Üçüncü Sektör Sosyal Ekonomi Dergisi
Third Sector Social Economic Review
55(2) 2020 893-909
doi: 10.15659/3.sektor-sosyal-ekonomi.20.05.1327

Araştırma Makalesi

Karma Üretim Sistemlerinde Karbon Salınımı Faktörünün Üretim ve Stok Kontrolüne Etkileri

The Effects of Carbon Emission on Production and Inventory Control in Hybrid Production Systems

Sedat BELBAĞ
Dr. Öğr. Üyesi Ankara Hacı Bayram Veli Üniversitesi İ.İ.B.F., İşletme Bölümü
sedat.belbag@hbv.edu.tr
https://orcid.org/0000-0002-4136-2468

Makale Gönderme Tarihi	Revizyon Tarihi	Kabul Tarihi
27.02.2020	23.04.2020	02.05.2020

Öz

Kıt kaynaklar, yoğun rekabet ortamı ve yasal düzenlemeler gerek işletmeler gerekse toplum tarafından sürdürülebilirlik konusuna olan ilgiyi arttırmaktadır. Geri dönüşüm, yeniden kullanım ve yeniden üretim sürdürülebilirliğin üretim sistemlerine katıldığı yöntemlerin başında gelmektedir. Bu çalışma karma üretim sisteminde karbon salınımı faktörünün üretim ve stok kararlarına olan etkisini belirlemeyi amaçlamaktadır. Karma üretim sistemi için iki farklı hazırlık süreci dikkate alınmıştır; normal ve yeniden üretim için ayrı hazırlık süreci veya ortak hazırlık süreci bulunmaktadır. Ele alınan problemin çözümü için karma tam sayılı programlama modeli önerilmiştir. Örnek olay ve duyarlılık analizlerin sonuçlarına göre, karbon salınımı her iki üretim sistemlerinin toplam maliyet performansını dikkate değer oranda etkilemektedir.

***Anahtar Kelimeler**: Karma üretim sistemleri, Yeniden üretim, Karbon salınımı, Hazırlık maliyeti.*

***Jel Kodları:** M11*

Abstract

Scarce resources, highly competitive environment and legal regulations increase the interest in sustainability issue from both companies and public. Recycling, reuse and remanufacturing are leading approaches to incorporate sustainability into production systems. This study aims to determine the effect of carbon emission on production and inventory decisions in hybrid production systems. Two different setup processes are considered for hybrid production system; there are separate setup or joint setup processes for production and remanufacturing. A mixed-integer linear programming has been proposed to solve the considered problem. According to the results of the base case and the sensitivity analysis, carbon emission considerably affects the total costs performance of both production systems.

***Keywords**: Hybrid production systems, Remanufacturing, Carbon emission, Setup costs.*

***Jel Classification:** M11*

1. Giriş

Toplumsal düzeyde sürdürülebilirliğe yönelik artan farkındalık geri dönüşüm faaliyetlerini desteklemektedir. Kıt kaynak, varlık korunumu ve yasal düzenlemeler gibi faktörler işletmeleri tedarik zinciri faaliyetlerini sürdürülebilir hale getirmesine zorlamaktadır. Bu sebeple işletmeler, geri dönüşüm yöntemlerini (örneğin, yeniden kullanım, geri dönüşüm ve yeniden üretim) üretim sistemlerinin içerisine katmaktadır. Artan işletme sayısı ile birlikte birçok sektörde daha fazla kaynağa ihtiyaç duyulması işletmelerin farklı stratejiler geliştirmeye yöneltmektedir. Örneğin

Önerilen Atıf /Suggested Citation
Belbağ, S. 2020. Karma Üretim Sistemlerinde Karbon Salınımı Faktörünün Üretim ve Stok Kontrolüne Etkileri, *Üçüncü Sektör Sosyal Ekonomi Dergisi*, 55(2), 893-909

Xerox firması kaynak korunumu programı dâhilinde geri dönen ürünlerinden elde ettiği parçaları yeniden kullanıma sokmaktadır (Ayres, Ferrer ve Van Leynseele, 1997). Böylece üretim de yeni parça kullanımını azaltarak hem üretim maliyetlerinde hem de atık maliyetlerinde düşüş sağlamaktadır.

Birçok gelişmiş ülkede çevrenin korunumuna yönelik yasalar (Avrupa Birliği Elektrik ve Elektronik Atık Yasası - *Waste Electrical & Electronic Equipment, 2020*) üretici işletmelere herhangi bir sebeple geri dönen veya ekonomik ömrünü tamamlamış ürünleri toplama yükümlülüğü vermektedir. Atıkların gömülmesi ya da yakılması en yaygın atıklardan kurtulma yöntemleridir. Bu yöntemler kısa dönemde atıklardan kurtulmayı sağlasa da, uzun dönemde kirlilik ve sağlık riski oranlarını arttırmaktadır (HPA, 2011). Ayrıca atıkların imha edilmesi gereken alanların sınırlı olması üreticilerin atık imhası için katlanması gereken maliyetleri yükseltmektedir (Kilic, Cebeci ve Ayhan, 2015).

İşletmelerin rakiplerine karşı maliyet ve rekabet avantajı elde etmek için başvurduğu geri dönüşüm yöntemleri içerisinde yer alan yeniden üretim, geri dönen ürünlerin yeni parçalar kullanarak tamir edilmesi ve/veya güncellenmesi yoluyla bu ürünlerin kalitesinin yeni ürün kalitesine yükseltilmesi sürecidir (Thierry, Salomon, Van Nunen ve Van Wassenhove 1995). Yeniden üretim süreci geri dönen ürünlerin toplanması, parçalanması, incelenmesi, test edilmesi, uygun parçaların tespit edilmesi ve yeniden üretilmesi faaliyetlerinden oluşmaktadır (Hatcher, Ijomah ve Windmill 2011). 2019 UK Otomotiv Sürdürülebilirlik Raporu'na (2019 UK Automotive Sustainability Report) göre Birleşik Krallık'taki yeniden üretimin değeri 2.4 milyar sterlinden 5.6 milyar sterline yükselmesi beklenmektedir. Caterpillar 1973'den beri "*Cat Reman*" programı adı altında 7600 farklı ürününü müşterilerinden satıcı firmalar yoluyla toplayıp, bu ürünleri yeniden üretime sokarak ekonomiye geri kazandırmaktadır (CAT Reman, 2020).

Yeniden üretim geri dönen ürünlerin atık halden ekonomik olarak değerli hale getirilmesinde önemli bir rol oynamaktadır. Geleneksel tedarik zinciri faaliyetlerinden farklı olarak ürünlerin çeşitli sebeplerden dolayı geri dönmesinden kaynaklanan tersine akış durumu yeniden üretimin işletmelerde uygulanmasına olanak sağlamaktadır. Diğer yandan, geleneksel üretim faaliyetlerine ek olarak ortaya çıkan geri dönen ürünlerin toplanması, incelenmesi, gerektiğinde tamir edilmesi ve parçaların bir araya getirilmesi faaliyetleri bu tür sistemlerde üretim ve stok kontrolünü daha da zor hale getirmektedir. Geleneksel üretim sisteminde sadece tedarikçilerden elde edilen hammaddeler kullanılarak üretim faaliyeti gerçekleştirilirken, yeniden üretim faaliyetinin yer aldığı üretim sisteminde normal ve yeniden üretim olmak üzere iki farklı üretim faaliyeti gerçekleşmektedir.

Tersine ürün akışları en uygun üretim miktarlarının belirlenmesini zor hale getirmesine rağmen, yeniden üretim varlıkların geri kazanımı ve maliyetlerde tasarruf açısından üreticilere avantaj sağlamaktadır. Yeniden üretim işletmelere sağladığı maliyet avantajının yanında yeni pazarların oluşturulması ve hurda veya atık olarak değerlendirilecek ürünlerin yeniden ekonomiye kazandırılması gibi faydalar sağlamaktadır. Böylece işletmeler rakipleri karşısında önemli bir rekabet avantajı ve çevreye duyarlı müşterilerin yer aldığı pazarlardan pay elde edebilmektedir.

Yeniden üretime sahip üretim sistemlerinin planlama ve kontrol problemi akademik literatürde yaygın olarak çalışılan bir konu olarak yer almaktadır. Bu konuda daha detaylı bilgi için Ilgin ve Gupta (2010), Akçalı ve Cetinkaya (2011), Junior ve Filho (2012) ve Chan, Chung ve Saadat (2017) tarafından yapılan literatür taramalarına bakılabilir. Normal ve yeniden üretimin aynı anda gerçekleştiği karma üretim sistemlerinde temel amaç müşteri taleplerinin hem yeni ürün hem de yenilenmiş ürünlerle zamanında karşılamasını sağlayacak üretim ve stok politikalarını tespit etmektir. Karma üretim sistemlerinde genel varsayımlardan biri geri dönen ürünlerin yeniden üretilmesi ile elde edilen ürünlerin yeni ürünler ile aynı kaliteye sahip olmasıdır (Teunter, 2004). Yeniden üretim yoluyla üretilen ürünlerin yeni ürünler ile aynı kalite düzeyine sahip olmaması durumunda ise, bu ürünler daha düşük fiyatlarda yeni ürünlerin yer almadığı ikincil pazarlarda satılabilmektedir (Bayındır, Erkip ve Güllü 2007).

Literatürde karma üretim sistemlerinde sadece son ürün için stok tutulduğu (örn., Inderfurth 1997; Heisig ve Fleischmann 2001; Karakayali, Akçalı, Çetinkaya ve Üster 2013), geri dönen ürünler

ve son ürünler için ayrı stok tutulduğu durumlar incelenmiştir (örn., Van der Laan ve Salomon 1997; Kiesmüller 2003). Sadece son ürün için tek bir stok noktasının tanımlanması durumunda geri dönen ürünler doğrudan yeniden üretime girmektedir. Geri dönen ürün ve son ürünler için ayrı olarak stok tutulduğunda ise geri dönen ürünler geri dönen ürün stoğunda yer alırken, son ürün stoğunda hem normal üretim ile üretilen ürünler hem de yeniden üretim ile üretilen ürünler yer almaktadır.

Karma üretim sistemlerinde işletmenin üretim faaliyetini gerçekleştirebilmesi için gereken hazırlıklardan kaynaklanan maliyetler literatürde ayrı ayrı ya da ortak olarak tanımlanmaktadır. Üretim ve yeniden üretim için ayrı olarak tanımlanan hazırlık maliyeti varsayımı altındaki karma üretim sistemlerindeki üretim ve stok kontrolü hakkında çok sayıda makaleler yayınlanmıştır (örn., Van der Laan, Salomon ve Dekker 1999; Teunter ve Vlachos 2002; Van der Laan ve Teunter 2006; Ahiska ve King 2010; Karakayali, Akçalı, Çetinkaya ve Üster 2013; García-Alvarado, Paquet ve Chaabane 2015). Bu çalışmalar optimal üretim ve stok kontrolü politikalarının karakterizasyonuna odaklanmakta ve farklı hazırlık maliyetlerinin karma üretim sisteminde üzerindeki etkilerini belirlemeyi amaçlamaktadır. Çalışmalar sonucunda üretim ve yeniden üretim için ayrı olarak tanımlanan hazırlık maliyet varlığının optimal maliyet yapısını doğrudan etkilediğini görülmektedir.

Bazı çalışmalar ayrı olarak tanımlanan hazırlık süreçlerinin yanında her iki üretim süreci için ortak olarak tanımlanan hazırlık süreçlerine de dikkat etmektedir (Teunter, Bayindir ve Den Heuvel 2006; Macedo, Alem, Santos, Junior ve Moreno 2016; Cunha ve Melo 2016). Karma üretim sistemlerinde ortak hazırlık sürecinin tanımlanması ile bir dönem içerisinde aynı hat üzerinde hangi oranlarda normal üretim ve yeniden üretim yapması gerektiğini belirlenmeye çalışılmaktadır. Böylece bir işletme her dönem başı ya da ortasında talebi karşılamak için gereken son ürünün ne kadarını normal üretim ne kadarını yeniden üretimden elde edileceğinin kararını verecek optimal üretim ve stok politikalarını elde edebilmektedir. Ortak hazırlık sürecinin düzgün bir şekilde devam edebilmesi esnek yapıya sahip üretim araçlarını gerektirmektedir.

Yeniden üretim sağladığı maliyet ve rekabet avantajının yanında üretim, dağıtım ve stok yönetimi gibi tedarik zincir faaliyetlerinden kaynaklanan karbon salınım miktarlarında da azalmaya neden olmaktadır. Dikkate değer bir sürdürülebilirlik konusu olarak karbon salınımı yasal düzenleyiciler, işletmeler ve toplumun ilgisini çekmektedir. Çok sayıda ülke karbon salınım miktarlarını sınırlandırabilmek amacıyla yeni kanun, düzenleme ve karbon ticaretine olanak veren mekanizmalar ortaya koymaktadır. Bunların içerisinde karbon salınım vergisi şimdiden birçok ülkede ya uygulanmakta ya da bu verginin uygulamaya koyulması için gereken takvim oluşturulmuştur. Doksanların başından günümüze (örn., Finlandiya 1990, İsveç ve Norveç 1991, Danimarka 1992) karbon vergisi çeşitli endüstri dallarında kömür kullanılmasını azaltan en önemli unsurlardan biri haline gelmiştir (Carbon Tax Center, 2020). Karbon salınımını düzenlemeye yönelik yasalar doğrultusunda işletmelerin ürettikleri her ton karbon salınımı için ödediği vergi toplam maliyetler içerisinde önemli bir paya sahip olmaktadır.

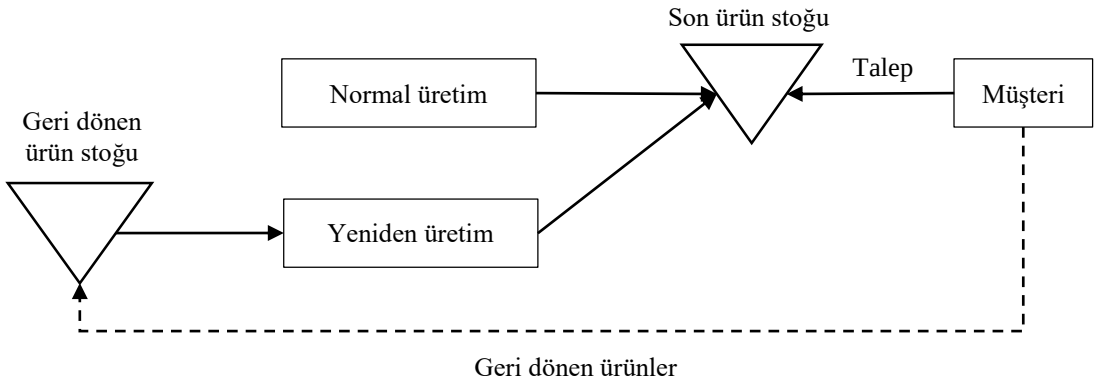
Karma üretim sistemlerinde karbon salınımının üretim ve stok politikalarına etkisi literatürde yeni bir konu olarak görülebilir. Benjaafar, Li, ve Daskin (2013) karbon salınımının operasyonel kararlardaki önemini gerek geleneksel üretim sistemi gerekse karma üretim sistemi açısından incelemektedir. Yenipazarli (2016) tek dönemli bir karma üretim sisteminde karbon vergisinin fiyat ve yeniden üretim stratejileri üzerindeki etkilerini incelemektedir. Miao, Mao, Fu ve Wang (2018) benzer problemi takas ve yeniden üretim stratejileri açısından incelemektedir. Wang, Zhu, Sun ve Jia (2018) karma üretim sisteminin birinci dönemde sadece yeni ürün ürettiği ikinci dönemde ise karma üretim yaptığı bir üretim sisteminde karbon salınımının etkilerini araştırmaktadır. Karbon salınımına yönelik vergi belli bir düzeye kadar işletmelerin karbon salınımı daha yüksek olan normal üretim yerine yeniden üretimi tercih etmesini sağlayabilmektedir. Diğer yandan, karbon vergisinin çok yüksek olması işletmelerin yeniden üretim yapmaktansa ürünlerin tamamen parçalara ayrılarak farklı amaçlar ile kullanılmasına yol açabilmektedir. Bu sebeple, belirlenecek karbon vergisi işletmelerin üretim politikalarına doğrudan etki edebilmektedir.

Bu çalışma, karma üretim sisteminde karbon salınımı faktörünün üretim ve stok kararlarına olan etkisini belirlemeyi amaçlamaktadır. Karma üretim sistemi normal ve yeniden üretim için ayrı hazırlık süreci ve ortak hazırlık sürecine sahip iki farklı durum açısından değerlendirilmektedir. Bu çalışma literatüre; *i)* karma üretim sisteminde karbon salınımı faktörü etkisinin incelenmesi, *ii)* üretim hazırlık sürecinin ayrı veya ortak olduğu varsayımlarda karbon salınımı etkisinin tespiti açısından katkıda bulunacaktır. İkinci bölümde dikkate alınan problemin detaylı tanımı verilmekte ve matematiksel modeller sunulmaktadır. Üçüncü bölümde karbon salınımının üretim ve stok politikaları üzerindeki etkisini ortaya koyan sayısal analizler yapılmaktadır. Son bölümde çalışmaya ait sonuçlar ortaya koyularak ileriki çalışmalar için öneriler sunulmaktadır.

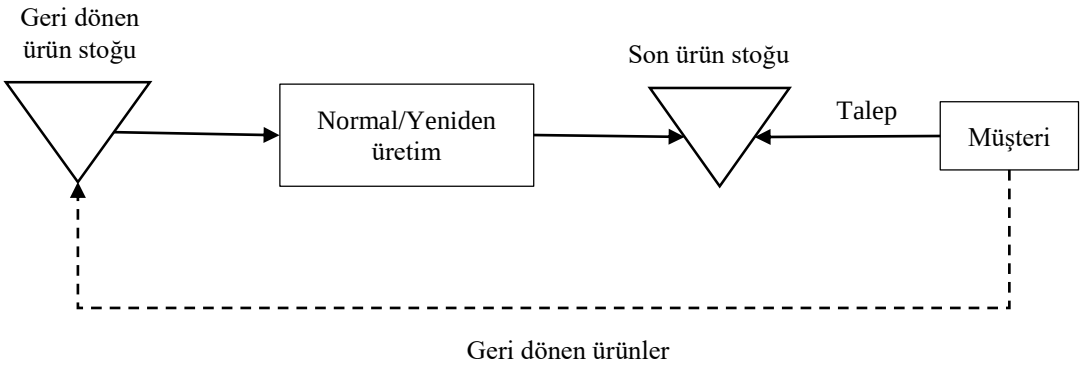
2. Problemin Tanımı

Bu çalışma normal ve yeniden üretim problemini sürdürülebilirlik faktörlerinden biri olan karbon salınımını dikkate alarak, sonlu planlama ufku varsayımı altında her dönem için optimal normal ve yeniden üretim miktarlarını belirlemeyi amaçlamaktadır. Çalışma normal ve yeniden üretim için ayrı hazırlığa sahip üretim modeli (AHSM) ve ortak hazırlığa sahip üretim modeli (OHSM) olmak üzere iki farklı üretim sistemini dikkate almaktadır.

Şekil 1 ve 2 sırasıyla AHSM ve OHSM üretim sistemlerini göstermektedir. Üretim tesisinde her bir dönem normal üretim ve yeniden üretim yoluyla ürün üretilmektedir. Yeniden üretim ile üretilen ürünlerin normal üretim ile üretilen yeni ürün kalitesine sahip olduğu varsayılmıştır. Her dönem ürünlerin belli bir kısmı geri toplanmaktadır. Toplanan ürünler, geri dönen ürün stoğunda depolanmaktadır. Normal üretim ve yeniden üretim yoluyla üretilen ürünler ise son ürün stoğunda yer almaktadır. Son ürüne yönelik talep ve geri dönen ürün miktarı Poisson dağılımına sahiptir. Planlama ufkunun başında, her dönem için gerçekleşecek talep ve geri dönen ürün miktarları önceden bilinmektedir.



Şekil 1. Ayrı hazırlık süreçlerine sahip karma üretim modeli



Şekil 2. Ortak hazırlık süreçlerine sahip karma üretim modeli

Her bir birim ürününün üretilmesi için katlanılması gereken üretim maliyetleri normal ve yeniden üretim için ayrı olarak tanımlanmıştır. Hem son ürün hem de geri dönen ürün stoklarının durumları her dönem başında kontrol edilmektedir. Son ürün stoğunda dönem sonunda elde bulunan ürünler belli bir elde bulundurma maliyetine katlanılarak bir sonraki döneme aktarılmaktadır. Eğer o dönemdeki talebin tamamı karşılanamazsa, ceza maliyetine katlanılmaktadır. Karşılanamayan talepler daha sonraki dönemlere aktarılmamaktadır. Geri dönen ürün stoğunda bulunan geri dönen ürünler, yeniden üretime girmediği takdirde bir sonraki döneme aktarılmaktadır. Son ürün ve geri dönen ürün stokları önceden belli olan kapasite kısıtı altındadır. Eğer belli bir dönemde geri dönen ürün stoğunun kapasitesi üzerinde ürün geri dönerse, kapasiteyi aşan ürün miktarı belli bir atık maliyetine sebep olmaktadır.

AHSM'de normal ve yeniden üretim süreçleri ayrı kapasitelere sahiptir. Bir başka deyişle, normal ve yeniden üretim ayrı üretim hatlarında gerçekleşmektedir. Üretim tesisinde her iki üretim yöntemi için farklı hazırlık süreçlerine ihtiyaç duyduğu için normal ve yeniden üretim süreçleri farklı hazırlık maliyet oluşturmaktadır.

OHSM'de ise, normal ve yeniden üretim süreçleri ortak kapasiteye sahip olup, dönemsel ihtiyaç göz önünde bulundurularak iki yöntem arasında kapasite paylaştırılmaktadır. Her iki üretim süreci aynı üretim hattında gerçekleşebilmektedir. Bu sebeple, her iki üretim süreci için ortak hazırlık maliyeti varsayılmıştır.

Normal üretim, yeniden üretim ve atıkların yok edilmesi karbon salınımına neden olmaktadır. Yasal düzenlemeler toplam karbon salınım miktarlarını sınırlandırmaktadır. Yeniden üretimde var olan kaynaklar (geri dönen ürünler) tekrardan kullanıldığı için normal üretime göre daha az karbon salınımı yaptığı varsayılmıştır. Atık olan ürünler ise her iki üretim yöntemine göre daha fazla karbon salınımına neden olmaktadır (örneğin geri dönen ürünlerin yakılması).

Her iki üretim sistemi için önerilen karma tam sayılı programlama modellerinde kullanılan parametre ve değişkenler Tablo 1'de verilmektedir.

Tablo 1. Matematiksel Modelde Kullanılan Notasyon

Sembol	Açıklama
T	Planlama ufku {1,2, …,$\|T\|$}
D_t	*t* döneminde ürün için oluşan talep miktarı
R_t	*t* döneminde geri dönen ürün miktarı
θ_s	Normal üretim kapasitesi
θ_r	Yeniden üretim kapasitesi
θ_j	Ortak üretim kapasitesi
Φ_s	Son ürün stok kapasitesi
Φ_r	Geri dönen ürün stok kapasitesi
C_{cap}	Maksimum karbon salınımı kapasitesi
u_m	Birim normal üretim maliyeti
u_r	Birim yeniden üretim maliyeti
δ_m	Normal üretim hazırlık maliyeti
δ_r	Yeniden üretim hazırlık maliyeti

δ_j	Ortak üretim hazırlık maliyeti
h_s	Son ürün birim elde bulundurma maliyeti
h_r	Geri dönen ürün birim elde bulundurma maliyeti
s	Birim elde bulundurmama maliyeti
v	Birim atık maliyeti
c	Birim karbon salınım maliyeti
C_m	Normal üretimden kaynaklanan karbon salınım oranı
C_r	Yeniden üretimden kaynaklanan karbon salınım oranı
C_d	Atıklardan kaynaklanan karbon salınım oranı
Q_t^m	*t* döneminde normal üretim miktarı
Q_t^r	*t* döneminde yeniden üretim miktarı
I_t^s	*t* döneminin sonunda elde kalan son ürün miktarı
I_t^r	*t* döneminin sonunda elde kalan geri dönen ürün miktarı
F_t	*t* döneminin sonunda karşılanamayan talep miktarı
G_t	*t* döneminin sonunda atık miktarı
K_t^m	*t* dönemde normal üretim hazırlığı yapılıp yapılmadığı, *0-1* değişkeni
K_t^r	*t* dönemde yeniden üretim hazırlığı yapılıp yapılmadığı, *0-1* değişkeni
K_t^j	*t* dönemde ortak üretim hazırlığı yapılıp yapılmadığı, *0-1* değişkeni

Dikkate alınan karbon salınımı varsayımı altındaki üretim ve stok planlama probleminin çözümünde kullanılacak AHSM için tam sayılı programlama modeli şu şekildedir:

Minimize (en küçükle)

$$Min\ Z = \sum_t (u_m Q_t^m + u_r Q_t^r + \delta_m K_t^m + \delta_r K_t^r + h_s I_t^s + h_r I_t^r + sF_t + \mathrm{v}G_t + c(Q_t^m + Q_t^r)) \quad (1)$$

subject to (kısıt seti altında)

$$I_0^s = 0 \quad (2)$$

$$I_0^r = 0 \quad (3)$$

$$I_t^s = I_{t-1}^s + Q_t^m + Q_t^r + F_t - D_t \quad \forall\ t \in T, \quad (4)$$

$$I_t^r = I_{t-1}^r + R_t - Q_t^r - G_t \qquad \forall\ t \in T, \tag{5}$$

$$Q_t^m \leq \theta_s K_t^m \qquad \forall\ t \in T, \tag{6}$$

$$Q_t^r \leq \theta_r K_t^r \qquad \forall\ t \in T, \tag{7}$$

$$I_t^s \leq \Phi_s \qquad \forall\ t \in T, \tag{8}$$

$$I_t^r \leq \Phi_r \qquad \forall\ t \in T, \tag{9}$$

$$C_m Q_t^m + C_r Q_t^r + C_d G_t \leq C_{cap} \qquad \forall\ t \in T, \tag{10}$$

$$Q_t^m \geq 0 \qquad \forall\ t \in T, \tag{11}$$

$$Q_t^r \geq 0 \qquad \forall\ t \in T, \tag{12}$$

$$I_t^s \geq 0 \qquad \forall\ t \in T, \tag{13}$$

$$I_t^r \geq 0 \qquad \forall\ t \in T, \tag{14}$$

$$F_t \geq 0 \qquad \forall\ t \in T, \tag{15}$$

$$G_t \geq 0 \qquad \forall\ t \in T, \tag{16}$$

$$K_t^m \in \{0,1\} \qquad \forall\ t \in T, \tag{17}$$

$$K_t^r \in \{0,1\} \qquad \forall\ t \in T, \tag{18}$$

Amaç fonksiyonu (1) sırasıyla normal üretim, yeniden üretim, normal ve yeniden üretim hazırlık, son ürün ve geri dönen ürün elde bulundurma, elde bulundurmama, atık ve karbon salınım maliyetlerinin toplamını minimize etmeyi amaçlamaktadır. (2)-(5) numaralı kısıtlar stok kararları ile ilişkilidir. (2) numaralı kısıt planlama ufkunun başında son ürün stoğunun stoksuz başlamasını sağlamaktadır. (3) numaralı kısıt planlama ufkunun başında geri dönen ürün stoğunun stoksuz başlamasını garanti etmektedir. (4) numaralı kısıt dönem sonunda bir sonraki döneme aktarılan son ürün miktarını belirlemektedir. (5) numaralı kısıt dönem sonunda bir sonraki döneme aktarılan geri dönen ürün miktarını belirlemektedir.

(6)-(10) numaralı kısıtlar kapasite ile ilişkilidir. (6) numaralı kısıt her dönem için tesiste üretilen toplam normal üretim miktarının kapasiteyi aşmasını engellemektedir. (7) numaralı kısıt her dönem için tesiste üretilen toplam yeniden üretim miktarının kapasiteyi aşmasını engellemektedir. (8) numaralı kısıt son ürün stoğunun çıkabileceği maksimum kapasite miktarını göstermektedir.

(9) numaralı kısıt geri dönen ürün stoğunun çıkabileceği maksimum kapasite miktarını göstermektedir. (10) numaralı kısıt ise, karbon salınımının belli bir miktarın üzerine çıkmamasını garanti etmektedir. (11)-(18) numaralı kısıt seti ise, karar değişkenlerinin üzerindeki değersel kısıtlardır.

OHSM'de daha öncede bahsedildiği üzere ortak üretim hattında normal üretim ve yeniden üretim gerçekleşebilmektedir. Bu sebeple bir önceki modelin amaç fonksiyonu ve kısıtlarında şu değişiklikler yapılmalıdır.

$$Min\ Z = \sum_t \left(u_m Q_t^m + u_r Q_t^r + \delta_j K_t^j + h_s I_t^s + h_r I_t^r + sF_t + \mathrm{v}G_t + c(Q_t^m + Q_t^r)\right) \quad (19)$$

AHSM normal ve yeniden üretim için hazırlık maliyetleri farklı tanımlandığı halde OHSM için tek bir hazırlık maliyeti varsayılmıştır. Yeni amaç fonksiyonu (19) üretim, ortak hazırlık, elde bulundurma, ceza ve fazla mesai üretim maliyetlerinin toplamını minimize etmektedir.

$$Q_t^m + Q_t^r \leq \theta_j K_t^j \qquad \forall\ t \in T, \quad (20)$$

(20) numaralı kısıt ise bir dönem içerisinde gerçekleştirilen normal ve yeniden üretim yoluyla üretilen ürün miktarının ortak üretim kapasitesinin üzerine çıkmamasını sağlamaktadır.

3. Sayısal Analizler

Bu bölümde karbon salınımı faktörünün AHSM ve OHSM üretim sistemlerinin performansı üzerindeki etkisi toplam maliyetler açısından karşılaştırılacaktır. İlk olarak, temel bir örnek olay içerisinde bahsedilen her iki üretim yöntemi karbon salınımı faktörünün dikkate alındığı ve alınmadığı durumlar açısından değerlendirilmiştir. Daha sonra duyarlılık analizinde, örnek olayda yer alan geri dönen ürün miktarı ve karbon salınımı kapasitesi parametreleri farklılaştırılarak her iki üretim sisteminin toplam maliyet performansındaki değişim incelenmiştir.

Örnek olay ve duyarlılık analizinde yer alan her bir durum simülasyon yapılarak analiz edilmiştir. Her bir durum için gerçekleştirilen simülasyon sayısı 1000 olarak belirlenmiştir. AHSM ve OHSM üretim sistemlerinin karşılaştırıldığı her bir örnek olaydaki optimal politika ve maliyetler, C++ diliyle kodlanmış bir algoritma ve IBM ILOG CPLEX 12.6 yazılımının doğrusal programlama kütüphaneleri kullanılarak bulunmuştur. Gerek örnek olayda gerekse sayısal analizde kullanılan parametrelerin değerleri ilgili bölümde belirtilmiştir.

3.1. Örnek olay

Bu bölümde AHSM ve OHSM üretim sistemlerinin karbon salınımı dikkate alındığı ve alınmadığı durumlarda karar değişkenleri arasındaki ilişki ve maliyetler açısından karşılaştırılması amaçlanmaktadır. Her iki üretim sisteminde tek bir ürün üretilmektedir. Planlama ufku 12 dönemden oluşmaktadır. Her dönem başında son ürün ve geri dönen ürünler Poisson dağılımına sahiptir ve ortalamaları sırasıyla 100 ve 40 birimdir.

Her dönem üretim tesislerinde yaşanabilecek çeşitli durumlardan (aksaklık vb.) dolayı üretim ve stok kapasiteleri dönemden döneme değişebilmektedir. AHSM'de normal ve yeniden üretim kapasiteleri U[80,100] ve U[40, 50] değerleri aralığında tekdüze (uniform) dağılıma sahip olduğu varsayılmıştır. OHSM'e ise normal ve yeniden üretim için ortak kapasite U[100, 120] değerleri arasında tekdüze dağılıma sahiptir. Son ürün stok kapasitesi U[60, 80] birim, geri dönen ürün stok kapasitesi ise U[50, 60] birim olarak belirlenmiştir.

Her iki üretim sisteminde normal ve yeniden üretim birim maliyetleri sırasıyla 4 ve 2 olarak belirlenmiştir. AHSM'de normal ve yeniden üretim için katlanılan hazırlık maliyetleri 100 ve 50'dir. OHSM'de ise ortak hazırlık maliyeti 100'dür. Son ürün stoğunda bir sonraki döneme aktarılan ürünün oluşturduğu elde bulundurma maliyeti 2 iken, geri dönen ürün stoğundaki ürünün elde bulundurma maliyeti 1'dir. Bir dönem sonunda talebin karşılanamaması sonucu oluşan ceza maliyeti 20, geri dönen ürün stoğuna giremeyen ürünlerin bertaraf edilmesi neticesinde katlanılan atık maliyeti ise 10'dur. Son olarak normal ve yeniden üretim yoluyla

üretilen ürünler yüzünden ortaya çıkan karbon salınımı için ödenen karbon salınımı maliyeti ise 1 olarak belirlenmiştir.

Geri dönen ürünler sayesinde varlıkların değerlendirilmesi yeni ürün için gereken enerji miktardan daha az bir enerji ile bu ürünlerin üretilmesine olanak sağlamaktadır. Bu sebeple, normal üretim neticesinde yeniden üretime göre daha fazla karbon salınımı gerçekleşmektedir. Örnek olayda basitlik açısından normal üretim sonucunda ortaya çıkan karbon salınımı miktarı 2 iken, yeniden üretimde 1 olarak belirlenmiştir. Atıkların imhası yüksek karbon salınımına neden olduğu için (örneğin atıkların yakılması), atık imhasından ortaya çıkan karbon salınım miktarı 8 olarak belirlenmiştir.

Tablo 2, AHSM ve OHSM üretim sistemlerinin karbon salınımı dikkate alındığı ve alınmadığı durumlarda ilgili maliyetlerdeki değişimi göstermektedir. Sonuçlara göre karbon salınımdan kaynaklanan maliyetler toplam maliyetlerin AHSM üretim sisteminde yaklaşık %17'sini, OHSM üretim sisteminde ise yaklaşık %20'sini oluşturmaktadır. Bir başka deyişle, karbon salınımı yüzünden katlanılması gereken maliyet dikkate alınmazsa, toplam maliyetlerin beşte birini oluşturan bir maliyet kalemi göz ardı edilmektedir. Karbon salınım maliyetlerinin dikkate alınması diğer maliyetlerin toplam maliyetlerdeki oranlarını etkilemektedir. Özellikle karbon salınımının sınırlandırıldığı üretim sektörlerinde (ağır sanayi gibi) bu tür maliyetlerin dikkate alınmaması işletmelerin uzun dönemli kararlarını doğrudan etkileyebilme ihtimali yüksektir.

Tablo 2: AHSM ve OHSM üretim sistemlerinin karbon salınımı dikkate alındığı ve alınmadığı durumlarda ilgili maliyetlerdeki değişim

	AHSM				OHSM			
Maliyetler	K.Y.	Etki oranı (%)	K.V.	Etki oranı (%)	K.Y.	Etki oranı (%)	K.V.	Etki oranı (%)
N.Ü.	2650,98	51,04	2642,85	41,68	2634,29	59,61	2628,91	47,48
Y.Ü.	875,76	16,86	875,21	13,80	880,25	19,92	879,87	15,89
N.Ü.H.	1045,40	20,13	1096,00	17,28	-	-	-	-
Y.Ü.H.	548,85	10,57	548,40	8,65	-	-	-	-
O.H.	-		-		825,00	18,67	825,00	14,90
S.Ü.S	43,60	0,84	18,64	0,29	38,96	0,88	36,18	0,65
G.Ü.S.	27,35	0,53	30,44	0,48	0,00	0,00	8,28	0,15
Atık.	0,08	0,00	0,16	0,002	0,00	0,00	0,00	0,00
Ceza	1,88	0,04	30,80	0,49	40,38	0,91	61,20	1,11
K.S.	-	-	1098,32	17,32	-	-	1097,16	19,82
Toplam	5193,89	100,00	6340,82	100,00	4418,89	100,00	5536,60	100,00

N.Ü.: Normal üretim maliyeti, Y.Ü.: Yeniden üretim maliyeti, N.Ü.H.: Normal üretim hazırlık maliyeti, Y.Ü.H.: Yeniden üretim hazırlık maliyeti, O.H.: Ortak hazırlık maliyeti, S.Ü.S.: Son ürün stok maliyeti, G.Ü.S.: Geri dönen ürün stok maliyeti, K.S.: Karbon salınımı maliyeti

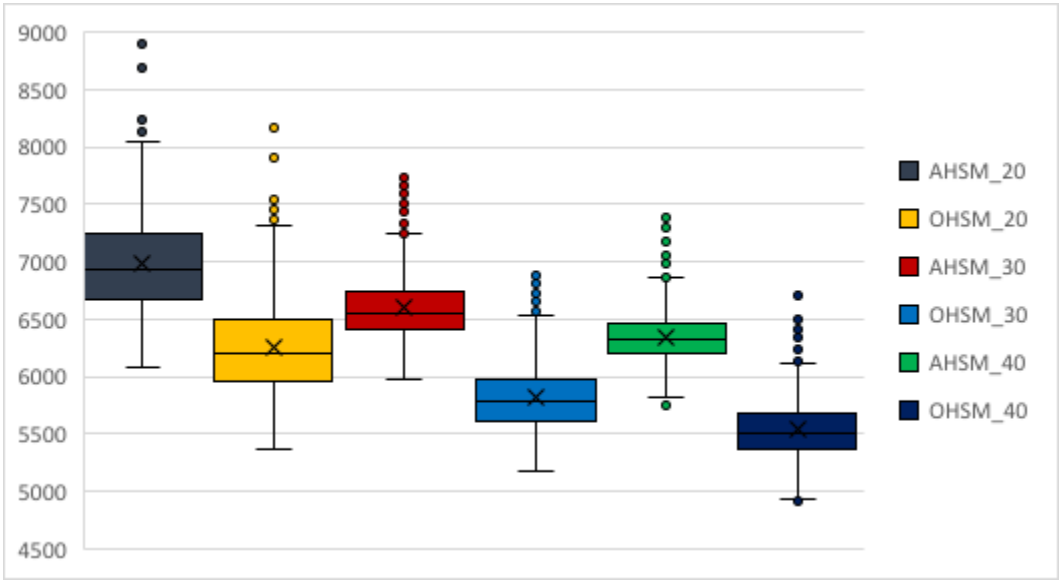
K.Y.: Karbon salınımının dikkate alınmadığı durum, K.V.: Karbon salınımının dikkate alındığı durum

Diğer yandan, her iki üretim sisteminin gerek son ürün gerekse geri dönen ürün açısından stok maliyetleri oldukça düşüktür. Bunun altındaki neden ise, normal üretim ve yeniden üretim kapasitelerinin dönemsel talepleri karşılayabilmesi ve sonraki dönemlere stok aktarma ile maliyet avantajı sağlayamamasıdır. Beklendiği üzere, atık ve ceza maliyetleri yine kapasite değerlerinin yeterli olmasından dolayı geri dönen ürünlerin atık olması veya yetersiz üretim durumlarından kaçınıldığı için oldukça düşüktür.

3.2. Duyarlılık Analizi

Duyarlılık analizinde, örnek olaydaki geri dönen ürün ortalaması ve karbon salınım kapasitesi parametrelerinde gerçekleşen değişimlerin her iki üretim sisteminin (AHSM ve OHSM) toplam maliyet performanslarını ne yönde etkilediği tespit edilmeye çalışılmıştır. Geri dönen ürün

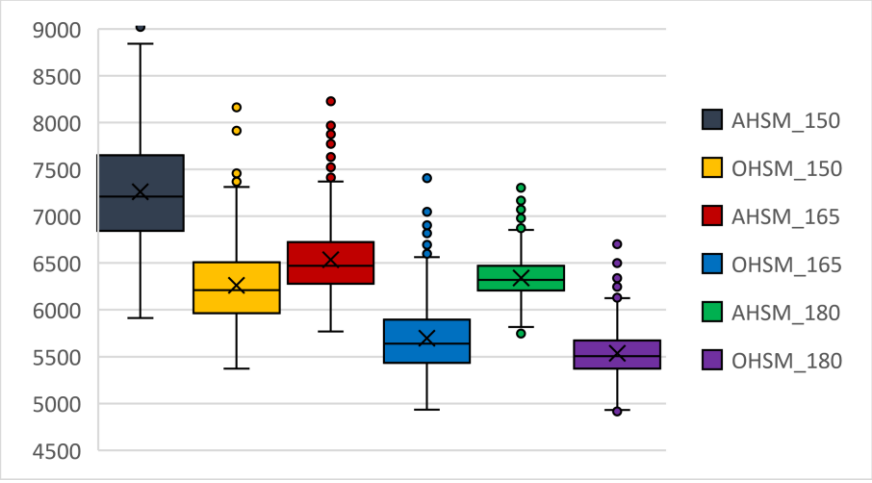
ortalamalarının 20, 30 ve 40 birim, karbon salınım kapasitelerinin 150, 165 ve 200 birim olduğu durumlar incelenmiştir.



Şekil 3. AHSM ve OHSM üretim sistemlerinin geri dönen ürün ortalamalarının 20, 30 ve 40 birim olduğu durumlar için toplam maliyetler açısından karşılaştırılması.

Şekil 3'te AHSM ve OHSM üretim sistemleri geri dönen ürün ortalamalarının 20, 30 ve 40 birim olduğu durumlar için karşılaştırılmaktadır. Sonuçlar her iki üretim sisteminde de geri dönen ürün ortalaması düştükçe toplam maliyetlerde yeniden üretimden sağlanan maliyet avantajındaki düşmeden kaynaklanan artışları göstermektedir. Geri dönen ürün miktarındaki düşüş sebebiyle her iki üretim sisteminde de normal üretim miktarı arttırılarak talepler karşılanmaktadır.

Bunun yanında, dönemsel olarak değişen normal ve yeniden üretim kapasitelerindeki değişimle birlikte AHSM üretim sisteminde geri dönen ürün ortalaması 40 birim iken taleplerin karşılanamama oranı yaklaşık olarak yüzde 1,5, 30 birim olduğu durumda yüzde 5, 20 birim olduğu durumda ise yüzde 20'lere kadar çıkabilmektedir. OHSM üretim sisteminde ise taleplerin karşılanamama oranı yaklaşık olarak sırasıyla geri dönen ürün ortalaması 40 birim iken yüzde 3, 30 birim iken yüzde 6 ve son olarak 20 birim iken yüzde 20'dir. Bu sonuçlar geri dönen ürün miktarındaki değişimin her iki üretim sisteminin talepleri karşılayabilme kabiliyetini doğrudan ve etkin bir şekilde etkilediğini göstermektedir. Geri dönen ürünlerin yeniden üretilmesi sayesinde işletme, daha düşük maliyet ile üretim yapmasının yanında talepleri zamanında karşılayabilmektedir.



Şekil 4. AHSM ve OHSM üretim sistemlerinin karbon salınım kapasitesinin 150, 165 ve 180 birim olduğu durumlar için toplam maliyetler açısından karşılaştırılması.

Şekil 4'te AHSM ve OHSM üretim sistemleri karbon salınım kapasitesinin 150, 165 ve 180 birim olduğu durumlar için karşılaştırılmaktadır. Sonuçlar her iki üretim sisteminde de karbon salınım kapasitesinde yaşanabilecek düşüşlerin toplam maliyetlerde ciddi oranlarda artışlara sebep olduğunu göstermektedir. Düşen karbon salınım kapasitesi üretim miktarlarını olumsuz etkilemektedir. Her ne kadar işletme daha düşük karbon salınımına sahip olan yeniden üretim faaliyetini öncelikli olarak tercih edecekse de, geri dönen ürün miktarının sınırlı olması işletmeyi talepleri karşılayabilmek daha fazla normal üretim yapmaya yönlendirecektir. Normal üretimin kullanılması hem maliyetleri hem de karbon salınım miktarını arttıracaktır. Karbon salınım kapasitesinin oldukça düştüğü (150 birim olduğu durum) durumlarda ise karbon salınım kapasitesi yüzünden daha fazla normal üretim yapılamadığı için talepler zamanında karşılanamayacak ve işletme yüksek ceza maliyetlerine katlanmak zorunda kalmaktadır.

Bu sonuçlar karbon salınımını azaltmaya yönelik yasal düzenlemelerin işletmelerin üretim kararlarını ve toplam maliyetlerini doğrudan etkileyebileceğini göstermektedir. İşletmelerin üretim süreçlerini ve kullandığı teknolojileri daha az karbon salınımı yapacak şekilde düzenlemesi kısa vadede maliyetli bir karar olarak gözükse de, uzun vadede toplam maliyetlerde yüksek ceza maliyetlerinde sağlanacak azalma yoluyla avantaj elde edebilmesini sağlamaktadır.

4. Sonuç

Bu çalışma karma üretim sistemlerinde karbon salınımının üretim ve stok politikaları üzerindeki etkisini incelemektedir. Problemin çözümü için önerilen karma tam sayılı programlama modeli kullanılarak karbon salınımının olduğu ve olmadığı durumlarda ayrı ya da ortak hazırlık süreçlerine sahip karma üretim sistemleri toplam maliyetlerdeki değişim açısından karşılaştırılmıştır.

Ayrı hazırlık sürecine sahip ve ortak hazırlık sürecine sahip karma üretim sistemlerinin toplam maliyet performanslarını incelemek amacıyla örnek olay ve duyarlılık analizi için çeşitli senaryolar oluşturulmuştur. Örnek olaydan elde edilen sonuçlara göre, karbon salınımdan kaynaklanan maliyetler toplam maliyetlerin AHSM üretim sisteminde yaklaşık %17, OHSM üretim sisteminde ise yaklaşık %20'sini oluşturmaktadır. Bu durum karbon salınımından kaynaklanan maliyetlerin toplam maliyetlerin içerisinde çok önemli bir paya sahip olduğu göstermektedir. Karbon salınımını düşürmeye yönelik yasaların etkilediği ağır sanayi gibi sektörlerde yer alan işletmeler karbon salınımından kaynaklanan maliyetleri dikkate almak durumundadır.

Duyarlılık analizinde ise, geri dönen ürün ortalaması ve karbon salınım kapasitesi parametrelerinde yaşanan değişimlerin her iki üretim sisteminin (AHSM ve OHSM) toplam maliyet performanslarını açısından karşılaştırılmıştır. Geri dönen ürün ortalamasının giderek düştüğü durumda her iki üretim sisteminde de toplam maliyetlerde yeniden üretimden sağlanan maliyet avantajının azalmasından kaynaklanan artışlar gözlemlenmiştir. Ayrıca geri dönen ürün miktarında yaşanan düşüş taleplerin %20'ye varan oranlarda karşılanamamasına neden olabilmektedir.

Sonuçlar karbon salınım kapasitesinin azaldığı durumların her iki üretim sisteminde de toplam maliyetlerde ciddi oranlarda artışlara sebep olduğunu göstermektedir. İşletme düşük karbon salınımına sahip yeniden üretime öncelik verse de, geri dönen ürün miktarının sınırlı olması daha fazla normal üretim yapılmasına neden olmaktadır. Böylece normal üretimin kullanılması hem maliyetleri hem de karbon salınım miktarını arttırmaktadır. Karbon salınım kapasitesinin çok düşmesi ise normal ve yeniden üretim miktarlarını azaltacağı için taleplerin zamanında karşılanamayarak yüksek ceza maliyetlerine neden olmaktadır.

İleriki çalışmalarda taleplerin ve geri dönen ürünlerin miktarlarındaki belirsizlik faktörü dikkate alınabilir. Bu çalışmada yalnızca üretim faaliyetlerinden ortaya çıkan karbon salınım miktar başına ödediği maliyetler dikkate alınmıştır. Bunun yanında işletmelerin karbon salınım kapasite

ve miktarlarına göre karbon ticareti yapabildiği mekanizmalarda göz önünde bulundurularak mevcut problem incelenebilir.

Kaynakça

2019 UK Automotive Sustainability Report, Technical report. https://www.smmt.co.uk/reports/sustainability/, online accessed: 25.02.2020.

Ahiska, S. S., & King, R. E. (2010). Life cycle inventory policy characterizations for a single-product recoverable system. International Journal of Production Economics, 124(1), 51-61.

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.

Ayres, R., Ferrer, G., & Van Leynseele, T. (1997). Eco-efficiency, asset recovery and remanufacturing. European Management Journal, 15(5), 557-574.

Bayındır, Z. P., Erkip, N., & Güllü, R. (2007). Assessing the benefits of remanufacturing option under one-way substitution and capacity constraint. Computers & Operations Research, 34(2), 487-514.

Carbon Tax Center (2020). Where Carbon Is Taxed, https://www.carbontax.org/where-carbon-is-taxed, online accessed: 25.02.2020.

CAT REMAN (2020), https://www.caterpillar.com/en/brands/cat-reman.html, online accessed: 25.02.2020.

Chan, F. T., Li, N., Chung, S. H., & Saadat, M. (2017). Management of sustainable manufacturing systems-a review on mathematical problems. International Journal of Production Research, 55(4), 1210-1225.

Cunha, J. O., & Melo, R. A. (2016). A computational comparison of formulations for the economic lot-sizing with remanufacturing. Computers & Industrial Engineering, 92, 72-81.

García-Alvarado, M. S., Paquet, M., & Chaabane, A. (2015). On inventory control of product recovery systems subject to environmental mechanisms. International Journal of Production Economics, 165, 132-144.

Hatcher, G. D., Ijomah, W. L., & Windmill, J. F. C. (2011). Design for remanufacture: A literature review and future research needs. Journal of Cleaner Production, 19(17-18), 2004-2014.

Heisig, G., & Fleischmann, M. (2001). Planning stability in a product recovery system. OR-Spektrum, 23(1), 25-50.

HPA (2011). Impact on health of emissions from landfill sites. Technical Report, Health Protection Agency.

Ilgin, M. A., & Gupta, S. M. (2010). Environmentally conscious manufacturing and product recovery (ECMPRO): A review of the state of the art. Journal of Environmental Management, 91(3), 563-591.

Inderfurth, K. (1997). Simple optimal replenishment and disposal policies for a product recovery system with leadtimes. Operations-Research-Spektrum, 19(2), 111-122.

Junior, M. L., & Filho, M. G. (2012). Production planning and control for remanufacturing: literature review and analysis. Production Planning & Control, 23(6), 419-435.

Karakayali, I., Akçalı, E., Çetinkaya, S., & Üster, H. (2013). Capacitated replenishment and disposal planning for multiple products with resalable returns. Annals of Operations Research, 203(1), 325-350.

Kiesmüller, G. P. (2003). A new approach for controlling a hybrid stochastic manufacturing/remanufacturing system with inventories and different leadtimes. European Journal of Operational Research, 147(1), 62-71.

Kilic, H. S., Cebeci, U., Ayhan, M. B., 2015. Reverse logistics system design for the waste of electrical and electronic equipment (WEEE) in Turkey. Resources, Conservation and Recycling 95, 120-132.

Macedo, P. B., Alem, D., Santos, M., Junior, M. L., & Moreno, A. (2016). Hybrid manufacturing and remanufacturing lot-sizing problem with stochastic demand, return, and setup costs. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 82(5-8), 1241-1257.

Miao, Z., Mao, H., Fu, K., & Wang, Y. (2018). Remanufacturing with trade-ins under carbon regulations. Computers & Operations Research, 89, 253-268.

Teunter, R. H., & Vlachos, D. (2002). On the necessity of a disposal option for returned items that can be remanufactured. International Journal of Production Economics, 75(3), 257-266.

Teunter, R. (2004). Lot-sizing for inventory systems with product recovery. Computers & Industrial Engineering, 46(3), 431-441.

Teunter, R. H., Bayindir, Z. P., & Den Heuvel, W. V. (2006). Dynamic lot sizing with product returns and remanufacturing. International Journal of Production Research, 44(20), 4377-4400.

Thierry, M., Salomon, M., Van Nunen, J., & Van Wassenhove, L. (1995). Strategic issues in product recovery management. California Management Review, 37(2), 114-136.

Van der Laan, E., & Salomon, M. (1997). Production planning and inventory control with remanufacturing and disposal. European Journal of Operational Research, 264-278.

Van der Laan, E., Salomon, M., & Dekker, R. (1999). An investigation of lead-time effects in manufacturing/remanufacturing systems under simple PUSH and PULL control strategies. European Journal of Operational Research, 115(1), 195-214.

Van der Laan, E. A., & Teunter, R. H. (2006). Simple heuristics for push and pull remanufacturing policies. European Journal of Operational Research, 175(2), 1084-1102.

Wang, X., Zhu, Y., Sun, H., & Jia, F. (2018). Production decisions of new and remanufactured products: Implications for low carbon emission economy. Journal of Cleaner Production, 171, 1225-1243.

Waste Electrical & Electronic Equipment (WEEE), (2020). https://ec.europa.eu/environment/waste/weee/, online accessed: 25.02.2020.

Yenipazarli, A. (2016). Managing new and remanufactured products to mitigate environmental damage under emissions regulation. European Journal of Operational Research, 249(1), 117-130.

Research Article

Karma Üretim Sistemlerinde Karbon Salınımı Faktörünün Üretim ve Stok Kontrolüne Etkileri

The Effects of Carbon Emission on Production and Inventory Control in Hybrid Production Systems

Sedat BELBAĞ
Dr. Öğr. Üyesi Ankara Hacı Bayram Veli Üniversitesi İ.İ.B.F., İşletme Bölümü
sedat.belbag@hbv.edu.tr
https://orcid.org/0000-0002-4136-2468

Extensive Summary

Introduction

Scarce resources, highly competitive environment and legal regulations increase the interest in sustainability issues from both companies and public. Recycling, reuse and remanufacturing are the leading approaches to incorporate sustainability into production systems. Remanufacturing is the process of repairing and/or updating the returned products with new components to bring returned products up the quality standards of new product level (Thierry, Salomon, Van Nunen & Van Wassenhove 1995). Remanufacturing includes collecting, disassembly, investigation, testing, and reassembly operations (Hatcher, Ijomah, & Windmill, 2011). According to 2019 UK Automobile Sustainability Report, the value of remanufacturing has been expected to rise from 2.4 billion pounds to 5.6 billion pounds in the following years. Caterpillar implements the "*Cat Reman"* in which the returned products are collected from customers by dealers and remanufactured more than 7600 types of Cat Reman products since 1973.

Although remanufacturing provides cost and competitive advantages, it also helps to decrease carbon emission amounts related to supply chain operations such as production, distribution and inventory. As an important sustainability factor, there is an increasing interest in carbon emission from legislators, companies and consumers. Many countries implement new regulations and carbon trade mechanisms (e.g., cap-and-trade) to limit carbon emission amounts. In literature, numerous studies investigate the potential effects of carbon emission on hybrid production systems (Benjaafar, Li, & Daskin 2013; Yenipazarli 2016; Miao, Mao, Fu & Wang 2018; Zhu, Sun & Jia 2018). These studies aim to determine how optimal manufacturing, remanufacturing and pricing decisions change with the implementation of carbon emission related mechanisms.

Based on our brief review on the topic, this study adds to the literature by *i)* investigating the effect of carbon emission on hybrid manufacturing system, *ii)* comparing two different manufacturing systems with separate and joint setup in consideration of carbon emission.

Problem Description

This study aims to determine optimal production and remanufacturing amounts in each period under finite planning assumption in consideration of carbon emission. There are two different production systems with separate and joint setups. In each period, demand is satisfied by producing new products or by remanufacturing returned products. Remanufactured products are assumed to be have the same quality as new products. A portion of products have been collected in each period. Returned products are stored in the returns inventory. The serviceable inventory is replenished by both production and remanufacturing process. Both the demand and the amount of returned products are considered to be deterministic and follow Poisson distribution.

Different costs are assumed for both production and remanufacturing in the production process of new products. The serviceable and recoverable inventory are reviewed in the beginning of each period. Each product in serviceable inventory is transferred to the next period and incurs holding cost at the end of each period. Any unsatisfied demand incurs a penalty cost and is permanently lost. If the returned products are not remanufactured in a period, these products are transferred to the next period. There are capacity restrictions on both serviceable and recoverable inventories. If the amount of returned products excess remanufacturing capacity, these products are considered as waste and incur a disposal cost. We assume two different production systems where setups are assumed separately or jointly. Production and remanufacturing have different capacity restrictions and incurs separate setup costs in the first production system. On the other hand, production and remanufacturing have joint capacity restrictions and incurs joint setup cost in the second production system.

Production, remanufacturing and disposal operations produces carbon emission. Legal regulations restrict total amount of carbon emission. Due to the recovery of assets, remanufacturing produces less carbon emission than production. Disposal produce the highest amount of carbon emission with regard to both production and remanufacturing.

Numerical Analysis

This section aims to demonstrate the applicability of the proposed model and the solution approach for the defined production and inventory problem. First, two aforementioned production systems have been evaluated in with and without carbon emission assumption in the base case. Next, sensitivity analysis evaluates the change in the total cost performance of these production systems with regard to the amount of return products and carbon emission capacity considered in the base case.

Each scenario has been analyzed by simulation in the base case and sensitivity analysis. The simulation number is set to 1000 for each scenario. The optimal policies and costs of two production systems has been determined in each scenario by an algorithm implemented in Visual Studio C++ programming and IBM ILOG CPLEX 12.6 optimization software package programming libraries.

Table 1. The results of production systems with and without considering carbon emission.

	AHSM				OHSM			
Costs	N.C.	Ratio (%)	C.C.	Ratio (%)	N.C.	Ratio (%)	C.C.	Ratio (%)
P.	2650,98	51,04	2642,85	41,68	2634,29	59,61	2628,91	47,48
R.	875,76	16,86	875,21	13,80	880,25	19,92	879,87	15,89
P.S.	1045,40	20,13	1096,00	17,28	-	-	-	-
R.S.	548,85	10,57	548,40	8,65	-	-	-	-
J.S.	-		-		825,00	18,67	825,00	14,90
S.H.	43,60	0,84	18,64	0,29	38,96	0,88	36,18	0,65
R.H..	27,35	0,53	30,44	0,48	0,00	0,00	8,28	0,15
D.	0,08	0,00	0,16	0,002	0,00	0,00	0,00	0,00
Pen.	1,88	0,04	30,80	0,49	40,38	0,91	61,20	1,11
C.	-	-	1098,32	17,32	-	-	1097,16	19,82
Toplam	5193,89	100,00	6340,82	100,00	4418,89	100,00	5536,60	100,00

P: Production cost, R: Remanufacturing cost, P.S.: Production setup cost, R.S.: Remanufacturing setup cost

J.S.: Joint setup cost, S.H.: Servicable holding cost, R.H.: Recoverable holding cost, D.: Carbon emission cost

N.C.: Carbon emission is not considered, C.C.: Carbon emission is considered

Table 1 presents the results related to two production systems with separate and joint setup assumptions. The ratio of carbon emission cost is approximately 17% for the production system with separate setup assumption, 20% for the production system with joint setup assumption. In other words, carbon emission costs comprise nearly one fifth of the total costs in both production systems with separate and joint costs. Considering carbon emission costs also affects the percentage of other costs in the total costs, directly. Especially, in several sectors affected by strict carbon emission regulations (e.g., heavy industries), carbon emission related costs have a great potential to influence the strategic decisions of the company.

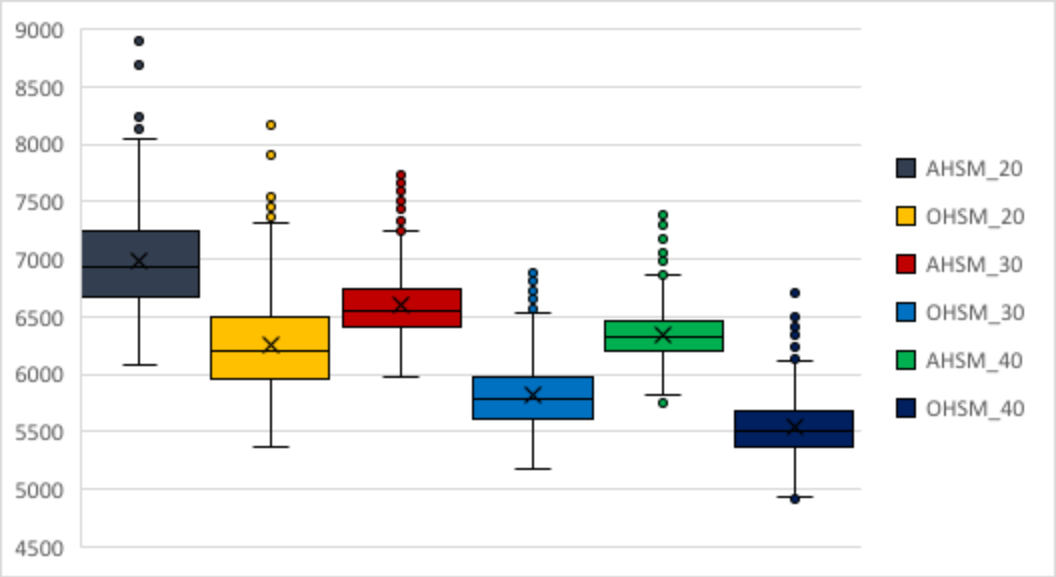


Figure 1. The results of production system with separate and joint setup assumptions when the average amount of return products is equal to 20, 30 and 40.

Figure 1 presents the results of production system with separate and joint setup assumptions when the average amount of return products is equal to 20, 30 and 40, respectively. A decrease in the amount of return products increase the total costs due to the decrease in remanufactured product amounts. Because of decrease in the amount of return products, demand is satisfied from production in both production systems.

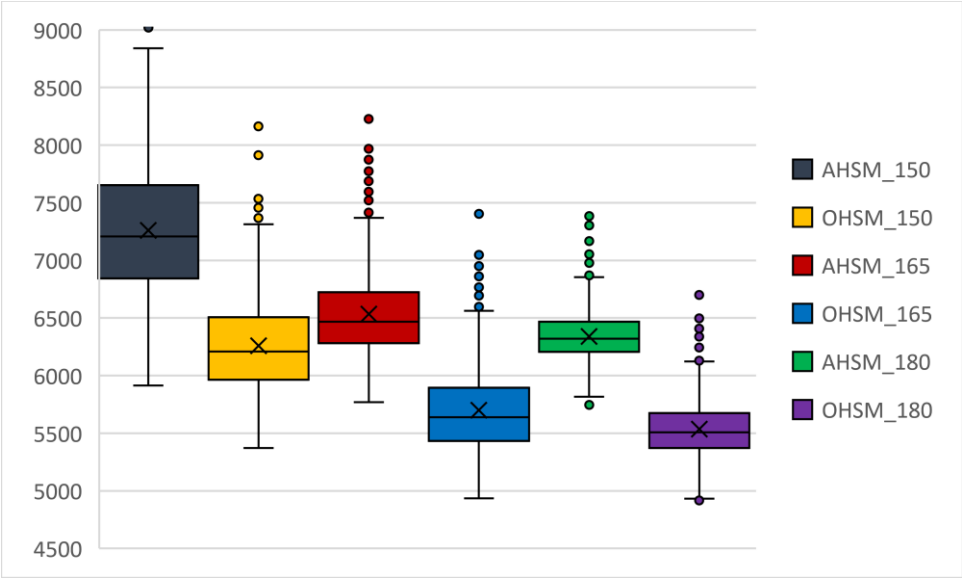


Figure 2. The results of production system with separate and joint setup assumptions when the carbon emission capacity is equal to 150, 165 and 180.

Figure 2 represents the results of production system with separate and joint setup assumptions when the carbon emission capacity is equal to 150, 165 and 180, respectively. The results illustrate that a decrease in carbon emission capacity considerably increases total costs of both production systems. Moreover, decreased carbon emission capacity also directly affects the amounts of production and remanufacturing. When carbon emission capacity is 150, limited production and remanufacturing amounts do not satisfy the demand and high penalty costs has been incurred to company.

Conclusion

Scarce resources, increased competitive environment and legal regulations increase the interest in sustainability issue from both companies and public. Recycling, reuse and remanufacturing are leading approaches to incorporate sustainability in production systems. This study aims to determine the effect of carbon emission on production and inventory decisions in hybrid production systems. Two different setup processes are considered for hybrid production system; there is a separate setup or joint setup processes for both manufacturing and remanufacturing. A mixed-integer linear programming has been proposed to solve the considered problem. According to the results of base case and sensitivity analysis, carbon emission considerably affects the total costs performance of both production systems.