

YENİDEN ÜRETİM ve TEK YÖNLÜ İKAME ile KAFİLE BÜYÜKLÜĞÜ BELİRLEME*

Doç. Dr. Oğuz Soylu
Orta Doğu Teknik Üniversitesi
Kuzey Kıbrıs Kampüsü



Öz

Bu çalışmada, bir üreticinin yeni ürünlere olan talebi yeni ürün üreterek, yeniden üretilmiş ürünlere olan talebi ise geri dönen ürünleri yeniden üreterek veya yeni üretilmiş ürünlerle ikame ederek karşılayabildiği bir kafiye büyüklüğü belirleme problemi ele alınmıştır. Geri dönen ürünler yeniden üretimle geri kazanılabileceği gibi bertaraf da edilebilirler. Bu problemde amaç, planlama ufkunun her bir döneminde üretilecek yeni ürün miktarını, yeniden üretilecek ürün miktarını, yeniden üretilmiş ürünlere olan talebi karşılayan yeni ürün miktarını ve bertaraf edilecek geri dönen ürün miktarını belirleyerek, üretim, ikame, bertaraf ve envanter maliyetlerini içeren toplam maliyeti enazlamaktır. Problem için yeni bir karışık tamsayı programlama modeli önerilmiş ve literatürde varolan model ile karşılaştırılmıştır. Kapsamlı sayısal deneyler yapılmış ve sonuçlar önerilen modelin varolan modele göre önemli ölçüde üstün sonuçlar verdiğini göstermiştir. Tek yönlü ikamenin ikamesiz duruma göre maliyet tasarrufu sağlayabildiği gösterilmiş ve sayısal deneylerle bu maliyet tasarrufunun büyüklüğü belirlenmiştir. Önerilen model yeni üretim, yeniden üretim, ikame ve bertaraf kararlarını birlikte veren üreticiler için etkili bir karar verme aracı olarak kullanılabilir.

Anahtar Sözcükler: Üretim Planlama, Kafiye Büyüklüğü Belirleme, Yeniden Üretim, İkame, Karışık Tamsayı Programlama

Lot Sizing with Remanufacturing and One-Way Substitution

Abstract

This study considers a lot sizing problem in which a producer can meet the demand for new products by manufacturing new products and the demand for remanufactured products by remanufacturing returned products or substituting remanufactured products with the new ones. The returned products can be recovered through remanufacturing or disposed. The aim in this problem is to minimize the total cost composed of production, inventory, substitution and disposal costs by determining the amount of new items to manufacture, the amount of used items to remanufacture, the amount of remanufactured items to be substituted by new items, and the amount of used items to dispose in each time period of the planning horizon. A new mixed integer programming model is proposed and compared with the model existing in the literature. Extensive computational experiments have been performed and the results show that the new model yields superior results than the existing one. It has been shown that one-way substitution can provide cost savings compared to the case without substitution and the magnitude of cost savings is determined through computational results. The proposed model is an effective decision-making tool for manufacturers which jointly decide on the manufacturing of new products, remanufacturing of used products, substitution of remanufactured products, and disposal of used products.

Keywords: Production Planning, Lot Sizing, Remanufacturing, Substitution, Mixed Integer Programming

* Makale geliş tarihi: 07.01.2016
Makale kabul tarihi: 18.11.2016

Yeniden Üretim ve Tek Yönlü İkame ile Kafile Büyüklüğü Belirleme

Giriş

Sürdürülebilir bir çevre için artan kamuoyu baskısı ve yasal zorunluluklar, üreticileri önceden üretmiş oldukları geri dönen ürünleri geri kazanmaya veya uygun bir şekilde bertaraf etmeye zorlamaktadır. Bu sebeplerin yanısıra, geri dönen ürünlerin geri kazanılması veya bertaraf edilmesi yeni ürünlerin üretim planlaması ile birlikte ele alındığında üreticilere önemli maliyet tasarrufu fırsatı sunmaktadır (Akçalı ve Çetinkaya 2011: 2373).

Geri dönen ürünlerin çeşitli işlemlerden geçirilip satılabilir ürünlere dönüştürülmesine geri kazanım veya yeniden üretim denilmektedir. Tek kullanımlık kamera ve yazıcı kartuşları gibi bazı ürünlerde geri dönen ürünlerden yeniden üretilenler, tüketiciler tarafından yeni üretilmiş ürünlerle tamamen aynı değerde görülürken (Helmrich vd., 2014: 68), fotokopi makinesi, lastik ve kişisel bilgisayar gibi ürünlerde ise tüketiciler tarafından daha düşük kalitede algılanmaktadır (Pineyro ve Viera, 2010: 482). Yeniden üretilenlerle yeni üretilenlerin farklı kalitelerde algılandığı ürünlerde, her iki ürün tipi için farklı talepler oluşmakta ve üreticiler bu talepleri karşılamaya çalışmaktadır. Geri dönen ürün miktarları bazen yeniden üretilmiş ürünlere olan talebi karşılamakta yeterli olmadığından, üreticiler bu ürünlere olan talebi karşılayabilmek için tek yönlü ikame politikasını uygulamaktadır. Tek yönlü ikame, yeniden üretilmiş ürünlere olan talebin yeni ürünlerle karşılanması ama tersinin geçersiz olmasıdır. Tek yönlü ikame yeniden üretilmiş ürünlere olan talebi karşılamak için bir gereklilik olmasının yanısıra maliyet tasarrufu da sağlayabilmektedir. Pineyro ve Viera (2010) tek yönlü ikamenin maliyet tasarrufu sağlayabildiğini küçük bir örnek üzerinde göstermiştir.

Bu çalışmada, Pineyro ve Viera (2010) tarafından tanımlanmış olan, yeniden üretim ve tek yönlü ikame içeren bir kafile büyüklüğü belirleme problemi ele alınmıştır. Bu problemde yeni üretilen ürünlerle yeniden üretilenler için ayrı talepler oluşmaktadır. Üretici, yeni ürünlere olan talebi karşılamak için yeni ürün üretmekte, yeniden üretilmiş ürünlere olan talebi karşılamak için ise geri dönen ürünleri yeniden üretmekte ve/veya yeni üretilmiş ürünlerle ikame etmektedir. Bu problemde amaç, planlama ufkunun her bir döneminde üretilecek yeni ürün miktarının, yeniden üretilecek ürün miktarının, yeniden üretilmiş ürünlere olan talebi karşılayan yeni ürün miktarının ve bertaraf edilecek geri dönen ürün miktarının, toplam maliyeti

enazlayacak biçimde belirlenmesidir. Bu problemin optimal çözümü zor olduğundan (Pineyro ve Viera, 2010: 485), bir sonraki kısımda da görüleceği üzere literatürde yaklaşık çözüm veren sezgisel yöntemler kullanılmıştır. Bu çalışmada ise, problem için eniyileme yazılımları tarafından doğrudan optimal olarak çözülebilecek yeni bir karışık tamsayı programlama (KTP) modeli önerilmiştir. Sayısal deneyler, önerilen KTP modelinin büyük ölçekli problemleri çözmekte oldukça başarılı olduğunu ve literatürde varolan KTP modelinden önemli ölçüde üstün sonuçlar verdiğini göstermiştir. Ayrıca, tek yönlü ikamenin ikamesiz duruma göre eşit veya daha küçük toplam maliyetli bir üretim planı verdiği gösterilmiş ve sayısal deneylerle tek yönlü ikamenin ikamesiz duruma göre sağladığı maliyet tasarrufunun büyüklüğü belirlenmiştir.

Bu çalışmanın geriye kalanı beş ana kısımdan oluşmaktadır. Birinci kısımda yeniden üretim ve ikame içeren kafile büyüklüğü belirleme problemleriyle ilgili literatür taraması verilmektedir. İkinci kısımda problemin detaylı tanımı yapılmakta ve problemin literatürde varolan KTP modeli sunulmaktadır. Problem için yeni bir KTP modeli üçüncü kısımda önerilmektedir. Dördüncü kısımda ise sayısal deney sonuçları sunulmakta ve tartışılmaktadır. Son kısımda ise bu çalışmada elde edilen sonuçlar özetlenmektedir.

1. Literatür Taraması

Literatürde yeniden üretim içeren kafile büyüklüğü belirleme problemleriyle ilgili birçok çalışma vardır. Bunların bazıları bilinen durağan (Örn. Dobos ve Richter, 2004; Teunter vd., 2009), bilinen sürekli-zamana bağlı değişen (Örn. Kleber vd., 2002; Kiesmüller 2003) ve bilinen kesikli-zamana bağlı değişen (Örn. Teunter vd., 2006; Sifaleras vd., 2015) talep ve geri dönen ürün miktarları koşullarında, bazıları ise talep ve geri dönen ürün miktarlarının olasılıksal dağılımlarının bilindiği stokastik talep ve geri dönen ürün miktarları koşullarında (Örn. Shi vd., 2011; Naeem vd., 2013) problemi ele almıştır. Talep ve geri dönen ürün miktarları için belirli bir aralık tahmininin yapılabildiği ama olasılıksal dağılımlarının bilinmediği durumu ele alan çalışmalar (Wei vd., 2011; Solyalı, 2014) veya geri dönen ürünlerin kalitesinin belirsiz olduğu çalışmalar (Denizel vd., 2010) da bulunmaktadır. Bu kısmın geri kalanında, yeniden üretim ve ikame içeren kafile büyüklüğü belirleme problemleriyle ilgili detaylı bir literatür taraması yapılmıştır. Yeniden üretim içeren kafile büyüklüğü belirleme problemleriyle ilgili genel bir literatür taraması için Akçalı ve Çetinkaya (2011)'ya başvurulabilir.

Bilinen kesikli-zamana bağlı değişen talep ve geri dönen ürünler durumunda, literatürde ikame politikası kullanan çeşitli çalışmalar bulunmaktadır. Bunların arasından, Li vd. (2006) daha yüksek kaliteli ürünlerin

daha düşük kalitelileri ikame edebildiği çok ürünlü katile büyüklüğü belirleme problemini çalışmış ve yaklaşık çözüm veren bir yöntem geliştirmiştir. Benzer şekilde, Li vd. (2007) problemin üretim kapasitesi kısıtlı ve iki ürün tipi olan hali için yaklaşık çözüm veren bir genetik algoritma geliştirmiştir. Pineyro ve Viera (2010) ise yeni üretilmiş ürünler ve yeniden üretilmiş ürünlere talebin ayrı olduğu ve sadece yeni üretilmiş olanların yeniden üretilmişlerin talebini ikame edebildiği bir katile büyüklüğü belirleme problemini ele almış ve bu problem için yaklaşık çözüm veren bir tabu arama yöntemi önermiştir.

Stokastik talep ve geri dönen ürünler durumunda, literatürde ikame politikası kullanan çeşitli çalışmalar bulunmaktadır. Inderfurth (2004) tek dönemli problem için optimal üretim ve yeniden üretim politikalarının yapısını çalışmıştır. Bayındır vd. (2005) sürekli gözden geçirmeli bir sistemi ele almış ve tavana kadar ısmarlama stok politikasını kullanarak, tek yönlü ikamenin ve yeniden üretimin kârlı olduğu şartları incelemiştir. Daha sonra, Bayındır vd. (2007) aynı incelemeyi problemin tek dönemli ve sınırlı üretim kapasitesi olan halinde yapmıştır. Ahiska ve Kurtul (2014) ise periyodik gözden geçirmeli çok dönemli bir sistemi ele almış, Markov karar süreci yaklaşımını kullanarak ikameli ve ikamesiz sistem için optimal stok politikasını bulmuş ve sistemin davranış ve kârlılığını sayısal bir çalışma ile incelemiştir. Göçer vd. (2015) talep/geri dönen ürün miktarı olasılık dağılımlarının özelliklerinin kârlılığı nasıl etkilediğini sayısal olarak araştırarak Ahiska ve Kurtul (2014)'un çalışmasını genişletmiştir. Marshall ve Archibald (2015), optimal üretim, yeniden üretim ve ikame kararlarını veren politikayı bulmak için yarı-Markov karar süreci yaklaşımını önermiştir. Kaya (2010) diğerlerinden farklı olarak kısmi bir ikame politikası kullanmış ve geri dönen ürünlere verilecek optimal teşvik, üretim ve yeniden üretim miktarlarını bulmak için tek dönemli bir model önermiştir.

2. Problemin Tanımı ve Matematiksel Modeli

Bu çalışmada, bir üreticinin yeni ürünlere olan talebi yeni ürün üreterek, yeniden üretilmiş ürünlere olan talebi ise geri dönen ürünleri yeniden üreterek (dönüştürerek) veya yeni ürünlerle ikame ederek T dönemlik bir planlama ufku boyunca karşıladığı bir problem ele alınmıştır. Bu problemin özellikleri ve varsayımları şöyledir:

- Üretici, yeni ürünleri kullanarak yeniden üretilmiş ürünlere olan talebi ikame edebilir, fakat tersi mümkün değildir (tek yönlü ikame).
- Geri dönen ürün miktarı yeniden üretilmiş ürünlere olan talebi karşılamak için yeterli olsa bile, üretici tek yönlü ikameyi maliyet tasarrufu sağlamak için kullanabilir.

- Her bir t dönemi için yeni ürünlere olan talep (D_t^n), yeniden üretilmiş ürünlere olan talep (D_t^r) ve geri dönen ürün miktarı (R_t) bilinmektedir.
- Yeni ürünlere ve yeniden üretilmiş ürünlere olan talepler stok seviyeleri sıfırın altına düşmeden üretici tarafından karşılanmalıdır.
- Yeni ürün üretmenin t döneminde üretilen her bir birim için üretim maliyeti (c_t^p) ve üretilen miktardan bağımsız bir sabit üretim maliyeti (K_t^p) vardır.
- Geri dönen ürünlerden t döneminde yeniden üretilen ürünlerin, üretilen her bir birim için üretim maliyeti (c_t^r) ve üretilen miktardan bağımsız bir sabit üretim maliyeti (K_t^r) vardır.
- Yeni ürünleri kullanarak yeniden üretilmiş ürünlere olan talebi t döneminde ikame etmenin, ikame edilen her bir birim için bir maliyeti (c_t^s) vardır.
- Geri dönen ürünler yeniden üretilebileceği gibi bertaraf da edilebilirler.
- t döneminde bertaraf edilen her bir birim için bertaraf maliyeti (c_t^d) ve bertaraf edilen miktardan bağımsız bir sabit bertaraf maliyeti (K_t^d) vardır.
- Dönem sonunda stokta tutulan her bir birim yeni ürün, yeniden üretilmiş ürün ve geri dönen ürün için sırasıyla h_t^n , h_t^r ve h_t^u ile ifade edilen bir stok tutma maliyeti vardır.

Bu problemde amaç, planlama ufku boyunca her bir dönemde üretilecek yeni ürün miktarını, yeniden üretilecek ürün miktarını, yeniden üretilmiş ürünlere olan talebi karşılayan yeni ürün miktarını ve bertaraf edilecek geri dönen ürün miktarını, toplam maliyeti enazlayacak biçimde belirlemektir. Burada toplam maliyet, üretim, yeniden üretim ve bertaraf işlemlerindeki değişken ve sabit maliyetlerinden, değişken ikame maliyetinden ve yeni ürünler, yeniden üretilmiş ürünler ve geri dönen ürünler için stok tutma maliyetlerinden oluşmaktadır. Bu problemi, KTP modeli olarak ifade edebilmek için gerekli olan karar değişkenleri aşağıda verilmiştir.

Karar Değişkenleri:

p_t : t . dönemde üretilen yeni ürün miktarı.

r_t : t . dönemde geri dönen ürünlerden yeniden üretilen ürün miktarı.

s_t : t . dönemde yeniden üretilmiş ürünlere olan talebi karşılayan yeni ürün miktarı.

d_t : t . dönemde bertaraf edilmiş geri dönen ürün miktarı.

I_t^n : t . dönemin sonunda stokta tutulan yeni ürün miktarı.

I_t^r : t . dönemin sonunda stokta tutulan yeniden üretilmiş ürün miktarı.

I_t^u : t . dönemin sonunda stokta tutulan geri dönen ürün miktarı.

$$y_t^p = \begin{cases} 1 & t. \text{ dönemde yeni ürün üretilmişse,} \\ 0 & \text{ yoksa.} \end{cases}$$

$$y_t^r = \begin{cases} 1 & t. \text{ dönemde yeniden üretim olmuşsa,} \\ 0 & \text{ yoksa.} \end{cases}$$

$$y_t^d = \begin{cases} 1 & t. \text{ dönemde geri dönen ürün bertaraf edilmişse,} \\ 0 & \text{ yoksa.} \end{cases}$$

$M_t^p = \sum_{k=t}^T (D_k^n + D_k^r)$, $M_t^r = \min\{\sum_{k=t}^T D_k^r, \sum_{k=1}^t R_k\}$ ve $M_t^d = \sum_{k=1}^t R_k$ diye tanımlayarak, Pineyro ve Viera (2010) problemi aşağıda verilen KTP modeli olarak ifade etmiştir:

$$(F) \text{ Min } \sum_{t=1}^T [c_t^p p_t + c_t^r r_t + c_t^s s_t + c_t^d d_t + K_t^p y_t^p + K_t^r y_t^r + K_t^d y_t^d + h_t^n I_t^n + h_t^r I_t^r + h_t^u I_t^u] \quad (1)$$

s.t.

$$I_t^n = I_{t-1}^n + p_t - s_t - D_t^n \quad 1 \leq t \leq T, \quad (2)$$

$$I_t^r = I_{t-1}^r + r_t + s_t - D_t^r \quad 1 \leq t \leq T, \quad (3)$$

$$I_t^u = I_{t-1}^u + R_t - r_t - d_t \quad 1 \leq t \leq T, \quad (4)$$

$$s_t \leq D_t^r \quad 1 \leq t \leq T, \quad (5)$$

$$p_t \leq M_t^p y_t^p \quad 1 \leq t \leq T, \quad (6)$$

$$r_t \leq M_t^r y_t^r \quad 1 \leq t \leq T, \quad (7)$$

$$d_t \leq M_t^d y_t^d \quad 1 \leq t \leq T, \quad (8)$$

$$I_0^n = I_0^r = I_0^u = 0 \quad (9)$$

$$p_t, r_t, s_t, d_t \geq 0 \quad 1 \leq t \leq T, \quad (10)$$

$$y_t^p, y_t^r, y_t^d \in \{0,1\} \quad 1 \leq t \leq T. \quad (11)$$

Amaç fonksiyonu (1); değişken ve sabit üretim, yeniden üretim, ikame ve bertaraf maliyetlerinin ve yeni, yeniden üretilmiş ve geri dönmüş ürünlerin stok tutma maliyetlerinin toplamıdır. (2)–(4) numaralı denklemler sırasıyla yeni, yeniden üretilmiş ve geri dönmüş ürünler için stok denge denklemleridir. (5) numaralı kısıtlar, bir dönemde ikame edilen ürün miktarının o dönemki yeniden üretilmiş ürünlere olan talebi aşamayacağını garanti etmektedir. (6)–(8) numaralı kısıtlar, sırasıyla yeni ürün üretilmişse, yeniden üretim olmuşsa ve geri dönen ürünler bertaraf edilmişse ilgili sabit maliyetin ödenmesini sağlarlar. (9) numaralı kısıtlar; yeni, yeniden üretilmiş ve geri dönen ürünlerin başlangıç stok seviyelerinin sıfır olduğunu göstermektedir. (10) numaralı kısıtlar ilgili değişkenlerin negatif değerler alamayacağını, (11) numaralı kısıtlar ise ilgili değişkenlerin 0 veya 1 değerini alabileceğini belirtmektedir.

Giriş kısmında da bahsedildiği üzere, Pineyro ve Viera (2010) küçük bir örnek üzerinde maliyet yapısı uygun olmasına ve geriye dönen ürün miktarının yeniden üretilmiş ürünlere olan talebi karşılamak için yeterli olmasına rağmen, tek yönlü ikamenin, ikamesiz duruma göre maliyet tasarrufu sağlayabildiğini göstermiştir. Bu beklenmeyen bir sonuç gibi görünse de, yukarıdaki KTP modelini kullanarak bu sonucun tesadüf olmadığı gösterilebilir. F modelini ve F modelindeki tüm s_t değişkenlerinin sıfır değerine eşitlendiği modeli ele alalım. Birinci modelin ikinciye kapsayan bir çözüm kümesi olduğu için, birinci modelin ikinciye göre eşit veya daha küçük değere sahip bir optimal amaç fonksiyonu değerine sahip olacağı sonucunu çıkarabiliriz. Dolayısıyla, tek yönlü ikamenin olabildiği durum, ikamesiz duruma göre maliyet tasarrufu sağlayabilmektedir.

3. Önerilen Model

İkinci kısımda sunulan KTP modeli (F modeli) büyük ölçekli problemleri optimal çözmekte yetersiz kaldığından, literatürde yaklaşık çözüm veren sezgisel yöntemler önerilmiştir. Bildiğimiz kadarıyla, F modeli dışında, bu çalışmada ele alınan problem için başka bir KTP modeli önerilmemiştir. Bu çalışmada ise eniyileme yazılımları tarafından optimal olarak doğrudan çözülebilecek bir model oluşturmak amacıyla tesis yer seçimi fikrine dayanan yeni bir model önerilmiştir. Tesis yer seçimi fikri, üretimle ilgili değişkenlerin belirli bir dönemin talebinin hangi dönemde üretilceğini tanımlayarak

ayrıştırılmasına dayanır. Bu fikirle daha fazla değişken tanımlansa da, problem için oluşturulan model problemin olurlu çözümlerini daha güçlü temsil etmektedir. Şöyle ki, tesis yer seçimi fikri ilk olarak tek ürünlü kapasite kısıtsız kafiye büyüklüğü belirleme probleminde kullanılmış ve bu problemin doğrusal programlama olarak çözülebilmesini sağlamıştır (Krarup ve Bilde, 1977). Benzer şekilde, tesis yer seçimi fikri, çok ürünlü kapasite kısıtlı ve kurulum süresi içeren kafiye büyüklüğü belirleme problemi için başarıyla kullanılmıştır (Van Vyve ve Wolsey, 2006; Süral vd., 2009). Oldukça yeni bir çalışma olan Cunha ve Melo (2016) ise tesis yer seçimi fikrine dayalı bir modeli, yeni üretilmiş ürünlerle yeniden üretilmiş ürünler arasında fark olmayan bir kafiye büyüklüğü belirleme problemi için önermiştir. Bu çalışmada önerilen tesis yer seçimi fikrine dayalı model, Cunha ve Melo (2016) tarafından önerilen modeli, yeni üretilmiş ürünlerle yeniden üretilmiş ürünlere ayrı taleplerin olduğu durum için, bertaraf ve tek yönlü ikame kararlarını da içerecek şekilde genişletmiştir.

Birinci kısımda verilen parametre ve karar değişkenlerinin yanında, yeni model için gerekli olan parametre ve karar değişkenleri aşağıda tanımlanmıştır.

Parametreler:

C_{tk}^p : k dönemindeki yeni ürün talebini karşılamak için t dönemde üretim yapmanın birim maliyeti ($C_{tk}^p = c_t^p + \sum_{i=t}^{k-1} h_i^n$).

C_{tk}^s : k dönemindeki yeniden üretilmiş ürünlere olan talebi t dönemde yeni ürün üreterek k dönemde ikame etmenin birim maliyeti ($C_{tk}^s = C_{tk}^p + c_k^s$).

C_{tk}^{1r} : k dönemindeki yeniden üretilmiş ürünlere olan talebi karşılamak için t dönemde yeniden üretim yapmanın birim maliyeti ($C_{tk}^{1r} = c_t^r + \sum_{i=t}^{k-1} h_i^r$).

C_{kt}^{2r} : k dönemindeki geri dönen ürünleri kullanarak t dönemde yeniden üretim yapmanın birim maliyeti ($C_{kt}^{2r} = \sum_{i=k}^{t-1} h_i^u$).

C_{kt}^d : k dönemindeki geri dönen ürünleri t dönemde bertaraf etmenin birim maliyeti ($C_{kt}^d = c_t^d + \sum_{i=k}^{t-1} h_i^u$).

C_t^l : t dönemde geri dönen ürünlerden planlama ufku sonunda stoklarda kalanların birim maliyeti ($C_t^l = \sum_{i=t}^T h_i^u$).

Karar Değişkenleri:

x_{tk}^p : k dönemindeki yeni ürünlere olan talebi karşılamak için t döneminde üretilen yeni ürün miktarı.

x_{tk}^s : k dönemindeki yeniden üretilmiş ürünlere olan talebi ikame etmek için t döneminde üretilen yeni ürün miktarı.

x_{tk}^{1r} : k dönemindeki yeniden üretilmiş ürünlere olan talebi karşılamak için t döneminde yeniden üretilen ürün miktarı.

x_{kt}^{2r} : k dönemindeki geri dönen ürünleri kullanarak t döneminde yeniden üretilen ürün miktarı.

x_{kt}^d : k dönemindeki geri dönen ürünlerden t döneminde bertaraf edilenlerin miktarı.

x_t^l : t döneminde geri dönen ürünlerden planlama ufku sonunda stoklarda kalan miktar.

Aşağıda YF olarak adlandırılmış yeni model sunulmuştur:

$$(YF) \text{ Min } \sum_{t=1}^T \sum_{k=t}^T [C_{tk}^p x_{tk}^p + C_{tk}^{1r} x_{tk}^{1r} + C_{tk}^s x_{tk}^s] + \sum_{k=1}^T \sum_{t=k}^T [C_{kt}^{2r} x_{kt}^{2r} + C_{kt}^d x_{kt}^d] \\ + \sum_{t=1}^T [C_t^l x_t^l + K_t^p y_t^p + K_t^r y_t^r + K_t^d y_t^d] \quad (12)$$

s.t. (11),

$$\sum_{t=1}^k x_{tk}^p = D_k^n \quad 1 \leq k \leq T, \quad (13)$$

$$\sum_{t=1}^k [x_{tk}^{1r} + x_{tk}^s] = D_k^r \quad 1 \leq k \leq T, \quad (14)$$

$$\sum_{t=k}^T [x_{kt}^{2r} + x_{kt}^d] + x_k^l = R_k \quad 1 \leq k \leq T, \quad (15)$$

$$\sum_{k=t}^T x_{tk}^{1r} = \sum_{k=1}^t x_{kt}^{2r} \quad 1 \leq t \leq T, \quad (16)$$

$$x_{tk}^p \leq D_k^n y_t^p \quad 1 \leq t \leq k \leq T, \quad (17)$$

$$x_{tk}^s \leq D_k^r y_t^p \quad 1 \leq t \leq k \leq T, \quad (18)$$

$$x_{tk}^{1r} \leq D_k^r y_t^r \quad 1 \leq t \leq k \leq T, \quad (19)$$

$$x_{kt}^{2r} \leq R_k y_t^r \quad 1 \leq k \leq t \leq T, \quad (20)$$

$$x_{kt}^d \leq R_k y_t^d \quad 1 \leq k \leq t \leq T, \quad (21)$$

$$x_{tk}^p, x_{tk}^s, x_{tk}^{1r}, x_t^l \geq 0 \quad 1 \leq t \leq k \leq T, \quad (22)$$

$$x_{kt}^{2r}, x_{kt}^d \geq 0 \quad 1 \leq k \leq t \leq T. \quad (23)$$

Amaç fonksiyonu (12), amaç fonksiyonu (1) ile denktir. (13) numaralı denklem k dönemindeki yeni ürünlere olan talebin zamanında karşılanmasını sağlar. (14) numaralı denklem k dönemindeki yeniden üretilmiş ürünlere olan talebin yeniden üretilen ürünlerle ve/veya yeni üretilmiş ürünleri ikame ederek karşılanmasını garanti eder. (15) numaralı denklem k döneminde geri dönen ürünlerin yeniden üretimde kullanılmasını, bertaraf edilmesini ve/veya planlama ufku sonuna kadar stoklarda tutulmasını sağlar. (16) numaralı denklem yeniden üretilmiş ürünlere olan talebi karşılamak için t döneminde yeniden üretilen ürün miktarı ile geri dönen ürünleri kullanarak t döneminde yeniden üretilen ürün miktarının eşit olmasını garanti eder. (17) ve (18) numaralı kısıtlar yeni ürün üretilmişse ilgili sabit maliyetin ödenmesini sağlarken, (19) ve (20) numaralı kısıtlar ise yeniden üretim olmuşsa ilgili sabit maliyetin ödenmesini sağlarlar. Benzer şekilde, (21) numaralı kısıtlar da geri dönen ürünler bertaraf edilmişse ilgili sabit maliyetin ödenmesini garanti eder. (22) ve (23) numaralı kısıtlar ilgili değişkenlerin negatif değerler alamayacağını gösterir.

4. Sayısal Sonuçlar

Sunulan modellerin performansının sınanması ve tek yönlü ikame politikasının maliyet tasarrufu potansiyelini değerlendirebilmek için veri setleri üzerinde deneyler yapılmıştır. F ve YF modelleri varolan en iyi ticari eniyileme yazılımlarından biri olan CPLEX 12.5 ile çözülmüştür. Tüm sayısal deneyler Windows 7 işletim sisteminin kurulu olduğu, 2.4 GHz hızında ve 12 çekirdekli işlemcisi olan, 48 GB RAM'a sahip bir iş istasyonu üzerinde yapılmıştır.

Sayısal deneylerde kullanılacak veri setleri Pineyro ve Viera (2010)'daki yöntemle oluşturulmuştur. Buna göre, düşük, orta ve yüksek düzey olmak üzere üç farklı maliyet durumu ele alınmış ve bu maliyetler Tablo 1'de sunulmuş olan aralıklardan sürekli tekdüze (uniform) olasılık dağılımı kullanılarak oluşturulmuştur. Yeni ve yeniden üretilmiş ürünlere olan talepleri ve geri dönen ürün miktarlarını oluşturmak için Poisson olasılık dağılımı kullanılmış ve bu dağılımdaki ortalama için farklı değerler alınarak değişik senaryolar oluşturulmuştur. Poisson olasılık dağılımındaki ortalama, yeni ürünlere olan talep (D_t^n) için 10 değerini; yeniden üretilmiş ürünlere olan talep (D_t^r) için 5, 7,5 ve 10 değerlerini; geri dönen ürün miktarları (R_t) için ise 2,5, 5, 7,5 ve 10 değerlerini almaktadır. Bunlara ek olarak, sürekli tekdüze olasılık dağılımı kullanılarak, yeni ürün üretmenin birim üretim maliyeti (c_t^p) [30,50]

aralığından, yeni ürün üretmenin sabit üretim maliyeti (K_t^p) [300,500] aralığından ve yeni ürün stok tutma maliyeti (h_t^n) [10,20] aralığından elde edilmiştir. Sabit maliyetler için düşük (LF) ve yüksek (HF) düzey olmak üzere iki farklı seviye ele alınmıştır. Buna göre, düşük düzey sabit maliyetler için Tablo 1’de ve yukarıda verilen aralıklar kullanılmıştır. Yüksek düzey sabit maliyetleri elde etmek için ise düşük düzeydeki sabit maliyetler altı ile çarpılmıştır. Küçük, orta ve büyük boyutlu problemler oluşturmak için planlama ufku sırasıyla 25, 50 ve 75 olarak belirlenmiştir. Parametrelerin her bir kombinasyonu için 10 farklı problem oluşturulmuştur. Sonuç olarak toplamda 2.160 farklı test problemi elde edilmiştir.

Tablo 1. Veri Setlerini Oluşturmada Maliyetler için Kullanılan Aralıklar

Maliyetler	Düşük	Orta	Yüksek
K_t^r	[30,60]	[60,100]	[100,150]
c_t^r	[10,20]	[20,30]	[30,40]
K_t^d	[10,20]	[30,40]	[60,80]
c_t^d	[2,5]	[5,10]	[10,15]
h_t^r	[5,8]	[8,12]	[12,15]
h_t^u	[1,3]	[3,5]	[5,8]
c_t^s	[10,15]	[5,10]	[1,5]

Kaynak: Pineyro ve Viera (2010).

F ve YF modelleri 2.160 test probleminde sınanmış ve elde edilen sonuçlar özet olarak Tablo 2’de sunulmuştur. Tablo 2’nin birinci sütunu planlama ufkunun uzunluğunu, ikinci ve dördüncü sütunlar sırasıyla F ve YF modellerinin 720 test probleminin çözümü için gereken ortalama çözüm sürelerini (saniye), üçüncü ve beşinci sütunlar ise sırasıyla F ve YF modellerinin optimal olarak çözemediği test problemlerinin sayısını göstermektedir. Tablo 2’de sunulmuş olan sonuçlar, YF modelinin F modelinden oldukça üstün olduğunu göstermektedir. Özellikle planlama ufkunun 75 dönemden oluştuğu problemlerde, YF modeli, 720 test probleminin sadece 16’sını optimal olarak çözemezken, F modeli 245 tanesini çözememiştir. YF modelinin optimal olarak çözemediği 16 test problemindeki en yüksek optimalite farkı (bulunan en iyi olurlu çözüm ile en iyi alt sınır arasındaki yüzdesel fark) ise %0,16 gibi oldukça küçük bir değerdir ve bu da YF modelinin bu problemlerde dahi oldukça iyi sonuçlar verdiğini göstermektedir.

Tablo 2. Planlama Ufkuna göre *F* ve *YF* Modelleriyle Elde Edilmiş Özet Sonuçlar

<i>T</i>	<i>F</i>		<i>YF</i>	
	Süre	#NO	Süre	#NO
25	0,87	0	0,67	0
50	50,34	0	9,66	0
75	1463,23	245	244,76	16

Tablo 3. *F* ve *YF* Modelleriyle Elde Edilmiş Detaylı Sonuçlar

<i>T</i>	LF/HF	L/M/H	<i>F</i>		<i>YF</i>	
			Süre	#NO	Süre	#NO
25	LF	L	0,39	0	0,52	0
		M	0,45	0	0,67	0
		H	0,51	0	0,67	0
	HF	L	0,99	0	0,68	0
		M	1,22	0	0,75	0
		H	1,66	0	0,70	0
50	LF	L	0,91	0	3,87	0
		M	2,13	0	9,81	0
		H	4,26	0	9,99	0
	HF	L	40,30	0	6,91	0
		M	71,12	0	14,13	0
		H	183,31	0	13,27	0
75	LF	L	2,58	0	85,92	0
		M	9,94	0	206,58	1
		H	75,47	0	337,59	6
	HF	L	2024,15	43	195,33	2
		M	3110,25	87	386,91	5
		H	3556,97	115	256,22	2

* LF: Düşük sabit maliyet, HF: Yüksek sabit maliyet

** L: Düşük, M: Orta, H: Yüksek

F ve YF modellerinin performanslarını detaylı olarak incelemek için sonuçlar planlama ufkunun uzunluğu, sabit maliyetlerin düzeyi ve tüm maliyetlerin düzeyine göre Tablo 3'te sunulmuştur. Tablo 3'ün birinci sütunu planlama ufkunun uzunluğunu, ikinci sütun sabit maliyetlerin düzeyini, üçüncü sütun tüm maliyetlerin düzeyini, dördüncü ve altıncı sütunlar sırasıyla F ve YF modellerinin saniye olarak ortalama çözüm sürelerini (her bir değer 120 test probleminin ortalamasını göstermektedir), beşinci ve yedinci sütunlar ise sırasıyla F ve YF modellerinin optimal olarak çözemediği test problemlerinin sayısını göstermektedir.

Tablo 3'ten çıkarılabilecek önemli sonuçlar şunlardır:

- Maliyetlerin düzeyi arttıkça F modelinin çözümü zorlaşmaktadır. YF modelinin çözümü ise düşük düzeyden orta düzeye geçince zorlaşmakta fakat orta düzeyden yüksek düzeye geçince genellikle kolaylaşmaktadır.
- Sabit maliyetlerin düzeyi düşüken F modeli YF modeline göre daha hızlı çözülmektedir. Yüksek sabit maliyetler durumunda ise YF modeli F modeline göre daha fazla optimal çözümü daha hızlı bulmaktadır. Ayrıca, sabit maliyetlerin düzeyinin, YF modelinin çözümünü F modelinin çözümü kadar etkilemediği görülmektedir. Sonuç olarak, sabit maliyetlerin düşük ve yüksek olduğu durumların ortalaması alındığında (Tablo 2'de de görüldüğü üzere), YF modeli F modelinden çok daha iyi sonuçlar vermektedir.
- Beklendiği üzere planlama ufku uzunluğu arttıkça test problemlerinin F ve YF modelleriyle optimal çözümü zorlaşmaktadır.

Tek yönlü ikame politikasının maliyet tasarrufu potansiyelini değerlendirebilmek için sayısal deneyler yapılmış ve sonuçlar Tablo 4'te sunulmuştur. Tablo 4'ün birinci sütunu planlama ufkunun uzunluğunu, ikinci sütun sabit maliyetlerin düzeyini, üçüncü sütun yeniden üretilmiş ürünlere olan talep için Poisson olasılık dağılımındaki ortalamayı (λ_{DR}), dördüncü sütun geri dönen ürün miktarı için Poisson olasılık dağılımındaki ortalamayı (λ_R), beşinci sütun tüm maliyetlerin düzeyini, altıncı sütun ise ten yönlü ikamenin ikameye izin verilmediği duruma göre sağladığı maliyet tasarrufu yüzdesini göstermektedir. Burada birinci dikkat edilmesi gereken husus, λ_{DR} (λ_R) arttığında, yeniden üretilmiş ürünlere olan talep (geri dönen ürün miktarları) artmaktadır. Dikkat edilmesi gereken ikinci husus, ikameye izin verilmediğinde olurlu çözüm elde edebilmek için geri dönen ürün miktarlarının yeniden üretilmiş ürünlere olan talepten fazla olması gerektiğidir. Bunu sağlayabilmek

için λ_R değeri λ_{DR} değerinden büyük seçilmiş ve ikameye izin verilmediğinde olurlu çözümü olmayan test problemleri hesaplamalara dahil edilmemiştir. Üçüncü dikkat edilmesi gereken husus ise gerçek maliyet tasarrufunu gözlemleyebilmek için optimal çözülebilecek test problemlerinin (planlama ufku uzunluğu 25 ve 50 olanlar) kullanılmış olmasıdır.

Tablo 4. Tek Yönlü İkame Politikasının Sağladığı Maliyet Tasarrufu

T	LF / HF	λ_{DR}	λ_R	L / M / H	%Imp	
25	LF	5	7,5	L	0,00	
				M	0,04	
				H	0,54	
		10	L	0,00		
			M	0,01		
			H	0,39		
	7,5	10	L	0,00		
			M	0,03		
			H	0,44		
		HF	5	7,5	L	1,13
					M	1,41
					H	3,86
10	L		0,27			
	M		0,88			
	H		3,31			
50	LF	5	7,5	L	0,00	
				M	0,02	
				H	0,54	
		10	L	0,00		
			M	0,00		

				H	0,37
		7,5	10	L	0,00
				M	0,02
				H	0,32
	HF	5	7,5	L	0,39
				M	1,03
				H	2,87
			10	L	0,11
				M	0,72
				H	2,36
		7,5	10	L	0,26
				M	0,62
				H	2,03

Tablo 4'ten çıkarılabilecek önemli sonuçlar şunlardır:

- Planlama ufku uzunluğu arttıkça ikame politikasının sağladığı maliyet tasarrufu azalmaktadır.
- Sabit maliyetler büyüdükçe ikame politikasının sağladığı maliyet tasarrufu artmaktadır. Benzer şekilde, tüm maliyetler büyüdükçe maliyet tasarrufu genellikle artmaktadır.
- Yeniden üretilmiş ürünlere olan talebin artmasının ikame politikasının sağladığı maliyet tasarrufuna ciddi bir etkisi gözlemlenmemiştir.
- Geriye dönen ürün miktarları büyüdükçe ikame politikasının sağladığı maliyet tasarrufu küçülmektedir.
- En büyük maliyet tasarrufu sabit ve diğer maliyetlerin düzeyinin yüksek olduğu, yeniden üretilmiş ürünlere olan talebin ve geriye dönen ürün miktarlarının düşük olduğu durumda elde edilmiştir.

Sonuç

Bu çalışmada, bir üreticinin yeni üretilmiş ürünlerle yeniden üretilmiş ürünler için ayrı taleplerle karşılaştığı, yeni üretim, yeniden üretim, tek yönlü ikame ve bertaraf kararlarını içeren bir kafile büyüklüğü belirleme problemi ele

alınmıştır. Bu problem için yeni bir karışık tamsayı programlama modeli önerilmiş ve literatürde varolan model ile veri setleri üzerinde karşılaştırılmıştır. Sayısal sonuçlar önerilen modelin varolan modelden önemli derecede üstün olduğunu göstermiştir. Tek yönlü ikamenin ikamesiz duruma göre maliyet tasarrufu sağlayabileceği gösterilmiş ve bu maliyet tasarrufunun büyüklüğü ve hangi parametreler tarafından nasıl etkilendiği test problemleri üzerinde belirlenmiştir.

Önerilen model yeni üretim, yeniden üretim, ikame ve bertaraf kararlarını birlikte veren üreticiler için etkili bir karar verme aracı olarak kullanılabilir. İleriki çalışma konusu olarak, varolan çalışma birden fazla ürün tipi ve üretim kapasitesinin olduğu durum için genişletilebilir veya talep ve geri dönen ürün miktarlarındaki belirsizlik probleme dahil edilebilir fakat tüm bu uzantılar problemin çözümünü zorlaştırıp yeni yaklaşımları gerekli kılacaktır.

Kaynakça

- Ahiska, Şebnem S. ve Emre Kurtul (2014), "Modeling and Analysis of a Product Substitution Strategy for a Stochastic Manufacturing/remanufacturing System", *Computers & Industrial Engineering*, 72: 1-11.
- Akçalı, Elif ve Sila Çetinkaya (2011), "Quantitative Models For Inventory and Production Planning In Closed-Loop Supply Chains", *International Journal of Production Research*, 49 (8): 2373-2407.
- Bayındır, Zeynep P., Nesim Erkip ve Refik Güllü (2005), "Assessing the Benefits of Remanufacturing Option under One-Way Substitution", *Journal of the Operational Research Society*, 56 (3): 286-296.
- Bayındır, Zeynep P., Nesim Erkip ve Refik Güllü (2007), "Assessing the Benefits of Remanufacturing Option under One-Way Substitution and Capacity Constraint", *Computers & Operations Research*, 34 (2): 487-514.
- Cunha, Jesus O. ve Rafael A. Melo (2016), "A Computational Comparison of Formulations for the Economic Lot-Sizing with Remanufacturing", *Computers & Industrial Engineering*, 92: 72-81.
- Denizel, Meltem, Mark Ferguson ve Gilvan G.C. Souza (2010), "Multiperiod Remanufacturing Planning with Uncertain Quality of Inputs", *IEEE Transactions on Engineering Management*, 57 (3): 394-404.
- Dobos, Imre ve Knut Richter (2004), "An Extended Production/Recycling Model with Stationary Demand and Return Rates", *International Journal of Production Economics*, 90 (3): 311-323.

- Göçer, Fethullah, Şebnem Ahiska ve Russell E. King (2015), "Analysis of a Downward Substitution Strategy in a Manufacturing/Remanufacturing System", *Operations Research and Enterprise Systems*, 509: 186-198.
- Helmrich, Mathijn J. R., Raf Jans, Wilco van den Heuvel ve Albert P. M. Wagelmans (2014), "Economic Lot-sizing with Remanufacturing: Complexity and Efficient Formulations", *IIE Transactions*, 46 (1): 67-86.
- Inderfurth, Karl (2004), "Optimal Policies in Hybrid Manufacturing/remanufacturing Systems with Product Substitution", *International Journal of Production Economics*, 90 (3): 325-343.
- Kaya, Onur (2010), "Incentive and Production Decisions for Remanufacturing Operations", *European Journal of Operational Research*, 201 (2): 442-453.
- Kiesmüller, Gudrun (2003), "Optimal Control of a One Product Recovery System with Lead Times", *International Journal of Production Economics*, 81/82: 333-340.
- Kleber, Rainer, Stefan Minner ve Gudrun Kiesmüller (2002), "A Continuous Time Inventory Model for a Product Recovery System with Multiple Options", *International Journal of Production Economics*, 79 (2): 121-141.
- Krarup, Jakob ve Ole Bilde (1977), "Plant Location, Set Covering and Economic Lot Size: an $O(mn)$ -algorithm for Structured Problems", *Numerische Methoden bei Optimierungsaufgaben, Band 3: Optimierung bei Graphen-Theoretischen Ganzzahligen Problemen*, 36: 155-180.
- Li, Yongjian, Jian Chen ve Xiaoqiang Cai (2006), "Uncapacitated Production Planning with Multiple Product Types, Returned Product Remanufacturing, and Demand Substitution", *OR Spectrum*, 28 (1): 101-125.
- Li, Yongjian, Jian Chen ve Xiaoqiang Cai (2007), "Heuristic Genetic Algorithm for Capacitated Production Planning Problems with Batch Processing and Remanufacturing", *International Journal of Production Economics*, 105 (2): 301-317.
- Marshall, Sarah E. ve Thomas W. Archibald (2015), "Substitution in a Hybrid Remanufacturing System", *Procedia CIRP*, 26: 583-588.
- Naeem, Mohd A., Dean J. Dias, Rupak Tibrewal, P.C. Chang ve M.K. Tiwari (2013), "Production Planning Optimization for Manufacturing and Remanufacturing System in Stochastic Environment", *Journal of Intelligent Manufacturing*, 24 (4): 717-728.
- Pineyro, Pedro ve Omar Viera (2010), "The Economic Lot Sizing Problem with Remanufacturing and One-Way Substitution", *International Journal of Production Economics*, 124 (2): 482-488.
- Pochet, Yves ve Laurence A. Wolsey (2006), *Production Planning by Mixed Integer Programming* (New York: Springer).
- Shi, Jianmai, Guoqing Zhang ve Jichang Sha (2011), "Optimal Production Planning For a Multi-Product Closed Loop System with Uncertain Demand and Return", *Computers & Operations Research*, 38 (3): 641-650.
- Sifaleras, Angelo, Ioannis Konstantaras ve Nenad Mladenovic (2015), "Variable Neighborhood Search For the Economic Lot Sizing Problem with Product Returns and Recovery", *International Journal of Production Economics* 160: 133-143.
- Solyalı, Oğuz (2014), "Production Planning with Remanufacturing under Uncertain Demand and Returns", *Hacettepe Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi*, 32 (2): 275-296.
- Süral, Haldun, Meltem Denizel ve Luk N.V. Wassenhove (2009), "Lagranean Relaxation Based Heuristics for Lot Sizing with Setup Times", *European Journal of Operations Research*, 194 (1): 51-63.

- Teunter, Ruud H., Zeynep P. Bayindir ve Wilco van den Heuvel (2006), "Dynamic Lot Sizing with Product Returns and Remanufacturing", *International Journal of Production Research*, 44 (20): 4377-4400.
- Teunter, Ruud H., Ou Tang ve Konstantinos Kaparis (2009), "Heuristics for The Economic Lot Scheduling Problem with Returns", *International Journal of Production Economics*, 118 (1): 323-330.
- Van der Laan, Erwin A. ve Ruud H. Teunter (2006), "Simple Heuristics for Push and Pull Remanufacturing Policies", *European Journal of Operational Research* 175 (2): 1084-1102.
- Van Vyve, Mathieu ve Laurence A. Wolsey (2006), "Approximate Extended Formulations", *Mathematical Programming, Series B*, 105 (2-3): 501-522.
- Wei, Cansheng, Yongjian Li ve Xiaoqiang Cai (2011), "Robust Optimal Policies of Production And Inventory with Uncertain Returns and Demand", *International Journal of Production Economics*, 134 (2): 357-367.