : talep oranı (demand rate)

$R = D/\gamma$ , ( $\gamma < 1$ ) : geri dönüşüm oranı (recycling rate)

$R_1 = D/\lambda$ , ( $\lambda < 1$ ) : tamir oranı (rework rate)

$P = D/\beta$ , ( $\beta < 1$ ) : üretim oranı (production rate)

$d = \alpha D$ , ( $0 \leq \alpha \leq 1$ ) : geri alım miktarı (buyback rate)

$\alpha$  : marginal buyback rate

$\delta$  : marginal use rate

$T$  : üretim ve geri dönüşüm dahil toplam çevrim süresi (length of a production and recycling cycle)

$x_R$  : geri dönüşümden üretilen servis edilebilir ürün sayısı (recycling lot size)

$x_r$  : tamirden gelen servis edilebilir ürün sayısı (rework lot size)

$x_p$  : üretimde üretilen servis edilebilir ürün sayısı (production lot size)

$T_R$  : geri dönüşüm üretim süresi (time interval of recycling)

$T_p$  : üretim süresi (time interval of production or production time per cycle)

$T_n$  : tamirden sonraki üretim olmayan süre (time interval after rework process)



Tamir edilen miktar  $x_r$ ,

$$x_r = (1 - \delta)\alpha DT \quad (2)$$

Üretilen miktar  $x_p$ ,

$$x_p = (1 - \alpha)DT \quad (3)$$

Geri Dönüşüm Üretim süresi,  $T_R$ ,

$$T_R = x_r / R = \delta\gamma\alpha T \quad (4)$$

Tamir üretim süresi  $T_r$ ,

$$T_r = x_r / R_1 = (1 - \delta)\lambda\alpha T \quad (5)$$

Sıfırdan üretim süresi  $T_p$ ,

$$T_p = x_p / D = (1 - \alpha)T \quad (6)$$

Üretimin yapıldığı süre  $T_p'$

$$T_p' = x_p / P = (1 - \alpha)\beta T \quad (7)$$

Şekil 2 göz önüne alarak yapılan hesaplamalardan iki tane geri dönüşüm süresi formülü, iki tane tamir süresi, üretim süresi ve geri dönüşüm talebinin karşılandığı süreler hesaplanır.

$$T_R = \frac{I_R}{R - D} \quad (8)$$

$$T_R = \frac{I_n - I_1}{R - \alpha D} \quad (9)$$

$$T_r = \frac{I_r - I_R}{R_1 - D} \quad (10)$$

$$T_r = \frac{I_1 - I_2}{R_1 - \alpha D} \quad (11)$$

$$T_n = \frac{I_r}{D} \quad (12)$$

$$T_p' = \frac{I_p}{P - D} \quad (13)$$

Eşitlik 4 ve 8 birleştirilerek geri dönüşüm maksimum stok seviyesi elde edilir:

$$I_R = (1 - \gamma)\delta\alpha DT \quad (14)$$

Eşitlik 5, 10 ve 14'ten yararlanarak tamir maksimum stok seviyesi elde edilir:

$$I_r = [(1 - \lambda) + (\lambda - \gamma)\delta]\alpha DT \quad (15)$$

Eşitlik 12 ve 15 ile ise; geri dönüşümden talebin karşılandığı yani  $T_n$  tekrardan elde edilir:

$$T_n = [(1-\lambda) + (\lambda-\gamma)\delta] \alpha T \quad (16)$$

Eşitlik 7 ve 13'ten yararlanarak üretim maksimum stok seviyesi elde edilir:

$$I_p = (1-\beta)(1-\alpha)DT \quad (17)$$

Tamir sonrası servis edilemeyen miktar ( $I_2$ ) ise aşağıdaki Eşitlik 18'de ki hesaplanır:

$$I_2 = (T_R + T_r) \delta \alpha D + T_r (1-\delta) \alpha D = [\delta^2 \gamma + \lambda(1-\delta)] \alpha^2 DT \quad (18)$$

Eşitlik 5, 11 ve 18'den yararlanarak geri dönüşüm sonrası servis edilemeyen miktar elde edilir:

$$I_1 = \{(1-\lambda\alpha)(1-\delta) + \alpha[\delta^2 \gamma + \lambda(1-\delta)]\} \alpha DT \quad (19)$$

Eşitlik 4, 9 ve 19'dan yararlanılarak servis edilemeyen maksimum stok seviyesi Eşitlik 20 olarak elde edilir:

$$I_n = [1 - \delta\gamma\alpha(1-\delta)] \alpha DT \quad (20)$$

Çevrim başına toplam maliyetin içerisinde birim başına tamir maliyeti, birim başına geri alım maliyeti, birim başına geri dönüşüm maliyeti, birim başına üretim maliyeti, servis edilebilir ürünler için stok maliyeti ve servis edilemeyen ürünler için stok maliyeti gibi maliyet birimleri vardır.

$$C_T = c_r (1-\delta) \alpha DT + c_B \alpha DT + c_p (1-\alpha) DT + c_R \delta \alpha DT + s_R + s_P \\ + h_s \left( \frac{I_R T_R}{2} + \frac{(I_R + I_r) T_r}{2} + \frac{I_r T_n}{2} + \frac{I_p T_p}{2} \right) + h_n \left[ \frac{(I_1 + I_n) T_R}{2} + \frac{(I_1 + I_2) T_r}{2} + \frac{(I_2 + I_n)(T_n + T_p)}{2} \right] \quad (21)$$

Gerekli değişkenler yerine yazıldığında ve sadeleştirme işlemi yapıldığında çevrim başına toplam maliyet Eşitlik 22'de ki gibi elde edilir:

$$C_T = \left[ c_r (1-\delta) + c_B + c_p \left( \frac{1}{\alpha} - 1 \right) + c_R \delta \right] \alpha DT + s_R + s_P \\ + \left\langle h_s \left\{ \delta(\delta-2)(\gamma-\lambda) + (1-\lambda) + (1-\beta)(1/\alpha^2 - (2/\alpha) + 1) \right\} \right. \\ \left. + h_n \left\{ \delta^2 \gamma + (1/\alpha) + \lambda [1 - \delta(2-\delta)] \right\} \right\rangle \alpha^2 DT^2 / 2 \quad (22)$$

Ardından birim zaman başına toplam maliyet ( $C_U$ ), hesaplarken de ( $C_T / T$ ) işlemiyle Eşitlik 23 olarak elde edilir:

$$C_U = \left[ c_r (1-\delta) + c_B + c_p \left( \frac{1}{\alpha} - 1 \right) + c_R \delta \right] \alpha D + \frac{s_R + s_P}{T} \\ + \left\langle h_s \left\{ \delta(\delta-2)(\gamma-\lambda) + (1-\lambda) + (1-\beta)(1/\alpha^2 - (2/\alpha) + 1) \right\} \right. \\ \left. + h_n \left\{ \delta^2 \gamma + (1/\alpha) + \lambda [1 - \delta(2-\delta)] \right\} \right\rangle \alpha^2 DT / 2 \quad (23)$$

Eşitlik 23 için türev alınıp sifıra eşitlenirse eşitliğin geniş hali Eşitlik 24'te olduğu gibi elde edilir:

$$\frac{dC_U}{dT} = -\frac{s_R + s_P}{T^2} + \left\langle h_s \left\{ \delta(\delta - 2)(\gamma - \lambda) + (1 - \lambda) + (1 - \beta)(1/\alpha^2 - (2/\alpha) + 1) \right\} \right. \\ \left. + h_n \left\{ \delta^2 \gamma + (1/\alpha) + \lambda [1 - \delta(2 - \delta)] \right\} \right\rangle \alpha^2 D / 2 \quad (24)$$

Sonuçta; Eşitlik 24 çözümüyle optimal çevrim süresi ( $T^*$ ) Eşitlik 25 olarak elde edilir:

$$T^* = \sqrt{\frac{2(s_R + s_P)}{\left\langle h_s \left\{ \delta(\delta - 2)(\gamma - \lambda) + (1 - \lambda) + (1 - \beta)(1/\alpha^2 - (2/\alpha) + 1) \right\} \right. \\ \left. + h_n \left\{ \delta^2 \gamma + (1/\alpha) + \lambda [1 - \delta(2 - \delta)] \right\} \right\rangle \alpha^2 D}} \quad (25)$$

Burada;  $\frac{dC_U}{dT} = \frac{2(s_R + s_P)}{T^3} > 0$  olduğu için  $C_U$  maliyet fonksiyonu kesinlikle konvektir (dışbükey).

#### 4. Hesaplamalı Sonuçlar (Computational Results)

##### 4.1. Sayısal Örnek (Numerical Instance)

Bu bölümde geliştirilen geri dönüşüm modeli, Dobos ve Richter (2003) çalışmasında verilen sayısal örneğe uyarlanmıştır. Sayısal örneğe ait girdi değerleri Tablo 1'de ve önerilen model ile elde edilen sayısal çözümler Tablo 2'de verilmiştir.

**Tablo 1.** Sayısal örnek girdi verileri (Numerical instance input data)

$D = 1200$ adet	$h_w = 20$ \$	$\lambda = 0,9$	$S_R = 72$	$c_B = 60$ \$
$h_s = 12$ \$	$\beta = \frac{2}{3}$	$\delta = \frac{2}{3}$	$S_p = 144$	$c_R = 30$ \$
$h_n = 3$ \$	$\gamma = \frac{2}{3}$	$\alpha = \frac{1}{2}$	$c_r = 50$ \$	$c_p = 120$ \$

**Tablo 2.** Sayısal örnek çözüm sonuçları (Numerical instance results)

$C_U = \$131388$	$T = 113.56$ gün	$T_p = 56.78$ gün		
$T'_p = 38.93$ gün	$T_R = 25.23$ gün	$T_r = 17.03$ gün	$T_n = 14.51$ gün	$I_r = 47.70$ adet
$I_n = 177.77$ adet	$I_p = 62.22$ adet	$I_R = 41.48$ adet	$I_1 = 89.88$ adet	$I_2 = 55.65$ adet

##### 4.2. Duyarlılık Analizi (Sensitivity Analysis)

Bu bölümde önerilen model için marjinal geri alım oranı ( $\alpha$ ), kullanım oranı ( $\delta$ ), üretim oranı ( $\beta$ ), tamir oranı ( $\lambda$ ), talep (D) ve geri dönüşüm oranı ( $\gamma$ ) değerleri için birim zamandaki toplam maliyet açısından bir tam faktöriyel deney tasarımı yapılmıştır. Deney tasarımı faktörleri ve seviyelerine ait bilgiler Tablo 3'te verilmiştir. 6 faktör 3 seviye olacak şekilde tasarlanan tam faktöriyel deney tasarımı modelinde L27 deney tasarımı modeli kurulmuştur. Bu göre L27 tasarımı ile elde edilen birim zamanda toplam maliyet, geri dönüşüm, tamir ve yeniden üretim parti büyüklüğüne göre değişim sonuçları hesaplanmış ve varyans analizi sonuçları ise Tablo 4'te verilmiştir.



**Tablo 3.** Duyarlılık analizi seviyeleri (Levels for sensitivity analysis)

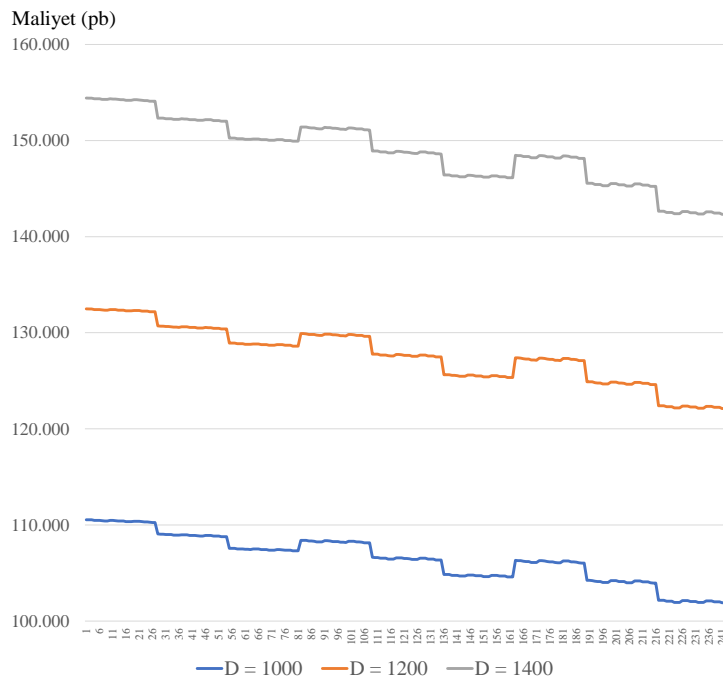
	D	$\alpha$	$\delta$	$\beta$	$\lambda$	$\gamma$
Seviye 1	1000	0.50	0.60	0.33	0.33	0.7
Seviye 2	1200	0.60	0.75	0.50	0.50	0.8
Seviye 3	1400	0.70	0.90	0.67	0.67	0.9

**Tablo 4.** L27 deney tasarımı için varyans analizi sonuçları (L27 experimental design and variance analysis results)

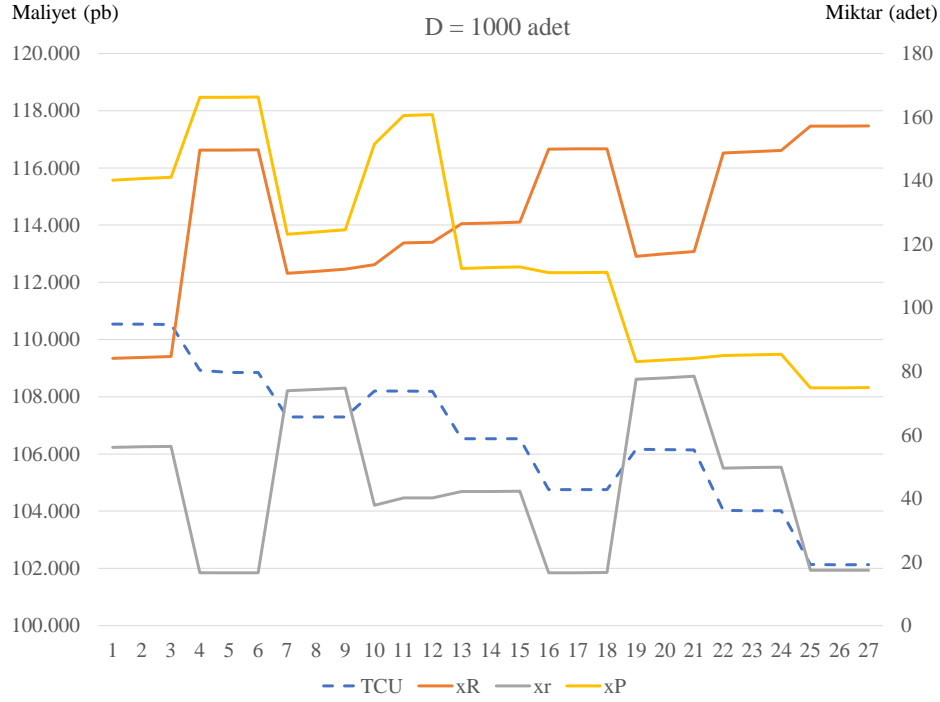
Değişim Kaynağı	Serbestlik Derecesi	Kareler Toplamı	Kareler Ortalaması	F-Değeri	P-Değeri
$\alpha$	2	103722820	51861410	233403.39	0
$\delta$	2	57212296	28606148	128742.58	0
$\beta$	2	361174	180587	812.74	0
$\gamma$	2	166346	83173	374.32	0
$\lambda$	2	1272	636	2.86	0.087
Hata	16	3555	222		
Toplam	26	161467463			

Sonuçlar detaylı olarak incelendiğinde, önerilen envanter modelinde toplam maliyet değerini; marjinal geri alım oranındaki değişim ( $\alpha$ ) %64,24 seviyesinde etkilerken, kullanım oranındaki değişim ( $\delta$ ) ise %35,43 seviyesinde etkilemektedir. Tabi bu iki oran doğrudan geri dönüşüm süreci incelenen ürünün geri dönüşüm süreç tasarımı ile doğrudan ilgilidir. Geri dönüşümü daha fazla mümkün olan ürün/ürün grupları için ürünün pazardan geri toplanabilme oranı ve toplanan ürünlerin geri dönüşümde kullanılabilme oranları belirleyicidir. Önerilen model de üretim oranı ( $\beta$ ), tamir oranı ( $\lambda$ ) ve geri dönüşüm oranı ( $\gamma$ ) seviyelerindeki değişimler birim zamanda toplam maliyet üzerinde çok anlamlı bir etkiye sahip değildir.

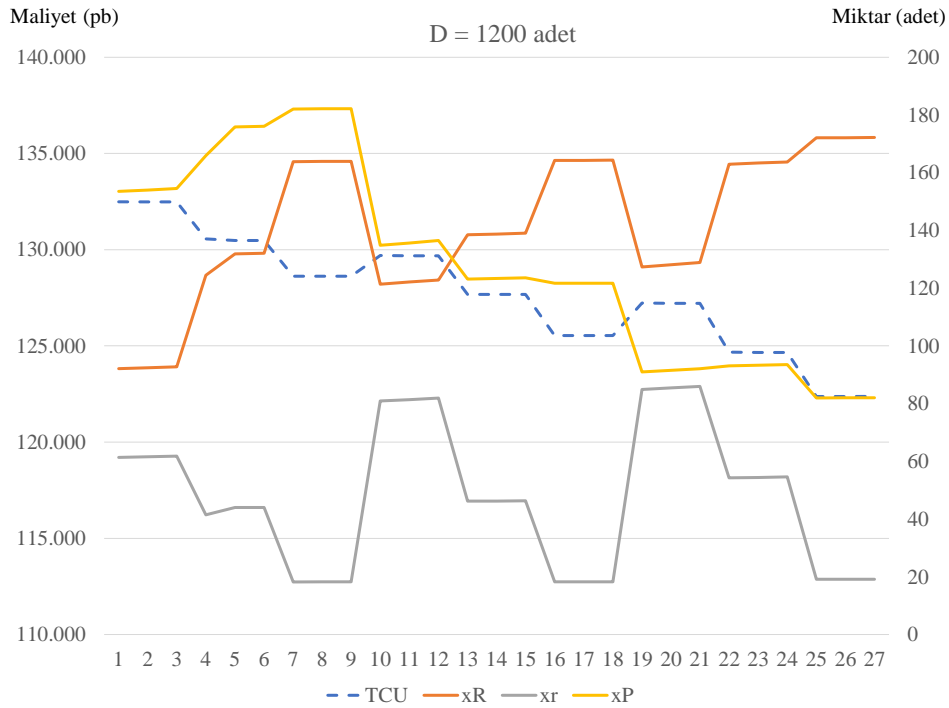
Öte yandan bu çalışmada, talep (D) değerlerindeki değişim seviyesi ise ayrıca ele alınmıştır ve ilgili maliyet değişimi Şekil 3'te verilmiştir. Buna göre, her üç talep seviyesi için örüntünün benzer şekilde davrandığı görülmektedir. Talep seviyesi envanter modelleri için önemli bir göstergedir ancak doğrudan toplam maliyeti de etkilemektedir. Dolayısıyla Şekil 3'te elde edilen sonuçlar talep seviyesi azaldıkça birim zamanda toplam maliyet değerinin de azalması şeklinde beklenen bir sonuç olarak karşımıza çıkmaktadır.

**Şekil 3.** Farklı Talep Seviyeleri için Birim Zamanda Toplam Maliyet Değişimi (Changes on the total cost unit time for the demand levels)

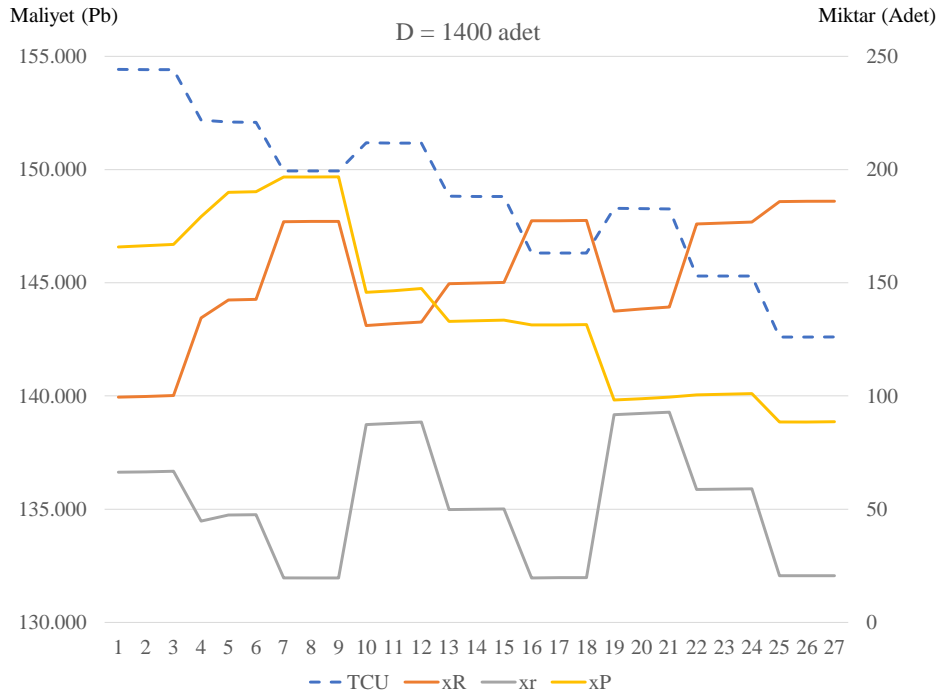
Benzer şekilde, üç talep seviyesi için ayrı ayrı L27 deney tasarımı sonuçları sırasıyla D=1000 adet, D=1200 adet ve D=1400 adet olacak şekilde Şekil 4-6 ile verilmiştir. Şekillerde sol eksende maliyet ve sağ eksende miktar bilgisi yer almaktadır. Bu kısımdaki analizde ise, geri dönüşümden üretilen servis edilebilir ürün sayısı ( $x_R$ ), tamirden gelen servis edilebilir ürün sayısı ( $x_r$ ) ve üretimde üretilen servis edilebilir ürün sayısı ( $x_P$ ) üzerindeki değişimlerin örüntüleri benzer davranış göstermektedir.



Şekil 4. D=1000 için L27 deney tasarımı sonuçları (L27 experimental design results for D=1000)



Şekil 5. D=1200 için L27 deney tasarımı sonuçları (L27 experimental design results for D=1200)



Şekil 6. D=1400 için L27 deney tasarımı sonuçları (L27 experimental design results for D=1400)

## 5. Sonuç ve Tartışma (Result and Discussion)

Her geçen gün gelişen ve artan nüfus dolayısı ile tüketen toplumun hızla artmasıyla birlikte geri dönüşüm sektörü, iş dünyası ve yeşil çevre için öne her geçen gün artmaktadır. Yaşadığımız dünyada kaynaklar sınırlı olmakla birlikte, doğal ve fosil kaynaklar da gün geçtikçe azalmaktadır. Geri dönüşüm, atıkların önlenmesi ve tekrar dünyaya kazandırılması ve doğal kaynaklarımızı verimli kullanılması için en yetkin yöntemdir. Bunun yanı sıra geri dönüşüm ekonomik fırsatlar ortaya koymakla birlikte kaynak verimliliğine de katkı sağlamaktadır. Dünyada ve yine ülkemizde geri dönüşüme yapılan teşvikler, atıkların yönetimi hususunda toplumsal farkındalığı ve sosyal farkındalığı güçlendirici projeler görülmektedir. Günümüzde üretim miktarlarının artmasıyla birlikte gerek kaynakların gerekse çevrenin korunması amacıyla yeşil üretim denilen yeni bir aşamaya geçilmiştir. Gerçekleştirilen modellerde ve yapılan her işte yeşil üretim bilinci artmakta ve önemsenmektedir. Bu süreçte önemli bir başlangıç noktası olarak geri dönüşüm imkanları da özellikle tedarik zinciri yönetimi boyunca bu dönüşüm sürecinin kapalı-döngü yaklaşımıyla birçok yeni model ile desteklediği bilimsel yazında etkili bir yere sahiptir. Daha önceki çalışmalarda tamir ve geri dönüşüm sürecinin aynı anda yer aldığı envanter modeli önerilmemiştir. Birçok çalışmada atık atılırken bu çalışmada atık bırakmadan tamamının tamir yardımıyla geri dönüştürülmektedir. Bu durum sayısal bir uygulama örneği ile desteklenmiştir. Ayrıca talep, marjinal geri alım oranı ve kullanım oranı birim zamanda toplam maliyet gibi matematiksel maliyetleri ve çevrim sürelerinin değişim sonuçları için altı faktör üç seviye olacak şekilde bir tam faktöriyel L27 deney tasarımı uygulaması gerçekleştirilmiştir ve sonuçlar tartışılmıştır.

## Çıkar Çatışması (Conflict of Interest)

Yazarlar tarafından herhangi bir çıkar çatışması beyan edilmemiştir. No conflict of interest was declared by the authors.

## Kaynaklar (References)

- Akçalı, E., & Çetinkaya, S. 2011. Quantitative models for inventory and production planning in closed-loop supply chains. *International Journal of Production Research*, 49(8), 2373-2407.
- Chan, W. M., Ibrahim R. N., Lochert, P. B., 2003. A new EPQ model: integrating lower pricing, rework and reject situations, *Production Planning and Control*, 14 (7), 588-595.
- Chen, Z., & Bidanda, B. (2019). Sustainable manufacturing production-inventory decision of multiple factories with JIT logistics, component recovery and emission control. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 128, 356-383.
- Choi, D. W., Hwang H., Koh, S., 2007. A Generalized Ordering and Recovery Policy for Reusable Items, *European Journal of Operational Research*, 182, 764-774,
- Chung K. J., Hou, K. L., 2003. An optimal production run time with imperfect production processes and allowable

- shortages, *Computers and Operations Research*, 30, 483-490.
- De Giovanni, P., 2019. An optimal control model with defective products and goodwill damages, *Annals of Operations Research*, 1-12,
- Dobos I., Richter, K., 2003. A Production /Recycling Model With Stationary Demand And Return Rates, *Central European Journal of Operations Research*, 11, (1) 35-46.
- Dobos I., Richter, K., 2004. An extended production/recycling model with stationary demand and return rates, *International Journal of Production Economics*, 90, (3) 311-323.
- Eroglu A., Ozdemir, G., 2007. An economic order quantity model with defective items and shortages, *International Journal of Production Economics*, 106, (2), 544-549.
- Eroglu, A., Sütçü A., Sulak, H., 2008. An Economic Production Quantity Model with Random Defective Rate In Imperfect Production Processes, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 23, (4) 923-929.
- Eroglu, R., 2019 *Geri dönüşüm süreci için yeni bir envanter modeli geliştirilmesi Süleyman Demirel Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü İşletme Anabilim Dalı Yüksek Lisans Tezi*, Isparta.
- Fleischmann, M., Bloemhof-Ruwaard, J.M., Dekker, R., Van der Laan, E., Van Nunen, J.A., Van Wassenhove, L.N., 1997. Quantitative models for reverse logistics: A review. *European Journal of Operational Research* 103, 1-17.
- Fleischmann, M., Kuik, R., 2003. On optimal inventory control with independent stochastic item returns, *European Journal of Operational Research*, 151, (1), 25-37.
- Glock, C. H., & Jaber, M. Y., 2013. An economic production quantity (EPQ) model for a customer-dominated supply chain with defective items, reworking and scrap. *International Journal of Services and Operations Management*, 14(2), 236-251.
- Giri, B. C., Sharma, S., 2015. Optimizing a closed-loop supply chain with manufacturing defects and quality dependent return rate, *Journal of Manufacturing Systems*, 35, 92-111.
- Giri, B. C., & Sharma, S. 2016. Optimal production policy for a closed-loop hybrid system with uncertain demand and return under supply disruption. *Journal of Cleaner Production*, 112, 2015-2028.
- Hayek P. A., Salameh, M. K., 2001. Production Lot Sizing with the Reworking of Imperfect Quality Items Produced, *Production Planning and Control*, 12, (6) 584-590.
- Hishamuddin, H., Sarker R. A., Essam, D., 2012. A disruption recovery model for a single stage production-inventory system., *European Journal of Operational Research*, 222, (3) 464-473.
- İnternet-1, (2018), "What is zero-waste?," [Online]. Available: <http://zerowaste.gov.tr/en/zero-waste/what-is-zero-waste>. [Accessed 27 11 2018].
- Jaber, M. Y., & El Saadany, A. M. (2009). The production, remanufacture and waste disposal model with lost sales. *International Journal of Production Economics*, 120(1), 115-124.
- Khalilpourazari, S., Mirzazadeh, A., Weber, G. W., & 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.
- Khara, B., Dey, J. K., & Mondal, S. K., 2020. Sustainable recycling in an imperfect production system with acceptance quality level dependent development cost and demand. *Computers & Industrial Engineering*, 142, 106300.
- Kim, C. H., Y. Hong, Y., An 1999. Optimal Production Run Length in Deteriorating Production Processes, *International Journal of Production Economics*, 58, 183-189.
- Koh, S. G., Hwang, H., Sohn K. I., Ko, C. S., 2002. An optimal ordering and recovery policy for reusable items. , *Computers & Industrial Engineering*, 43 (1-2,) 59-73.
- Konstantaras I., Skouri, K., 2010. Lot Sizing for a Single Product Recovery System with Variable Setup Numbers, *European Journal of Operational Research*, 203, 326-335.
- Kozlovskaya, N., Pakhomova N., Richter, K., 2015. Complete solution of the extended EOQ repair and waste disposal model with switching costs (No. 376), *European University Viadrina, Frankfurt (Oder)*.
- Kozlovskaya, N., Pakhomova, N., Richter, K., 2016. A general production and recovery EOQ model with stationary demand and return rates (No. 378). *Discussion Paper.*, "European University Viadrina, Frankfurt (Oder).
- Lafforgue, G., & Rouge, L. (2019). A dynamic model of recycling with endogenous technological breakthrough. *Resource and Energy Economics*, 57, 101-118.
- Marshall, R. S., Vierstra, R. D., 2018 "Autophagy: the master of bulk and selective recycling," *Annual Review of Plant Biology*, 69, 173-208.
- Mawandiya, B. K., Jha, J. K., & Thakkar, J. (2017). Production-inventory model for two-echelon closed-loop supply chain with finite manufacturing and remanufacturing rates. *International Journal of Systems Science: Operations & Logistics*, 4(3), 199-218.
- Nahmias, S., Riviera, H., A., 1979. Deterministic model for a repairable item inventory system with a finite repair rate, *International Journal of Production Research*, 17, (3) 215-221.
- Pishchulov, G., Dobos, I., Gobsch, B., Pakhomova, N., & Richter, K. (2014). A vendor-purchaser economic lot size problem with remanufacturing. *Journal of Business Economics*, 84(5), 749-791.
- Rani, S., Ali, R., & Agarwal, A. (2020). Inventory Model for Deteriorating Items in Green Supply Chain with Credit Period Dependent Demand. *International Journal of Applied Engineering Research*, 15(2), 157-172.

- Rezaei, J., 2016. Economic order quantity and sampling inspection plans for imperfect items, *Computers & Industrial Engineering*, 96, 1-7.
- Richter, K., 1997. Pure and Mixed Strategies for The EOQ Repair and Waste Disposal Problem, *OR Spectrum*, 19, (2) 123-129.
- Rosenblatt, M., Lee, H., 1986. Economic production cycles with imperfect production processes, *IIE Transactions*, . 18, 1, 48-55.
- Saberi, S. (2018). Sustainable, multiperiod supply chain network model with freight carrier through reduction in pollution stock. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 118, 421-444.
- Salameh, M. K., Jaber, M. Y., 2000. Economic Production Quantity Model For Itemswith Imperfect Quality, *International Journal of Production Economics*, 64, 59-64.
- Sana, S. S., 2010. An Economic Production Lot Size Model in An Imperfect Production System, *European Journal of Operational Research*, 201, 158-170.
- Sanjai, M., Periyasamy, S., 2019. An inventory model for imperfect production system with rework and shortages. *International Journal of Operational Research*, 34(1), 66-84.
- Schrady, D., 1967. A Deterministic Inventory Model for Repairable Items, *Naval Research Logistics*, 14, (3), 391-398.
- Shah, N. H., Patel D. G., Shah, D. B., 2018. EPQ model for returned/reworked inventories during imperfect production process under price-sensitive stock-dependent demand, *Operational Research*, 18, (2) 343-359.
- Taleizadeh, A. A., Cardenas-Barron L. E., Mohammadi, B., 2013. A Deterministic Multi Product Single Machine EPQ Model with Backordering, Scraped Products, Rework and Interruption in Manufacturing Process, *International Journal of Production Economics*, 150, 9-27.
- Teunter, R., 2003. Lot-sizing for inventory systems with product recovery, *Econometric Institute Report*, 28, 1-16,
- Wee, H. M., Wang, W. T., & Yang, P. C. (2013). A production quantity model for imperfect quality items with shortage and screening constraint. *International Journal of Production Research*, 51(6), 1869-1884.