



DOĞUŞ ÜNİVERSİTESİ DERGİSİ

DOGUS UNIVERSITY JOURNAL

e-ISSN: 1308-6979

<https://dergipark.org.tr/pub/doujournal>

İKİ AŞAMALI YEŞİL BİR TEDARİK ZİNCİRİNDE STOK KONTROLÜ

INVENTORY CONTROL IN A TWO-STAGE GREEN SUPPLY CHAIN

Harun ÖZTÜRK⁽¹⁾

Öz: Geri dönüşüm, yeniden üretim ve tamir işlemleri, daha az enerji kullanımı ve daha az atık oluşumunu sağlayarak işletmelerin karlılığını artırmaktadır ve tedarik zinciri toplam maliyeti üzerinde olumlu yönde etki yapmaktadır. Bu çalışmada, farklı ülkelerde bulunan tek bir üretici ve tek bir perakendeciden oluşan iki aşamalı tedarik zinciri sistemi için ekonomik ve çevresel hedefleri birlikte gözetilen bir bütünleşik stok kontrol modeli geliştirilmektedir. Bu çalışmadaki problem, sistemin toplam stok maliyetini enküçükleyecek şekilde üreticinin parti sayısının ve perakendecinin parti büyüklüğünün, yani bütünleşik üretim-stok kontrol politikası parametrelerinin birlikte hesaplanmasıdır. Perakendecinin teslim aldığı her parti iyi kaliteli ürünlerle birlikte kusurlu ürünler de içermektedir. Kusurlu ürünlerin bir kısmı hurdaya ayrılmakta ve geri dönüşüm/yeniden üretim sürecine girmek üzere üreticiye geri gönderilmektedir, diğer kısmı ise yerel bir firmada tamir edildikten sonra eldeki stoğa eklenmektedir. Ürünlerin üreticiden perakendeciye ve kusurlu ürünlerin perakendeciden üreticiye ve tamir merkezine taşınmasından kaynaklanan karbon emisyon maliyetleri modele dahil edilmiştir. Bu çalışmadaki amaç, dışkaynak tamir, geri dönüşüm/yeniden üretim ve karbon emisyonunun birlikte tedarik zinciri performansı üzerindeki etkisini modellemektir. Sayısal bir örnek yardımıyla teorik sonuçlar elde edilmiş ve duyarlılık analizleri verilmiştir. Sayısal analiz sonucunda, tamir işleminin geri dönüşüm/yeniden üretim işlemiyle birlikte tedarik zinciri toplam stok maliyeti üzerinde olumlu yönde etkisinin olduğu gözlemlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Tamir, Geri Dönüşüm, Yeniden Üretim, Karbon Emisyonu, Matematiksel Model

Abstract: Recycling, remanufacturing and repair processes increase the profitability of companies by providing less energy use and less waste generation, and have a positive effect on the total cost of the supply chain. In the present study, an integrated inventory model, which considers economic and environmental objectives together, was developed for a two-level supply chain system consisting of a single manufacturer and a single retailer located in different countries. The problem is the simultaneous calculation of the manufacturer's number of shipments and the buyer's shipment sizes, that is, the parameters of the integrated production-inventory policy, to minimize the total cost of the system. Each batch the retailer received contains both good quality products and defective products. Some of the defective products are scrapped and sent back to the manufacturer to enter the recycling/remanufacturing process, while the other part is added to the inventory after being repaired at a local company. The carbon emission costs of transporting products from manufacturer to retailer and defective products from retailer to manufacturer and repair center were included in the model. Our aim was to model the joint effects of outsourcing repair, recycling/remanufacturing, and carbon emissions on supply chain performance. Theoretical results were obtained with the help of a numerical example and sensitivity analysis was carried out. Numerical analysis showed that the repair process together

⁽¹⁾ Süleyman Demirel Üniversitesi, İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi, İşletme Bölümü; harunozturk@sdu.edu.tr, ORCID: 0000-0003-0193-6663

Geliş/Received: 17-11-2022; Kabul/Accepted: 29-05-2023

with the recycling/remanufacturing process has a positive effect on the total inventory cost of the supply chain.

Keywords: *Repair, Recycling, Remanufacturing, Carbon emissions, Mathematical Model*

JEL: *C61, M11, Q53, Q56*

1. Giriş

İşletmeler üretim faaliyetleri sırasında kullanılacak hammadde ve yarı mamul gibi maddelere duyacağı ihtiyaca ve talep durumuna göre stok seviyelerini ayarlamalıdır. Çünkü, stokların işletmelerin kârlılığını etkileyen faktörler arasında önemli biri yeri vardır (Kobu, 1994; Özkan, 2012). Hammadde ve yedek parçanın bulunamaması üretimde aksamalara ve fabrikaların kapanmasına neden olmaktadır. (Goonatilake, 1984; Chen vd., 2009). Üretimde ortaya çıkan bu aksamaların ve darboğazların bir kısmı uygulanan stok kontrol politikalarının yetersiz kalmasından kaynaklandığından, klasik stok kontrol tekniklerinin geçerliliği gözden geçirilmeli ve belirli endüstriyel çevreye veya rekabet şartlarına daha uygun stok kontrol teknikleri geliştirilmelidir (Goonatilake, 1990; Kobu, 1994). Bilinen ilk stok kontrol modeli, Harris (1913) tarafından geliştirilen Ekonomik Sipariş Miktarı (ESM) modelidir. Bir diğer stok kontrol modeli ise Taft (1918) tarafından önerilen Ekonomik Üretim Miktarı modelidir. Bu klasik yaklaşımlardaki temel sorun, optimal sipariş/üretim miktarının belirlenmesi problemine tek taraflı olarak ya perakendeci (alıcı) ya da üretici (satıcı) tarafından bakılmasıdır. İlgili probleme tek taraflı bakış açısı ile çözüm aramak işletmelerin sürekliliği ve rekabet üstünlüğü sağlamaları açısından uzun vadede yeterli bir çözüm değildir. Çünkü, günümüz küresel pazarlarında rekabet, sadece işletme düzeyinde kalmayıp, bunun daha da ötesine giderek tedarik zinciri boyutuna taşınmıştır. Üyelerin birbirinden bağımsız olarak hareket etmeleri tedarik zinciri yönetimini zorlaştırmakta ve toplam maliyeti artırmaktadır (Paksoy ve Altıparmak, 2003). Tedarik zinciri yönetiminin en önemli parçalarından biri stok yönetimidir. Çünkü, stoklar tedarik zinciri içinde herhangi bir noktada olabilmekte ve işletme varlıklarının yaklaşık olarak üçte birini oluşturmaktadır (Daniel ve Rajendran, 2005; Diaz ve Fu, 1997). Etkili bir tedarik zinciri yönetimi için stoklar etkin bir şekilde yönetilmelidir. Bu ise, taraflar arasında yakın iş birliği ve iyi bir koordinasyon ile mümkündür. Merkezi tedarik zinciri problemlerinde üyeler arasındaki koordinasyon, tek bir karar vericinin sistemin tamamını optimize etmesiyle sağlanmaktadır (Toktaş-Palut, 2021). Bu doğrultuda, tek bir üreticiden ve tek bir perakendeciden oluşan iki aşamalı merkezi bir tedarik zinciri problemi ilk olarak Goyal (1976) tarafından bütünsel stok kontrol modeli yardımıyla formüle edilmiştir ve literatürde araştırmacılar tarafından oldukça fazla ilgi çeken konulardan biridir (Hill, 1997; Jaber ve Zolfaghari, 2008; Glock, 2012; Sharafali ve Co, 2000).

Küreselleşme ile üretim sürecinin aşamaları farklı ülkelerde gerçekleştirilmeye başlanmış, ürün ve hizmetler farklı coğrafi bölgelerdeki pazarlardan temin edilebilir hale gelmiştir. İşletmeler ve özellikle de çokuluslu ve/veya küresel şirketler, tedarikçileri ile koordinasyon sağlayarak uluslararası pazarlara ya hedef pazarlarda doğrudan üretim yaparak ya da uluslararası pazarlara yakın merkezlerde üretim yaparak açılmaktadırlar (Erkök, 2020). Örneğin, tedarikçileri ile yapmış olduğu iş birlikleri sayesinde diğer işletmelerin de tedarik zinciri yönetiminde iş birliğinin avantajlarından yararlanarak önemli başarılar elde etmesine öncülük eden Amerikan perakende satış mağazalar zinciri Wal-Mart, Türkiye’de pamuk üretimini, Çin’de ip

eğirme ve örme işlemlerini, Guatemala'da ise kesme ve dikme işlemlerini gerçekleştirmektedir (Dağ ve Kabadayı, 2020; Plambeck, 2012).

Üretim süreci, üretim, kalite kontrol, taşıma, bekleme ve depolama işlemleri için gerekli sürelerin toplamından oluşmaktadır (Gersil, 2007). Günümüzde üretim süreçleri daha karmaşık ve otomasyona dayalı hale gelmiştir. Ancak hala üretim sürecinde insan faktörünün kullanılmadığını söylemek zordur (Yıldız, 2018; Sgarbossa vd., 2020). İnsana dayalı sistemlerde birçok unsura bağlı olarak tehlikeli durumlara karşılaşılmakta ve neticesinde alıcıya teslim edilen ürünlerden bir kısmı gerekli kalite standartlarını sağlamadığından kusurlu (düşük kaliteli) ürün olarak ayrılmaktadır (Orak ve Çelik, 2017; Ala ve İkiz, 2015; Yıldıztekin, 2005). İşletmeler, ileri üretim teknolojileri sayesinde bu kusurlu ürünleri tamir ederek ekonomiye yeniden kazandırıp üretim maliyetlerini, enerji tüketimini ve atıkları azaltırken sürdürülebilir üretim ve sürdürülebilir ürünlerin geliştirilmesini de sağlamaktadırlar (Bazan vd., 2017; Konstantaras vd., 2021). Örneğin, Japon fabrika otomasyon firması FANUC, 2012 yılında Lüksemburg'ta açtığı tamir merkezinin ardından 2020 yılında Türkiye'de de bir tamir merkezi açarak endüstriyel robotların el kumandalarıyla birlikte robot teknolojilerinde kullanılan motor ve sürücülerinin tamirini yapmaktadır (FANUC, 2020). Jaber vd. (2014), bu işletme modelinden esinlenerek benzer bir çalışma yapmıştır ve farklı ülkede bulunan bir üreticiden teslim alınan ürünler içerisinde kusurlu ürünlerin de bulunması, bu ürünlerin ya dışkaynak kullanılarak yerel bir firmada tamir edilip tekrar eldeki stoğa eklenmesi ya da yerel bir tedarikçiden kusurlu ürün sayısı kadar iyi kaliteli ürünün daha yüksek fiyata satın alınması varsayımlarının birlikte bir ekonomik sipariş miktarı modeli üzerindeki etkisini araştırmıştır. Sayısal analiz sonucunda, kusurlu ürün oranının büyük olduğu durumlarda dışkaynak tamir işlemini dikkate alan modelin satın alma durumunu düşünen modele göre daha avantajlı olduğu görülmüştür. Ancak, çalışmada ele alınan sistemde tek bir perakendeci bulunmaktadır ve üretici bu sisteme dahil edilmemiştir. Geliştirilen model, perakendeci için toplam stok maliyetini enküçükleyecek optimal sipariş miktarını belirlemeyi amaçlamıştır.

İşletmelerin, üretim, taşıma ve depolama (stok bulundurma) gibi operasyonel faaliyetleri aşırı miktarda karbondioksit (CO₂) ve diğer sera gazı salımlarına neden olmaktadır (Soruşbay, 2007; Jaber vd., 2013; Talezadeh vd., 2020). Bu faaliyetlerden kaynaklanan sera gazı salımları, hava kirliliği, küresel ısınma ve iklim değişikliğinin birincil sebebi olarak görülmektedir (Çoban ve Şahbaz Kılınç, 2016; Güner ve Turan, 2017). Son yıllarda ülkeler tarafından uygulanan karbon emisyon hacmini azaltıcı ve emisyon artışını kontrol altında tutmayı sağlayan karbon vergisi ve karbon ticareti gibi yasal düzenlemeler ve tüketicilerin çevre bilincinin artması, işletmeleri faaliyetlerini sürdürürken ekonomik hedeflerle beraber çevresel hedefleri de dikkate almaları konusunda sorumlu hale getirmiştir (Savaskan vd., 2004; Büyüközkan ve Vardaloğlu, 2008; Çiçek ve Çiçek, 2012; Yıldız Çankaya, 2015; Kumbaroğlu vd., 2017). Literatürde, tedarik zincirlerinde çevresel sorunları modelleyen çok sayıda çalışma bulunmaktadır. Bu çalışmaların temel amacı, emisyon maliyetlerini tedarik zinciri toplam maliyetine eklemektir. Wahab vd. (2011), tek bir üreticiden ve tek bir perakendeciden oluşan iki aşamalı merkezi bir tedarik zinciri problemini ele almış ve üretici ile perakendecinin hem aynı ülke sınırları içerisinde olduğu hem de farklı ülkelerde bulunduğu ulusal ve uluslararası iki tedarik zinciri için bütünleşik stok kontrol modelleri geliştirmişlerdir. Siparişlerin üreticiden perakendeciye ve kusurlu ürünlerin perakendeciden üreticiye taşınması işlemlerinden kaynaklanan emisyon maliyetlerinin optimal sipariş miktarı, parti sayısı ve tedarik zinciri sisteminin toplam

stok maliyeti üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Kusurlu ürün oranının artmasıyla parti sayısı ve sipariş miktarı artmış ve çevre maliyetlerinin modele dahil edilmesiyle de tedarik zinciri toplam maliyeti yaklaşık olarak iki kat artmıştır. Çalışmada, perakendeci tarafından belirlenen kusurlu ürünlerin tamamı üreticiye geri gönderilmektedir, ancak, bu ürünlerin farklı kalitede sınıflandırılmasıyla farklı işkolları (tamir ve onarım merkezleri gibi) ortaya çıkmakta ve bu işkollarında faaliyet gösteren işletmeler sistem içerisine dahil edilerek çok daha fazla ekonomik ve çevresel fayda elde edilebilmektedir.

Bu çalışmada, iki aşamalı merkezi bir tedarik zinciri problemi ele alınmıştır ve geri dönüşüm/yeniden üretim, tamir ve karbon emisyonu varsayımları altında farklı ülkelerde bulunan tek bir üretici ve tek bir perakendeci için ekonomik ve çevresel hedefleri birlikte gözetilen bir bütünleşik stok kontrol modeli geliştirilmiştir. Üretici, partiler halinde üretim yapmaktadır ve her partide belirli bir miktarda kusurlu ürün bulunmaktadır. Kusurlu ürünlerden bir kısmı üreticiye geri gönderilmekte ve geri dönüşüm/yeniden üretim sürecine girmektedir, ancak bu işlem üreticinin maliyetini ve ürünlerin tesliminden kaynaklanan parti sayısını etkilemektedir. Perakendeci, kusurlu ürünlerin elde kalan diğer kısmını tamir merkezine göndererek tamir ettirmektedir. Tamir edilen ürünler talebi karşılamak üzere eldeki stoğa eklendiğinden, tamir işlemi perakendecinin maliyetini ve sipariş miktarını etkilemektedir. Literatürdeki çalışmalar ve sektör uygulamaları, yeniden üretim ve tamir işlemlerinin enerji kullanımını, girdi ve atık maliyetleri ile çevre kirliliği ve karbon emisyonunu önemli ölçüde azaltarak tedarik zinciri toplam maliyeti üzerinde olumlu yönde etki yaptığını göstermektedir (Guide Jr., 2000). Bu çalışmadaki temel amaç, geri dönüşüm/yeniden üretim ve tamir işlemlerinin birlikte programlanmasının tedarik zinciri toplam stok maliyeti üzerindeki ortak etkisini incelemektir. Perakendecinin maliyetinin ve sipariş miktarının kusurlu ürünlerin tamir işlemine bağlı olarak modellenmesi ve hem üreticinin hem de perakendecinin sürdürülebilirliğin ekonomik ve çevresel boyutlarına katkı sağlamak amacıyla kusurlu ürünleri değerlendirmek suretiyle fazladan maliyetlere katlanması, bu çalışmada ele alınan problemi ve geliştirilen modeli literatürdeki diğer çalışmalardan ayırmaktadır.

Çalışma aşağıdaki gibi organize edilmektedir. İkinci bölümde konu ile ilgili literatüre yer verilmektedir. Üçüncü bölümde, problemin tanımı, varsayımlar ve simgeler verilmektedir. Dördüncü bölümde, üretici, perakendeci ve bütünleşik sistem için toplam maliyet fonksiyonları türetilmekte, optimal sevkiyat sayısı ve optimal sipariş miktarını veren eşitlikler elde edilmektedir. Beşinci bölümde, sayısal bir örnek ve duyarlılık analizi yardımıyla geliştirilen modelin işleyişi gösterilmektedir. Son bölümde, çalışmada elde edilen sonuçlara ve gelecek çalışmalara değinilmektedir.

2. Literatür Taraması

Bu bölümde, çalışmada ele alınan konu ile ilgili olarak kusurlu ürünler içeren bütünleşik stok kontrol modelleri ve çevresel etkileri dikkate alan bütünleşik stok kontrol modelleri üzerine yapılmış çalışmalara yer verilmektedir.

2.1. Kusurlu Ürünler İçeren Bütünleşik Stok kontrol Modelleri

Perakendecinin teslim aldığı partilerde kusurlu ürün bulunması varsayımı ilk olarak Salameh ve Jaber (2000) tarafından geliştirilen ESM modelinde ele alınmıştır. Bu problem daha sonra bütünleşik satıcı – alıcı (üretici – perakendeci) yaklaşımının dahil edilmesiyle Huang (2002) tarafından iki aşamalı tedarik zinciri problemine genişletilmiştir. Ouyang vd. (2006), teslim alınan her partide iyi kaliteli ürünlerle

birlikte kusurlu ürünlerin de bulunduğu ve kusurlu ürün oranının bir sabit ve üçgen bulanık sayı olduğu durumlar için matematiksel modeller geliştirmiştir. Liu ve Çetinkaya (2011), tek bir üretici ve tek bir perakendeciden oluşan iki aşamalı tedarik zinciri modelinde, üreticiden perakendeciye teslim edilen partiler içerisinde kusurlu ürünlerin de bulunduğunu ve kusurlu ürünlerin perakendeci tarafından gerçekleştirilen kalite kontrol (tarama) işleminden sonra üreticiye geri gönderildiğini varsaymış, rassal getirinin tedarik zinciri toplam maliyeti üzerindeki etkisini araştırmıştır. Hsu ve Hsu (2013), önerdikleri bütünlük stok kontrol modelinde üretim sırasında kusuru ürünlerin de üretilmesi, kusurlu ürünlerin perakendeci tarafından belirlendikten sonra üreticiye gönderilmesi ve üreticinin kusurlu ürünleri indirimli fiyattan satması ve perakendecinin stoksuz kalması varsayımlarını dikkate almıştır. Chiu vd. (2013), ödemede gecikmeye izin verilmesi ve talep miktarının satış fiyatının bir fonksiyonu olması varsayımları altında tek bir üretici ve tek bir perakendeci için bir bütünlük stok kontrol modeli geliştirmiştir. Üretim sürecinin kusurlu ürünler de üretmesi ve bu kusurlu ürünlerin perakendeci tarafından belirlenerek indirimli fiyattan satılması modeldeki diğer varsayımlardır.

Dey ve Giri (2014), kusurlu üretim süreci, kusurlu ürün miktarını azaltmak amacıyla üretim sürecinin iyileştirilmesi, kusurlu ürünlerin perakendeci tarafından belirlenerek bir sonraki parti teslim alınmaya kadar stokta bekletilmesi varsayımları altında iki aşamalı tedarik zinciri için bir bütünlük model geliştirmiştir. Ouyang vd. (2014), kusurlu ürünler üreten üretim sistemleri için sistemin toplam karını maksimum yapmak üzere bir bütünlük stok kontrol modeli geliştirmiştir. Üreticinin perakendeciye ödemede gecikmeye izin vermesi, perakendeci tarafından teslim alınan partilerin tamamen taranması ve belirlenen kusurlu ürünlerin bir sonraki sipariş tesliminde üreticiye geri gönderilmesi çalışmadaki temel varsayımlardır. Lai vd. (2015), üreticinin üretim sürecinin kontrol dışına çıkması ve kusurlu ürünler üretmesi varsayımları altında iki aşamalı tedarik zinciri problemi için matematiksel modeller geliştirmiştir. Khan vd. (2016), tedarikçi yönetimli stok kontrol yaklaşımının tedarik zinciri performansı üzerindeki etkisini araştırmak amacıyla perakendecinin belirlediği kusurlu ürünlerin hurda olarak ayrılması ya da tamir edilerek stoğa eklemesi varsayımları altında bir bütünlük stok kontrol modeli geliştirmiştir.

Sarkar vd. (2017), taşıma maliyetinin üreticiden perakendeciye teslim edilen parti büyüklüğünün bir fonksiyonu olması, üretim sırasında kusurlu ürünlerin belirlenmesi ve kusurlu ürünlerin aynı üretim sisteminde tamir edildikten sonra da kalite kontrol sürecinden geçmesi varsayımları altında bir bütünlük stok kontrol modeli geliştirmiştir. Chen (2017), üretim sürecinin kontrol dışına çıktığı ve üretim sırasında kusurlu ürünlerin de üretildiği varsayımı altında bir bütünlük stok kontrol modeli geliştirmiştir. Üretim sırasındaki kalite kontrol işlemiyle belirlenen kusurlu ürünler aynı üretim sisteminde tamir edilirken, tarama sürecinden geçmeden perakendeciye gönderilen ürünler içerisindeki kusurlu ürünler satış sonrası müşteriler tarafından perakendeciye teslim edilmekte ve geri ödemeleri yapılmaktadır. Üretici, satış sonrası geri dönen kusurlu ürünlerden daha iyi durumda olanları tamir ederken diğerlerini indirimli fiyattan satmaktadır. Giri vd. (2017), üreticiden perakendeciye gönderilen parti büyüklüğünün bir teslimattan diğerine geometrik artış gösterdiği ve teslim edilen ürünler içerisinde kusurlu ürünlerin de bulunduğu bir tedarik zinciri probleminde tedarikçi yönetimli stok kontrol yaklaşımını benimsemiş ve kusurlu ürünlerin perakendeci tarafından belirlendikten sonra hurdaya ayrılması ya da dışkaynak yoluyla tamir edilmesi durumları için iki ayrı bütünlük stok kontrol modeli geliştirmiştir. Cheng vd. (2018), iki aşamalı tedarik zinciri probleminde üretim

sürecinin kontrol dışına çıktığını ve üretilen ürünler içerisinde kusurlu ürünlerinde bulunduğunu varsaymıştır. Kusurlu ürünlerin üretici tarafından belirlenerek hurda ürün olarak stoktan çıkarılması ve perakendeciye sadece iyi kaliteli ürünlerin teslim edilmesi çalışmadaki diğer önemli varsayımdır.

Udayakumar ve Geetha (2018), iki aşamalı tedarik zinciri modelinde, ödemelerde gecikmeye izin verilmesi, üretim sırasında kusurlu ürünlerin de üretilmesi, kusurlu ürünlerin perakendeci tarafından belirlenip üreticiye gönderilmesi ve kusurlu ürünlerin indirimli fiyattan ikincil pazarda satılması varsayımlarını dikkate almış ve toplam maliyeti minimum yapacak şekilde sipariş miktarını, üreticiden perakendeciye gönderilen parti sayısını ve tedarik süresini bulmayı amaçlamıştır. Wangsa ve Wee (2019), kusurlu ürünlerin perakendeci tarafından güvenilir olmayan kalite kontrol süreci sonunda üreticiye geri gönderildiği ve ikincil pazarda indirimli fiyattan satıldığı varsayımları altında bir bütünlük stok kontrol modeli geliştirmişlerdir. Öztürk (2021), iki aşamalı tedarik zinciri probleminde üreticinin ve perakendecinin farklı ülkelerde bulunduğunu ve üretim sırasında üretilen kusurlu ürünlerin perakendeci tarafından belirlenerek yerel bir firmada tamir ettirildikten sonra tekrar stoğa eklendiğini varsaymıştır. Üreticiden perakendeciye teslim edilen parti büyüklüklerinin değiştiğini dikkate almış ve üç farklı matematiksel model geliştirmiştir. Lin vd. (2021), tek bir üreticiden tek bir perakendeciye eşit büyüklükte ve sonlu sayıda partilerin teslim edildiği bir tedarik zinciri probleminde üreticinin üretim sırasında kalite kontrol ve tamir işlemlerini birlikte gerçekleştirdiğini varsaymıştır.

2.2. Çevresel Hedefleri Dikkate Alan Bütünlük Stok Kontrol Modelleri

Zanoni vd. (2014), üreticiden perakendeciye gönderilen parti büyüklüğünün, parti sayısının ve üretim miktarının karar değişkenleri olduğu iki aşamalı tedarik zinciri modelinde, karbon emisyonunun üretim sürecinden kaynaklandığını varsaymış ve tedarikçi yönetimli stok kontrol yaklaşımının tedarik zinciri toplam maliyeti üzerindeki etkisini araştırmıştır. Gurtu vd. (2015), üreticiden perakendeciye teslim edilen partilerin tamamen iyi kaliteli ürünlerden oluştuğu ve karbon emisyonunun ürünlerin taşınmasından kaynaklandığı iki aşamalı tedarik zinciri modelinde, taşıma ve karbon emisyon maliyetlerindeki artışın tedarik zinciri performansı üzerindeki etkisini araştırmıştır. Bazan vd. (2017), sonlu üretim hızı ile üretilen tek cins ürünün eşit büyüklükte partiler halinde perakendeciye teslim edildiği iki aşamalı tedarik zinciri probleminde, kullanılmış ürünlerden bir kısmının perakendeci tarafından toplandığını ve üreticiye gönderilerek yeniden üretim süreci sonunda talebi karşılamak için eldeki stoğa eklendiğini, diğer kısmının ise hurdaya ayrıldığını varsaymıştır. Tedarikçi yönetimli stok kontrol yaklaşımının sistem maliyeti üzerindeki etkisini araştırmak amacıyla geliştirilen matematiksel model, üretim ve yeniden üretim için gerekli enerji kullanımı ile üretim, yeniden üretim ve taşıma faaliyetlerinden kaynaklanan karbon emisyonu etkilerini de içermektedir.

Aljazzar vd. (2018), ödemelerde gecikmeye izin verilmesi ve karbon emisyonunun tedarik zinciri performansı üzerindeki etkisini araştırmak amacıyla üreticiden perakendeciye eşit büyüklükte parti gönderimi için bir bütünlük stok kontrol modeli geliştirmiştir. Tiwari vd. (2018), bozulabilen ve kusurlu ürünler için bir bütünlük stok kontrol modeli geliştirmiştir. Kusurlu ürünlerin perakendeci tarafından belirlendikten sonra stoktan çıkarılması, karbon emisyonunun taşıma, depolama ve bozulabilen ürünleri elde bulundurmada kaynaklanması çalışmadaki temel varsayımlardandır. Gautam vd. (2019), tek bir üretici ve tek bir perakendeciden oluşan

iki aşamalı tedarik zinciri probleminin hem merkezi ve hem de her iki üyenin de sadece kendi sistemini en iyilemeye çalıştığı merkezkaç çözümlerini elde etmiştir. Merkezkaç tedarik zincirinin çözümü oyun teorisi yardımıyla elde edilmiş ve sayısal analizler sonucunda perakendecinin tedarik zinciri sisteminin lideri olduğu Stackelberg yaklaşımının daha iyi sonuç verdiği görülmüştür. Perakendecinin belirlediği kusurlu ürünlerin üreticiye geri gönderilmesi ve kusurlu ürünlerin değerlendirilmesi alternatifi, karbon emisyon maliyetlerini azaltırken toplam karda da artışı sağlamıştır. Rout vd. (2020), üretim sırasında kusurlu ve bozulabilen ürün üretilmesi ve bu kusurlu ürünlerin aynı üretim sisteminde tamir edilmesi varsayımları altında tek bir üretici ve tek bir perakendeci için bir bütünlük stok kontrol modeli geliştirmiştir. Geliştirilen model, üretim, taşıma, stokta tutma ve bozulan ürünlerden kaynaklanan emisyon maliyetlerini içermektedir.

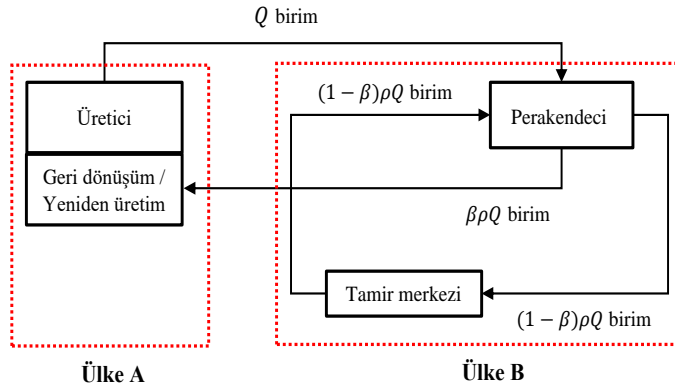
Rizky vd. (2021), üreticiden perakendeciye gönderilen partilerin belirli bir oranda kusurlu ürün içermesi, perakendecinin kalite kontrol sürecinin güvenilir olmayıp tarama hatalarının (Tip 1 ve Tip 2) ortaya çıkması ve belirlenen kusurlu ürünlerin tarama süresi sonunda üreticiye gönderilmesi varsayımları altında bir matematiksel model önermiştir. Çevresel duyarlılığı dikkate almak amacıyla ürünlerin taşınmasından kaynaklı karbon emisyon maliyetleri modele dahil edilmiştir. Jauhari vd. (2022), kusurlu ürün ve kusurlu ürünlerin aynı üretim sisteminde tamir edilmesi, kusurlu ürün miktarını azaltmak üzere üretim sisteminin iyileştirilmesi, hem üretim hem de tamir işlemlerinin karbon emisyonuna neden olması ve üretim hızının üretim maliyetine ve karbon emisyonuna bağlı olması varsayımları altında bir bütünlük stok kontrol modeli geliştirmiştir. Malleeswaran ve Uthayakumar (2022), talep miktarının satış fiyatının bir fonksiyonu olduğu ve üretim sisteminin iyileştirilmesi amacıyla yatırıma izin verilmesi varsayımları altında bir bütünlük stok kontrol modeli geliştirmiştir. Modelde yer alan sabit ve değişken karbon emisyonu maliyetleri, ürünlerin üreticiden perakendeciye taşınmasından kaynaklanmaktadır. Singh ve Mishra (2022), bozulabilen ve ikame edilebilen ürünler için önerdikleri bütünlük stok kontrol modelinde, karbon emisyonu maliyetlerinin ürünlerin taşınmasından ve üretim sürecinden kaynaklandığını varsaymıştır.

Kusurlu ürün literatürü ve çevresel hedefleri dikkate alan çalışmalar incelendiğinde, kusurlu ürünlerin tamir işleminin geri dönüşüm/yeniden üretim işlemi ve çevre maliyetleriyle birlikte modellenmesi üzerine henüz bir çalışmanın yapılmadığı görülmektedir. Önceki çalışmalar genel olarak kusurlu ürünlerin perakendeci tarafından belirlendikten sonra tamamının üreticiye geri gönderildiğini varsaymıştır. Bu çalışmaların bir kısmında kusurlu ürünlerin üretici tarafından indirimli fiyattan satılması etkisinin modellenmesi incelenirken, diğer kısmında kusurlu ürünlerin üretici tarafından nasıl değerlendirildiği açık olarak belirtilmemiştir. Öztürk (2021) tarafından geliştirilen modelde ise sadece tamir işlemi dikkate alınmış, geri dönüşüm/yeniden üretim ve çevre maliyetinin etkileri modele dahil edilmemiştir. Bu çalışmada, perakendeci tarafından belirlenen kusurlu ürünler tamir edilebilir ve yeniden işlenebilir olmak üzere iki grupta sınıflandırılmaktadır. Tamir ve geri dönüşüm/yeniden üretimle üretim sırasında ortaya çıkan hammadde, işçilik, atık, çevre ve enerji maliyetleri azaltılırken, üretim sonrasında da taşıma ve çevre maliyetleri azaltılmaya çalışılmaktadır. Kusurlu ürünlerin tamamının tamir edilebilir özellikte olmayıp bir kısmının daha düşük kalitede olması ve hurda (ıskarta) olarak ayrılmasıyla gerçek yaşam problemlerine daha yakın bir durum ortaya konulmaktadır. Tüm bu faaliyetlerden kaynaklanan çevre maliyetleri de modele dahil edilmektedir.

Bu bakımdan, bu çalışma, yukarıda değinilen her iki literatüre de katkıda bulunmaktadır.

3. Problemin Tanımı, Varsayımlar ve Simgeler

Bu çalışmada ele alınan tedarik zinciri probleminin bir tanımı aşağıdaki gibidir. Tedarik zinciri sistemi, iki aşamalı olup farklı ülkelerde bulunan tek bir üretici (Ülke A) ve tek bir perakendeciden (Ülke B) oluşmaktadır. Sistemdeki ürün akışı Şekil 1’de gösterilmektedir. Üretici tek kalem ürünü nQ büyüklüğünde partiler halinde üretmektedir ve her partiyi sonlu sayıda (n -tane) ve Q büyüklüğünde partiler halinde perakendeciye teslim etmektedir. Üreticinin sabit üretim hazırlık maliyeti, birim üretim maliyeti ve bir birim ürünü bir birim zaman stokta tutma maliyeti sırasıyla S_U , C_p ve h_U ’dir. Perakendecinin sabit sipariş maliyeti S_p ve teslim aldığı her bir parti için ödediği sabit taşıma maliyeti F_p ’dir. Teslim alınan her partide iyi kaliteli ürünlerle birlikte kusurlu (düşük kaliteli) ürünler (ρ oranında) de bulunmaktadır ve talep sadece iyi kaliteli ürünlerden karşılanmaktadır. Perakendeci, her bir partideki kusurlu ürünleri ayırmak için teslim aldığı ürünlerin tamamını kalite kontrol sürecinden geçirmektedir ve birim zamandaki tarama hızı ve bir birim ürünü tarama maliyeti sırasıyla X ve d ’dir. Kalite kontrol (tarama) süreci tamamen güvenilir olup Tip 1 ve Tip 2 hataları görülmemektedir. Perakendecinin bir birim ürünü bir birim zaman stokta tutma maliyeti h_p ’dir. Kusurlu ürünlerin stokta tutulmasından dolayı oluşan maliyet üretici tarafından karşılanmaktadır. Tarama süreci sonunda belirlenen kusurlu ürünlerden bir kısmı (β oranında, $\beta\rho Q$ birim) tamir kapasite sınırından dolayı geri dönüşüm/yeniden üretim sürecine girmek üzere üreticiye geri gönderilmektedir. Bu işlem için ortaya çıkan sabit (F) ve değişken (c) maliyetler yine üretici tarafından karşılanmaktadır. Kusurlu ürünlerin diğer kısmı ($1 - \beta$ oranında, $(1 - \beta)\rho Q$ birim) tamir edilmek üzere tamir merkezine (Ülke B) gönderilmektedir. Tamir edilen ürünlerin tamamı iyi kaliteli ürünler olarak değerlendirilmektedir ve bu ürünler tamir işleminin ardından talebi karşılamak üzere eldeki stoğa eklenmektedir. Bu ürünler için birim stokta tutma maliyeti h_R ’dir.



Şekil 1. İki Aşamalı Tedarik Zinciri Sistemi ve Ürün Akışı

Çalışmada ele alınan tedarik zinciri probleminin matematiksel modelini geliştirmede kullanılacak varsayımlar ve notasyonlar aşağıdaki gibidir.

Varsayımlar:

1. Perakendecinin birim zamandaki talep miktarı (D) bilinmektedir, süreklidir ve sabittir.
2. Üreticinin üretim hızı sınırlıdır ve birim zamanda P birimdir.
3. Birim zamandaki tarama ve tamir miktarı, birim zamandaki talep miktarından büyüktür.
4. Perakendeci tarafından teslim alınan her partideki kusurlu ürün oranı ρ ve kusurlu ürünler içindeki geri dönüşüm/yeniden üretime girecek ürün oranı β bilinmektedir ve sabittir.
5. Stoksuz kalmaya izin verilmemektedir.
6. Planlama dönemi sonsuzdur.

Notasyonlar

Q	Parti büyüklüğü
n	Parti sayısı
D	Talep miktarı
P	Üretim miktarı
X	Tarama miktarı
ρ	Kusurlu ürün oranı
β	Geri dönüşüm/yeniden üretime girecek ürün oranı
$1 - \beta$	Tamir edilecek ürün oranı
S_P	Perakendecinin sipariş maliyeti
S_U	Üreticinin üretim hazırlık maliyeti
F_P	Perakendecinin her parti için sabit taşıma maliyeti (\$/parti)
F_U	Üreticinin geri dönüşüm/yeniden üretim için sabit taşıma maliyeti
C_U	Üreticinin geri dönüşüm/yeniden üretim için birim taşıma maliyeti
C_P	Birim üretim maliyeti
d	Tarama maliyeti (\$/birim)
h_U	Üreticinin stokta tutma maliyeti (\$/birim/yıl)
h_P	Perakendecinin stokta tutma maliyeti (\$/birim/yıl)
K_U	Üreticinin sabit emisyon maliyeti
L_U	Üreticinin birim emisyon maliyeti
K_P	Perakendecinin sabit emisyon maliyeti
L_P	Perakendecinin birim karbon emisyon maliyeti
m	Kâr oranı
R	Tamir miktarı
K_T	Tamir merkezinin sabit emisyon maliyeti
L_T	Tamir merkezinin birim emisyon maliyeti
S	Tamir hazırlık maliyeti (\$)
A	Tamir için sabit taşıma maliyeti
c_T	Tamir için birim taşıma maliyeti (\$/birim)
c_1	Tamir için birim malzeme ve işçilik maliyeti
h_R	Tamir edilen ürünler için stokta tutma maliyeti (\$/birim/yıl)
h'	Tamir için stok tutma maliyeti ((\$/birim/yıl)
t_T	Tamiri yapılacak ürünleri taşıma süresi

4. Matematiksel Model

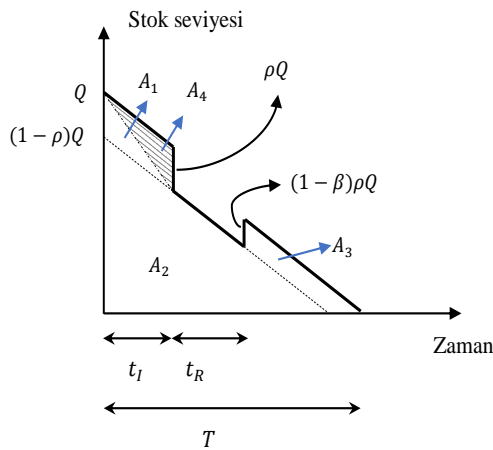
Bu bölümde, iki aşamalı tedarik zinciri sistemi için bir matematiksel model formüle edilmektedir. Perakendecinin stok seviyesinin zamana göre değişimi Şekil 2'de gösterilmektedir. Perakendeci, her T zaman periyodunda Q büyüklüğünde bir parti teslim almaktadır. Teslim alınan her partide iyi kaliteli ürünlerle birlikte kusurlu ürünler (ρ oranında) de bulunduğu için perakendeci her bir partiyi teslim alır almaz kalite kontrol sürecinden geçirmektedir. Tarama süresince (t_I) hem talep karşılanmaktadır hem de kusurlu ürünler ayrılmaktadır. t_I ($t_I = Q/X$) zaman periyodu sonunda belirlenen kusurlu ürünler (ρQ birim) stoktan çıkarılmaktadır. Kusurlu ürünlerden bir kısmı ($\beta\rho Q$ birim) geri dönüşüm/yeniden üretim işlemi için üreticiye gönderilirken, diğer kısmı ($(1 - \beta)\rho Q$ birim) tamir edilmek üzere tamir merkezine gönderilmektedir. Tamir edilen ürünler, eldeki iyi kaliteli ürünler tükenmeden t_R zaman periyodu sonunda teslim alınmaktadır ve stoğa eklenmektedir. Yani, $t_I + t_R \leq T$ koşulu sağlanmalıdır. t_R zaman periyodu, kusurlu ürünlerin tamir $((1 - \beta)\rho Q)/R$ ve taşıma (t_T , perakendeci \Rightarrow tamir merkezi) sürelerini içermektedir. Bu durumda, $t_R = (1 - \beta)\rho Q/R + t_T$ 'dir. Talep sadece iyi kaliteli ürünlerden karşılandığı için, her bir partideki (Q birim) iyi kaliteli ürün sayısı o parti içindeki iyi kaliteli ürünler ile tamir edilen ürünler toplamıdır ve $(1 - \rho)Q + (1 - \beta)\rho Q = (1 - \beta\rho)Q$ birimdir. Dolayısıyla, perakendecinin çevrim süresi (T) aşağıdaki gibidir.

$$T = \frac{(1-\beta\rho)Q}{D} \quad (1)$$

Diğer taraftan, tarama süresi (t_I) boyunca stoksuz kalmamak için her bir partideki (Q birim) iyi kaliteli ürün sayısının $((1 - \beta\rho)Q)$, tarama süresindeki talep miktarına (Dt_I) eşit ya da daha fazla olması gerekmektedir. Yani,

$$\begin{aligned} (1 - \beta\rho)Q &\geq Dt_I \text{ ya da} \\ \beta\rho &\leq 1 - D/X \end{aligned} \quad (2)$$

eşitsizliği sağlanmalıdır.



Şekil 2. Perakendecinin Stok Seviyesinin Zamana Göre Değişimi

Perakendecinin çevrim başına toplam maliyeti (TM), sipariş verme (S_p/n), taşıma (F_p), tarama (dQ), stokta tutma, tamir ve karbon emisyonu maliyetleri toplamından oluşmaktadır. Perakendecinin stokta tutma maliyeti, teslim aldığı her bir partideki (Q birim) iyi kaliteli ürünler ile tamir edilen ürünlerin stokta tutulmasından kaynaklanmaktadır. İyi kaliteli ürünler için birim stokta tutma maliyeti h_p ve tamir edilerek eldeki stoğa katılan ürünler için birim stokta tutma maliyeti h_R 'dir. Stokta tutma maliyeti, toplam stok miktarının (A_1, A_2 ve A_3 alanlarının toplamı) birim stok maliyetiyle çarpımından hesaplanmaktadır. Buradan, perakendecinin çevrim başına stokta tutma maliyeti (HCP) aşağıdaki gibidir.

$$\begin{aligned}
 HCP &= h_p(A_1 + A_2) + h_R(A_3) = h_p \left(\frac{(\rho Q)t_I}{2} + \frac{(1-\rho)Q \left(\frac{(1-\rho)Q}{D} \right)}{2} \right) \\
 &+ h_R \left((T - (t_I + t_R))(1-\beta)\rho Q - \frac{(1-\beta)\rho Q \left(\frac{(1-\beta)\rho Q}{D} \right)}{2} \right) \\
 &= h_p \left(\frac{\rho Q^2}{2X} + \frac{(1-\rho)^2 Q^2}{2D} \right) + h_R \left(\frac{(1-\beta)(1-\beta\rho)\rho Q^2}{D} - \frac{(1-\beta)\rho Q^2}{X} \right. \\
 &\quad \left. - \frac{(1-\beta)^2 \rho^2 Q^2}{R} - t_T(1-\beta)\rho Q - \frac{(1-\beta)^2 \rho^2 Q^2}{2D} \right). \quad (3)
 \end{aligned}$$

Perakendecinin tamir maliyeti, tarama işlemi sonunda kusurlu ürünlerden $(1-\beta)\rho Q$ biriminin tamir merkezine gönderilmesinden kaynaklanmaktadır. Tamir merkezindeki maliyetler şu şekildedir: tamir hazırlık maliyeti (S), sabit taşıma maliyeti (A) (perakendeci \Rightarrow tamir merkezi), birim taşıma maliyeti (c_T), malzeme ve işçilik birim maliyeti (c_1), bir birim ürünü bir birim zaman stokta tutma maliyeti h' , sabit karbon emisyon maliyeti K_T ve değişken emisyon maliyeti L_T 'dir. Buradan $(1-\beta)\rho Q$ birim kusurlu ürünün tamir maliyeti $S + 2A + 2K_T + (1-\beta)\rho Q(c_1 + 2c_T + 2L_T + h't_R)$ olmaktadır. Buradan, m kâr oranı ve c_R birim tamir maliyeti olmak üzere, perakendecinin bir birim kusurlu ürünü tamir ettirmek için katlandığı maliyet $c_R = (1+m)(S + 2A + 2K_T)/(1-\beta)\rho Q + c_1 + 2c_T + 2L_T + h't_R$ 'dir. Bu durumda, perakendecinin çevrim başına tamir maliyeti $c_R(1-\beta)\rho Q$ olmaktadır.

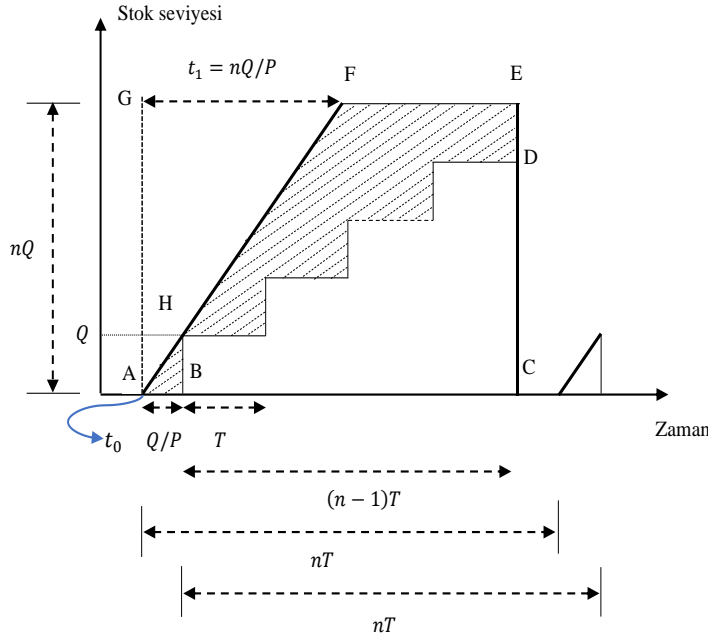
Perakendecinin karbon emisyonu maliyeti, teslim alınan her bir partinin (Q birim) taşınmasından kaynaklanmaktadır. Sabit (K_p) ve değişken (L_p) emisyon maliyetleri için perakendecinin çevrim başına emisyon maliyeti $K_p + L_p Q$ 'dir.

Tüm maliyetler dikkate alındığında, perakendecinin çevrim başına toplam maliyeti (TMP) aşağıdaki gibidir.

$$\begin{aligned}
 TMP &= \frac{S_p}{n} + F_p + dQ + c_R(1-\beta)\rho Q + K_p + L_p Q + h_p \left(\frac{\rho Q^2}{2X} + \frac{(1-\rho)^2 Q^2}{2D} \right) \\
 &+ h_R \left(\frac{(1-\beta)(1-\beta\rho)\rho Q^2}{D} - \frac{(1-\beta)\rho Q^2}{X} - \frac{(1-\beta)^2 \rho^2 Q^2}{R} - t_T(1-\beta)\rho Q - \frac{(1-\beta)^2 \rho^2 Q^2}{2D} \right) \\
 &= \frac{S_p}{n} + F_p + K_p + (1+m)(S + 2A + 2K_T) + [d + L_p \\
 &\quad + ((1+m)(c_1 + 2c_T + 2L_T) + ((1+m)h' - h_R)t_T)(1-\beta)\rho] Q \\
 &+ \left[\frac{(1+m)h'(1-\beta)^2 \rho^2}{R} + h_p \left(\frac{\rho}{2X} + \frac{(1-\rho)^2}{2D} \right) - h_R \left(\frac{(1-\beta)\rho}{X} + (1-\beta)^2 \rho^2 \left(\frac{1}{R} + \frac{1}{2D} \right) \right) \right] Q^2 \\
 &\quad + \frac{h_R(1-\beta)(1-\beta\rho)\rho Q^2}{D}. \quad (4)
 \end{aligned}$$

Perakendecinin birim zamandaki toplam maliyeti ($TMUP$), çevrim başına toplam maliyetin (TMP) çevrim süresine (T) oranlanmasıyla aşağıdaki gibi elde edilir.

$$\begin{aligned}
TMUP = \frac{TMP}{T} = & \frac{\left(\frac{S_P}{n} + F_P + K_P + (1+m)(S+2A+2K_T)\right)D}{(1-\beta\rho)Q} \\
& + \frac{[d+L_P + ((1+m)(c_1+2c_T+2L_T) + ((1+m)h'-h_R)t_T)(1-\beta\rho)]D}{(1-\beta\rho)} + h_R(1-\beta)\rho Q \\
& + \left[\frac{(1+m)h'(1-\beta)^2\rho^2}{R} + h_P \left(\frac{\rho}{2X} + \frac{(1-\rho)^2}{2D} \right) \right. \\
& \left. - h_R \left(\frac{(1-\beta)\rho}{X} + (1-\beta)^2\rho^2 \left(\frac{1}{R} + \frac{1}{2D} \right) \right) \right] \frac{DQ}{(1-\beta\rho)}. \quad (5)
\end{aligned}$$



Şekil 3. Üreticinin Stok Seviyesinin Zamana Göre Değişimi

Üretici, t_1 ($t_1 = nQ/P$) zaman periyodunda nQ büyüklüğünde bir partiyi üretmektedir ve nT zaman periyodunda da bu partiyi tüketmektedir. Üretici, t_0 anında üretime başlamaktadır. İlk partiyi (Q birim) ürettikten sonra perakendeciye teslim etmekte ve stok seviyesi sıfıra düşmektedir. Geri kalan $(n-1)Q$ birim ürünün üretimi tamamlanincaya kadar üretime devam etmektedir ve her T ($T = (1-\beta\rho)Q/D$) zaman periyodunda perakendeciye Q birim ürün teslim etmektedir. Üreticinin stoksuz kalmaması için her bir partinin üretim süresinin ilgili partinin tüketim süresinden az olması gerekmektedir. Yani, $Q/P < (1-\beta\rho)Q/D$ ya da $P > D/(1-\beta\rho)$ eşitsizliği sağlanmalıdır. Üretici, nQ birim büyüklüğündeki partinin üretimini tamamladıktan sonra üretime ara vermektedir ve bir sonraki üretim başlangıcına kadar ki süre içerisinde sadece talebi karşılamaktadır. Üretici, üretime başladığı andan bir sonraki üretime başladığı ana kadar ki süre olan çevrim süresi (nT) içerisinde perakendeciye n -tane teslimat gerçekleştirmektedir.

Üreticinin çevrim başına toplam maliyeti (TM), üretime hazırlık maliyeti (S_U), kusurlu ürünlerin tekrar işletmeye taşınması maliyeti, geri dönüşüm/yeniden üretim maliyeti, karbon emisyonu maliyeti ve stokta tutma maliyeti toplamlarından

oluşmaktadır. Toplam maliyeti oluşturan her bir maliyet bileşeni aşağıda elde edilmektedir. Üretici için çevrim başına stokta tutma maliyeti toplam stok miktarının birim stok maliyetiyle çarpımından elde edilir. Üreticinin üretim sırasındaki toplam stok miktarı, sistemdeki toplam stoktan (ACEF dörtgenin alanı) perakendeciye gönderilen stok miktarının (BCDH bölgesinin alanı) çıkarılmasıyla elde edilir. Dolayısıyla üreticinin toplam stok miktarı, ABH üçgeni ile DEFH bölgesinin alanları toplamından oluşmaktadır. ACEF dörtgenin alanı, ACEG dikdörtgeninin alanından AFG üçgeninin alanının çıkarılmasıyla elde edilir ve aşağıdaki gibidir.

$$\begin{aligned} \text{Alan ACEF} &= \text{Alan ACEG} - \text{Alan AFG} \\ &= \left(\frac{Q}{P} + (n-1)T\right)(nQ) - \frac{\left(\frac{nQ}{P}\right)(nQ)}{2} \\ &= nQ \left(\frac{Q}{P} + (n-1)\frac{(1-\beta\rho)Q}{D}\right) - \frac{n^2Q^2}{2P}. \end{aligned} \quad (6)$$

BCDH bölgesinin alanı aşağıdaki gibidir.

$$\begin{aligned} \text{Alan BCDH} &= Q[(n-1)T] + Q[(n-2)T] + \dots + QT \\ &= T(Q + \dots + (n-2)Q + (n-1)Q) \\ &= \left(\frac{(1-\beta\rho)Q}{D}\right)\left(\frac{(n-1)nQ}{2}\right) = \frac{(1-\beta\rho)(n-1)nQ^2}{2D}. \end{aligned} \quad (7)$$

Buradan, üreticinin toplam stok miktarı (Alan ABH + Alan DEFH) aşağıdaki gibidir.

$$\begin{aligned} \text{Alan ABH} + \text{Alan DEFH} &= \text{Alan ACEF} - \text{Alan BCDH} \\ &= nQ \left(\frac{Q}{P} + (n-1)\frac{(1-\beta\rho)Q}{D}\right) - \frac{n^2Q^2}{2P} - \frac{(1-\beta\rho)(n-1)nQ^2}{2D} \\ &= nQ^2 \left[\frac{1}{P} \left(1 - \frac{n}{2}\right) + \frac{(1-\beta\rho)(n-1)}{2D}\right]. \end{aligned} \quad (8)$$

Üreticinin üretim çevrim başına stokta tutma maliyeti (HC) aşağıdaki gibidir.

$$HC = h_U \left\{ nQ^2 \left[\frac{1}{P} \left(1 - \frac{n}{2}\right) + \frac{(1-\beta\rho)(n-1)}{2D} \right] \right\}. \quad (9)$$

Üretici, aynı zamanda perakendecideki kusurlu ürünlerin de stokta tutulmasından dolayı ortaya çıkan maliyete katlanmaktadır. Şekil 1'den kusurlu ürünleri stokta tutmanın maliyeti, toplam stok miktarının (A_4 alanı) birim stokta tutma maliyeti (h_p) ile çarpımıdır ve n -tane parti için aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$\begin{aligned} HCK &= n[h_p(A_4)] = n \left[h_p \left(\frac{(\rho Q)t_1}{2} \right) \right] \\ &= n \left[h_p \left(\frac{\rho Q}{2} \left(\frac{Q}{X} \right) \right) \right] = h_p \left(\frac{\rho n Q^2}{2X} \right). \end{aligned} \quad (10)$$

Sonuç olarak, üreticinin çevrim başına toplam stokta tutma maliyeti, üretim çevrim başına stokta tutma maliyeti ile kusurlu ürünler için stokta tutma maliyeti toplamıdır ve aşağıdaki gibi elde edilir.

$$\begin{aligned} HCT &= HC + HCK \\ &= h_U \left\{ nQ^2 \left[\frac{1}{P} \left(1 - \frac{n}{2}\right) + \frac{(1-\beta\rho)(n-1)}{2D} \right] \right\} + h_p \left(\frac{\rho n Q^2}{2X} \right). \end{aligned} \quad (11)$$

Üreticinin taşıma maliyeti, perakendecinin teslim aldığı her bir partiyi tarama işleminden sonra belirlediği kusurlu ürünlerden $\beta\rho Q$ birimini tekrar üreticiye göndermesinden kaynaklanmaktadır. Üretici, her bir partiyi üretim çevrim süresi içerisinde perakendeciye n -tane gönderi yaparak teslim etmektedir. Bu durumda, sabit

(F_U) ve değişken (C_U) taşıma maliyetleri için üreticinin çevrim başına taşıma maliyeti $n(F_U + C_U(\beta\rho Q))$ 'dir. Benzer olarak, C_P , birim üretim maliyeti olmak üzere üreticinin çevrim başına geri dönüşüm/yeniden üretim maliyeti $n(C_P(\beta\rho Q))$ 'dir.

Üreticinin karbon emisyonu maliyeti, kusurlu ürünlerin $\beta\rho Q$ biriminin perakendecinin tarama işlemi sonrasında tekrar işletmeye taşınmasından kaynaklanmaktadır. Üretici her bir üretim çevriminde perakendeciye n -tane parti gönderdiğinden, sabit (K_U) ve değişken (L_U) emisyon maliyetleri için üreticinin çevrim başına emisyon maliyeti $n(K_U + L_U(\beta\rho Q))$ 'dir.

Bu durumda, üreticinin çevrim başına toplam maliyeti (TM) aşağıdaki gibidir.

$$TM = S_U + n(C_P(\beta\rho Q)) + n(F_U + C_U(\beta\rho Q)) + n(K_U + L_U(\beta\rho Q)) + h_U \left(nQ^2 \left[\frac{1}{P} \left(1 - \frac{n}{2} \right) + \frac{(1-\beta\rho)(n-1)}{2D} \right] \right) + h_P \left(\frac{\rho n Q^2}{2X} \right). \quad (12)$$

Üreticinin birim zamandaki toplam maliyeti (TMU) , çevrim başına toplam maliyetin (TM) çevrim süresine (nT) oranlanmasıyla aşağıdaki gibi elde edilir.

$$TMU = \frac{TM}{nT} = \frac{S_U D}{(1-\beta\rho)nQ} + \frac{(F_U + K_U)D}{(1-\beta\rho)Q} + \frac{(C_P + C_U + L_U)\beta\rho D}{1-\beta\rho} + \frac{h_U D Q}{(1-\beta\rho)P} \left(1 - \frac{n}{2} \right) + \frac{h_U(n-1)Q}{2} + \frac{h_P D \rho Q}{2(1-\beta\rho)X}. \quad (13)$$

Tedarik zinciri sisteminin birim zamandaki toplam maliyeti $(TMUS)$, perakendecinin birim zamandaki maliyeti $(TMUP)$ ile üreticinin birim zamandaki maliyeti (TMU) toplamıdır ve aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$TMUS = TMU + TMUP = \frac{[(C_P + C_U + L_U)\beta\rho + d + L_P + (1+m)(c_1 + 2c_T + 2L_T) + (1+m)h' - h_R]t_T(1-\beta)\rho}{1-\beta\rho} D + \frac{\left(\frac{1}{n}(S_U + S_P) + F_U + K_U + F_P + K_P + (1+m)(S + 2A + 2K_T) \right) D}{(1-\beta\rho)Q} + \frac{h_U D Q}{(1-\beta\rho)P} \left(1 - \frac{n}{2} \right) + \frac{h_U(n-1)Q}{2} + \frac{h_P D \rho Q}{2(1-\beta\rho)X} + h_R(1-\beta)\rho Q + \left[\frac{(1+m)h'(1-\beta)^2\rho^2}{R} + h_P \left(\frac{\rho}{2X} + \frac{(1-\rho)^2}{2D} \right) - h_R \left(\frac{(1-\beta)\rho}{X} + (1-\beta)^2\rho^2 \left(\frac{1}{R} + \frac{1}{2D} \right) \right) \right] \frac{DQ}{(1-\beta\rho)}. \quad (14)$$

Amaç, birim zamandaki toplam maliyet fonksiyonunu $(TMUS)$ enküçükleyecek parti büyüklüğünü (Q) ve parti sayısını (n) belirlemektir. Bunun için önce $TMUS$ fonksiyonunun Q ve n değişkenlerine göre konveks olduğu gösterilmelidir. $TMUS$ fonksiyonunun Q değişkenine göre birinci ve ikinci mertebeden kısmi türevleri sırasıyla aşağıdaki gibidir.

$$\frac{\partial TMUS}{\partial Q} = - \frac{\left(\frac{1}{n}(S_U + S_P) + F_U + K_U + F_P + K_P + (1+m)(S + 2A + 2K_T) \right) D}{(1-\beta\rho)Q^2} + \frac{h_U D}{(1-\beta\rho)P} \left(1 - \frac{n}{2} \right) + \frac{h_U(n-1)}{2} + \frac{h_P D \rho}{2(1-\beta\rho)X} + h_R(1-\beta)\rho + \left[\frac{(1+m)h'(1-\beta)^2\rho^2}{R} + h_P \left(\frac{\rho}{2X} + \frac{(1-\rho)^2}{2D} \right) - h_R \left(\frac{(1-\beta)\rho}{X} + (1-\beta)^2\rho^2 \left(\frac{1}{R} + \frac{1}{2D} \right) \right) \right] \frac{D}{(1-\beta\rho)}, \quad (15)$$

ve

$$\frac{\partial^2 TMUS}{\partial Q^2} = \frac{2D \left(\frac{1}{n}(S_U + S_P) + F_U + K_U + F_P + K_P + (1+m)(S + 2A + 2K_T) \right)}{(1-\beta\rho)Q^3}. \quad (16)$$

Son eşitlikte, tüm parametreler pozitif olduğu için $TMUS$ fonksiyonunun Q değişkenine göre ikinci mertebeden türevi pozitifdir, yani $\partial^2 TMUS / \partial Q^2 > 0$ 'dır. Bu durumda, parti sayısının (n) pozitif tamsayı değerleri için $TMUS$ fonksiyonu Q değişkenine göre konvektir.

$TMUS$ fonksiyonunun n değişkenine göre birinci ve ikinci mertebeden kısmi türevleri sırasıyla aşağıdaki gibidir.

$$\frac{\partial TMUS}{\partial n} = - \frac{(S_U + S_P)D}{(1-\beta\rho)n^2 Q} - \frac{h_U D Q}{2P(1-\beta\rho)} + \frac{h_U Q}{2}, \quad (17)$$

ve

$$\frac{\partial^2 TMUS}{\partial n^2} = \frac{2D(S_U + S_P)}{(1-\beta\rho)n^3 Q}. \quad (18)$$

Benzer olarak, son eşitlikte tüm parametreler pozitif olduğu için $TMUS$ fonksiyonunun n değişkenine göre ikinci mertebeden türevi pozitifdir, yani $\partial^2 TMUS / \partial n^2 > 0$ 'dır. Bu durumda, parti büyüklüğünün (Q) sabit değerleri için $TMUS$ fonksiyonu n değişkenine göre konvektir.

Optimal parti büyüklüğü (Q), $TMUS$ fonksiyonunun Q değişkenine göre birinci mertebeden kısmi türevinin sifıra eşitlenmesiyle aşağıdaki gibidir.

$$Q = \frac{\left(\frac{1}{n}(S_U + S_P) + F_U + K_U + F_P + K_P + (1+m)(S + 2A + 2K_T) \right) D}{\sqrt{\left\{ \begin{aligned} & \frac{1-\beta\rho}{(1-\beta\rho)P} \left(1 - \frac{n}{2} \right) + \frac{h_U(n-1)}{2} + \frac{h_P D \rho}{2(1-\beta\rho)X} + h_R(1-\beta)\rho \\ & + \left[\frac{(1+m)h'(1-\beta)^2 \rho^2}{R} + h_P \left(\frac{\rho}{2X} + \frac{(1-\rho)^2}{2D} \right) \right] \\ & - h_R \left(\frac{(1-\beta)\rho}{X} + (1-\beta)^2 \rho^2 \left(\frac{1}{R} + \frac{1}{2D} \right) \right) \right\} \frac{D}{(1-\beta\rho)}}. \quad (19)$$

Optimal parti sayısını (n) bulmak için önce Eşitlik (19)'deki Q ifadesi Eşitlik (14)'teki $TMUS$ fonksiyonunda yerine yazılır ve biraz düzenleme yapılırsa aşağıdaki ifade elde edilir.

$$TMUS(n) = \frac{[(C_P + C_U + L_U)\beta\rho + d + L_P + ((1+m)(c_1 + 2c_T + 2L_T) + ((1+m)h' - h_R)t_T)(1-\beta)\rho]D}{(1-\beta\rho)} + 2\sqrt{V_1 V_2}. \quad (20)$$

Burada, V_1 ve V_2 sırasıyla aşağıdaki gibidir.

$$V_1 = \frac{\left(\frac{1}{n}(S_U + S_P) + F_U + K_U + F_P + K_P + (1+m)(S + 2A + 2K_T) \right) D}{(1-\beta\rho)},$$

$$V_2 = \frac{h_U D}{(1-\beta\rho)P} \left(1 - \frac{n}{2} \right) + \frac{h_U(n-1)}{2} + \frac{h_P D \rho}{2(1-\beta\rho)X} + h_R(1-\beta)\rho$$

$$+ \left[\frac{(1+m)h'(1-\beta)^2 \rho^2}{R} + h_P \left(\frac{\rho}{2X} + \frac{(1-\rho)^2}{2D} \right) \right]$$

$$-h_R \left(\frac{(1-\beta)\rho}{X} + (1-\beta)^2 \rho^2 \left(\frac{1}{R} + \frac{1}{2D} \right) \right) \left] \frac{D}{(1-\beta\rho)} \right. \quad (21)$$

Optimal parti sayısı (n), $TMUS(n)$ fonksiyonunun n değişkenine göre birinci mertebeden türevinin sifıra eşitlenmesiyle ($dTMUS(n)/dn = 0$) aşağıdaki gibi elde edilir.

$$n = \sqrt{\frac{2(S_U+S_P)V_3}{h_U(F_U+K_U+F_P+K_P+(1+m)(S+2A+2K_T))\left(1-\frac{D}{(1-\beta\rho)P}\right)}} \quad (22)$$

Burada, V_3 aşağıdaki gibidir.

$$V_3 = \frac{h_U D}{(1-\beta\rho)P} - \frac{h_U}{2} + \frac{h_P D \rho}{2(1-\beta\rho)X} + h_R(1-\beta)\rho + \left[\frac{(1+m)h'(1-\beta)^2 \rho^2}{R} + h_P \left(\frac{\rho}{2X} + \frac{(1-\rho)^2}{2D} \right) - h_R \left(\frac{(1-\beta)\rho}{X} + (1-\beta)^2 \rho^2 \left(\frac{1}{R} + \frac{1}{2D} \right) \right) \right] \frac{D}{(1-\beta\rho)}.$$

Optimal parti sayısı (n) pozitif tamsayı değerler alan bir değişkendir. Tüm parametreler Eşitlik (22)'de yerine yazıldığında parti sayısı için bir tamsayı değeri elde edilmezse sırasıyla $n = \lfloor n \rfloor$ ($\lfloor n \rfloor$: n den büyük olmayan en büyük tamsayı değeri) ve $n = \lceil n \rceil$ ($\lceil n \rceil$: n den büyük olan en küçük tamsayı değeri) için Eşitlik (19)'dan Q değerleri elde edilir. n ve Q 'nün bu değerleri ($(\lfloor n \rfloor, Q)$ ve $(\lceil n \rceil, Q)$) tedarik zinciri sisteminin birim zamandaki toplam maliyetinde ($TMUS(n, Q)$) yerlerine yazılır ve minimum maliyeti veren n , optimal parti sayısı olarak belirlenir. Buradan, optimal üretim/sipariş miktarı (nQ), optimal parti sayısı ve parti büyüklüğünden elde edilir.

5. Sayısal Analiz

Bu bölümde, geliştirilen modelin işleyişini göstermek amacıyla sayısal bir örnek verilmektedir. Duyarlılık analizi yardımıyla model parametrelerinin optimal sonuçlar üzerindeki etkisi incelenmektedir. Wahab vd. (2011) ve Jaber vd. (2014) tarafından yapılan çalışmalardan alınan ve bu modelde ortaya çıkan yeni parametre değerleri aşağıdaki gibidir: talep miktarı $D = 50000$ birim/yıl, üretim miktarı $P = 160000$ birim/yıl, tamir miktarı $R = 50000$ birim/yıl, tarama miktarı $X = 175200$ birim/yıl, üreticinin hazırlık maliyeti $S_U = 300$ \$/hazırlık, üreticinin birim üretim maliyeti $C_P = 110$ \$/birim, birim stokta tutma maliyeti $h_U = 2$ \$/birim/yıl, sabit taşıma maliyeti $F_U = 19$ \$/, birim taşıma maliyeti $C_U = 1$ \$/birim, sabit emisyon maliyeti $K_U = 2.95$ (100/33.94) \$, birim emisyon maliyeti $L_U = 0.29$ (10/33.94) \$, perakendecinin sipariş maliyeti $S_P = 100$ \$/sipariş, sabit taşıma maliyeti $F_P = 25$ \$/parti, birim stokta tutma maliyeti $h_P = 5$ \$/birim/yıl, tamir edilen ürünler için birim stokta tutma maliyeti $h_R = 6$ \$/birim/yıl, birim tarama maliyeti $d = 0.5$ \$/birim, sabit emisyon maliyeti $K_P = 4$ \$, birim emisyon maliyeti $L_P = 0.5$ \$, kar oranı $m = 0.20$, tamir için gerekli hazırlık maliyeti $S = 100$ \$, taşıma maliyeti $A = 200$ \$, birim işçilik ve malzeme maliyeti $c_1 = 5$ \$/birim, birim taşıma maliyeti $c_T = 2$ \$/birim, birim stokta tutma maliyeti $h' = 4$ \$/birim/yıl, sabit emisyon maliyeti $K_T = 4$ \$, birim emisyon maliyeti $L_T = 0.5$ \$. Kusurlu ürün oranı $\rho = 0.02$ ve kusurlu ürünler içindeki yeniden üretime gönderilen ürün oranı $\beta = 0.8$ 'dir. Ayrıca, $\beta\rho = 0.016$, $1 - D/X = 0.714612$ ve $D/(1 - \beta\rho) = 50813.01$ için $\beta\rho \leq 1 - D/X$ ve $P > D/(1 - \beta\rho)$ koşulları sağlandığından, problemin olurlu bir çözümü vardır.

Geliştirilen modeldeki amaç, sistemin toplam maliyetini enküçükleyecek şekilde optimal parti sayısı ve parti büyüklüğünün (n^* , Q^*) belirlenmesidir. Modelin optimum

çözümü aşağıdaki gibi elde edilir. Parametre değerleri Eşitlik (22)'de yerine yazılırsa, parti sayısı $n = 1.371901$ olarak hesaplanır. Parti sayısının tamsayı olduğu dikkate alındığında $n = \lfloor n \rfloor = 1$ ve $n = \lceil n \rceil = 2$ değerleri sırasıyla Eşitlik (19)'da yazılırsa parti büyüklüğü için $Q = 4384$ birim ve $Q = 3542$ birim elde edilir. Bu durumda, Eşitlik (14)'ten $TMUS(1,4384) = 168312.1 < TMUS(2,3542) = 168421.68$ olarak hesaplanır. Sonuç olarak, geliştirilen model için elde edilen sonuçlar aşağıdaki gibidir: optimal parti sayısı $n^* = 1$, optimal parti büyüklüğü $Q^* = 4384$ birim ve tedarik zinciri sisteminin yıllık toplam maliyeti $TMUS = 168312.08$ \$'dir. Perakendeci için birim tamir maliyeti ise $c_R = 46.81$ \$'dir.

Tablo 1. Farklı Modeller için Optimal Sonuçlar

Model	n (parti sayısı)	Q (parti büyüklüğü)	Sipariş miktarı	Toplam maliyet
Temel model	5	1070	5351	150597.22
Temel model + çevresel duyarlılık	5	1100	5499	176730.12
Temel model + tamir	1	4350	4350	142234.07
Geliştirilen model (Temel model + çevresel duyarlılık + tamir)	1	4384	4384	168312.82

Kusurlu ürünlerin tamiri ve çevresel faktörlerin birlikte etkisinin ihmal edildiği model (Temel model) için aşağıdaki sonuçlar elde edilir: optimal parti sayısı $n^* = 5$, optimal parti büyüklüğü $Q^* = 1070$ birim ve tedarik zinciri sisteminin yıllık toplam maliyeti $TMUS = 150597.22$ \$'dir. Kusurlu ürünlerin tamir işleminin ihmal edildiği model (Temel model + çevresel duyarlılık) için elde edilen sonuçlar aşağıdaki gibidir: optimal parti sayısı $n^* = 5$, optimal parti büyüklüğü $Q^* = 1100$ birim ve tedarik zinciri sisteminin yıllık toplam maliyeti $TMUS = 176730.12$ \$'dir. Karbon emisyonu maliyetlerinin ihmal edildiği model (Temel model + tamir) için aşağıdaki sonuçlar elde edilir: optimal parti sayısı $n^* = 1$, optimal parti büyüklüğü $Q^* = 4350$ birim ve tedarik zinciri sisteminin yıllık toplam maliyeti $TMUS = 142234.07$ \$'dir. Ayrıca, sadece tamir işleminden kaynaklanan karbon emisyonu maliyeti 355.79 \$ olarak hesaplanmaktadır.

Geliştirilen model ve üç özel durum için elde edilen sonuçlar Tablo 1'de özetlenmiştir. Tablo 1'den, tamir işlemi ve karbon emisyonu ile ilgili maliyetleri birlikte dikkate alan modeldeki (Geliştirilen model) parti sayısı (n) ve sipariş miktarı (nQ), bu iki maliyet kaleminin birlikte ihmal edildiği modele (Temel model) göre azalırken tedarik zinciri sisteminin toplam maliyeti %11.76 oranında artmaktadır. Sadece çevresel duyarlılığın dikkate alındığı modeldeki sipariş miktarı (nQ) maksimum seviyede olurken, sadece tamir işleminin dikkate alındığı modeldeki sipariş miktarı (nQ) minimum seviyededir. Bunun nedeni, kusurlu ürünlerden bir kısmının tamir edilerek tekrar eldeki stoğa eklenmesiyle talebin karşılanması sipariş miktarının (nQ) azalmasına neden olmasıdır. Sadece tamir işleminin dikkate alındığı model, sadece karbon emisyonunun dikkate alındığı modele göre maliyet tasarrufu sağlamaktadır. Bununla birlikte, sadece tamir işlemiyle ortaya çıkan emisyon maliyetinin de oldukça az olduğu (355.79 \$) dikkate alındığında, tamir edilecek ürün oranının $(1 - \beta)$ artırılmasıyla (örneğin, 0.2'den 0.5'e çıkarılmasıyla) tamir ve karbon emisyonu maliyetlerinin birlikte etkisini dikkate alan modelin (Geliştirilen model, yeni toplam maliyet=137312.72 \$) her iki maliyet kaleminin birlikte etkisini ihmal eden modele (Temel model) göre görece olarak daha avantajlı olmasını sağlayabilir.

Tamir edilecek ürün oranındaki $(1 - \beta)$, bir diğer ifadeyle üreticiye gönderilecek ürün oranındaki (β) değişimlerin optimal parti sayısı (n), parti büyüklüğü (Q), sipariş miktarı (nQ) ve beklenen yıllık toplam maliyet üzerindeki etkisi Tablo 2'de

verilmektedir. Ayrıca, Geliştirilen model ile Temel model maliyetleri arasındaki değişimin oransal farkına da tabloda yer verilmektedir.

Tablo 2. Tamir Edilen Ürün Oranındaki Değişimin Optimal Sonuçlar Üzerindeki Etkisi

Model	Tamir edilen ürün oranındaki ($1 - \beta$) değişim						
	0.995	0.95	0.9	0.7	0.5	0.3	
	n	1	1	1	1	1	
Geliştirilen model	Q	4332	4332	4338	4351	4364	4377
	nQ	4332	4332	4338	4351	4364	4377
	Maliyet	86976.06	91510.88	96559.17	116853.93	137312.72	157937.52
Oransal fark		-48.32	-45.63	-42.63	-30.57	-18.42	-6.16
	n	1	1	1	1	1	1
	Q	4298	4301	4304	4317	4330	4343
Temel model + tamir	nQ	4298	4301	4304	4317	4330	4343
	Maliyet	60586.20	65138.37	70205.97	90578.35	111115.39	131819.09

Tablo 2'den, tamir edilecek ürün oranı arttığında her iki modelde de toplam maliyet azalmaktadır. Tamir edilecek ürün oranı 0.20 (%20)'den 0.50 (%50)'e çıktığında, Geliştirilen modeldeki toplam maliyet 168312.8 \$'dan 137312.72 \$'a düşmekte ve toplam maliyette yaklaşık olarak %18.42 oranında bir azalma olmaktadır. Bununla birlikte, Geliştirilen modelde birim maliyet 38.39 \$'dan 31.46 \$'a düşerek yaklaşık olarak %18.05 oranında azalmaktadır. Bu sonuçlar, bu çalışmada önerilen ve tamir ve geri dönüşüm/yeniden üretim faaliyetlerinin birlikte programlanmasını dikkate alan modelin, her iki faaliyet kalemlerini de ihmal eden modele (Temel model) göre daha fazla maliyet tasarrufu sağlayarak tedarik zinciri için daha avantajlı olabileceğini göstermektedir. Tamir edilecek ürün oranındaki aynı değişime karşılık sadece tamir işlemini dikkate alan modelde (Temel model + tamir) toplam maliyet yaklaşık olarak %21.88 oranında azalırken, birim maliyet (toplam maliyet/(nQ)) 32.70 \$'dan 25.66 \$'a düşerek %21.52 oranında azalmaktadır. Tamir edilecek ürün oranı 0.5 (%50) olarak kabul edildiğinde, birim maliyet tamir işlemiyle beraber çevresel faktörlerin de dikkate alınmasıyla 25.66 \$'dan 31.46 \$'a yükselmektedir. Bu durum, karbon maliyetlerinin dikkate alınmasının birim maliyette 5.8 \$ (%22.60) artış olabileceğini göstermektedir. Yine Tablo 2'den, tamir edilecek ürün oranı arttığında her iki modelde de parti sayısı değişmezken, sipariş miktarı ve parti büyüklüğü azalmaktadır. Bunun nedeni, üreticiye gönderilecek kusurlu ürün sayısının azalmasıyla talebi karşılamak için daha az sayıda ürün sipariş verilmesidir.

6. Sonuç

Bu çalışmanın amacı, stok yönetiminin daha etkin/verimli bir şekilde yapılmasını sağlayarak yeşil veya çevreye duyarlı tedarik zinciri alanına katkıda bulunmaktır. Ürünlerin taşınmasından kaynaklanan karbon emisyonu maliyetleri ve kusurlu ürünlerin tamiri ve geri dönüşümü/yeniden üretimi varsayımları ile iki aşamalı (üretici-perakendeci) merkezi bir tedarik zinciri modeli önerilmiştir. Üretilen ürünler içerisinde kusurlu (düşük kaliteli) ürünler de bulunmaktadır. Perakendeci teslim aldığı her siparişi kalite kontrol sürecinden geçirmektedir ve kusurlu ürünleri ayırmaktadır. Kusurlu ürünlerin bir kısmı daha iyi durumdadır ve tamir edilebilir özelliktedir. Bu ürünler, perakendeci tarafından yerel bir firmada tamir ettirilerek talebi karşılamak üzere eldeki stoğa eklenmektedir. Kusurlu ürünlerin diğer kısmı ise geri dönüşüm/yeniden üretim sürecine girmek üzere üreticiye gönderilmektedir. Ürünlerin üreticiden perakendeciye ve perakendeciden tamir merkezine taşınması işlemlerinden kaynaklanan karbon emisyonlarının maliyeti modele dahil edilmiştir. Geliştirilen modelin amacı, sistemin toplam maliyetini enküçükleyecek optimal üretim/sipariş ve

taşıma programını belirlemektir. Teorik bir örnek yardımıyla geliştirilen modelin işleyişi gösterilmiştir ve tamir ve / veya çevre duyarlılığının ihmal edildiği özel durumlar için de optimal çözümler elde edilmiştir. Sayısal sonuçlardan, sadece çevresel duyarlılığın dikkate alınmasıyla optimal sipariş ve taşıma politikasının değişmediği, ancak, toplam maliyetin arttığı ve bu artışın %18.34 oranında olduğu görülmüştür. Sadece tamir işleminin modele dahil edilmesiyle de optimal politika önemli ölçüde değişirken, toplam maliyette bir iyileşme (azalma) olduğu ve bu iyileşmenin %5'ten daha fazla olduğu elde edilmiştir. Sayısal analizlerden, geri dönüşüm/yeniden üretim ve tamirin birlikte programlanmasının tedarik zinciri toplam stok maliyetini %6.16-48.32 arasında azalttığı görülmüştür. Kusurlu ürün oranının artmasıyla da geliştirilen modelin daha fazla maliyet tasarrufu sağladığı ve tedarik zinciri sistemi için daha avantajlı olduğu söylenebilir.

Tamir işleminin geri dönüşüm/yeniden üretim işlemiyle birlikte dikkate alınmasının bütünsel üretim stok kontrol politikası parametreleri ve tedarik zinciri toplam stok maliyeti üzerindeki etkisi, bu çalışma sonucunda elde edilen bulgular yardımıyla daha da anlaşılır kılınmıştır. Ancak yine de bu çalışmada bazı kısıtlar bulunmaktadır. Tamir edilmek üzere ayrılan kusurlu ürünlerin tamamının tamir işleminin ardından iyi kalitede olduğu varsayılmıştır. Tamir edilen ürünlerin farklı kalite standartlarında olduğu durumda sonraki çalışmalar yapılabilir. Üretim ve tamir faaliyetleri sonucunda ortaya çıkan karbon emisyonları da modele dahil edilebilir. Talep miktarının bir sabit olduğu yerine, yeşillik seviyesine ve satış fiyatına duyarlı bir değişken olduğunun sistem üzerindeki etkisi araştırılabilir. Ödemelerde gecikme, enflasyon ve paranın zaman değeri, kalite kontrol hataları ve elde stok bulundurmama varsayımlarının da dahil edilmesiyle önerilen model genişletilebilir.

Referanslar

- Ala, D. M., & İkiz, Y. (2015). Dokuma üretimi süresince oluşan kumaş hatalarının belirlenmesine yönelik istatistiksel bir araştırma. *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 21(7), 282-287.
- Aljazzar, S. M., Gurtu, A., & Jaber, M. Y. (2018). Delay-in-payments-A strategy to reduce carbon emissions from supply chains. *Journal of Cleaner Production*, 170, 636-644.
- Bazan, E., Jaber, M. Y., & Zaroni, S. (2017). Carbon emissions and energy effects on a two-level manufacturer-retailer closed-loop supply chain model with remanufacturing subject to different coordination mechanisms. *International Journal of Production Economics*, 183, 394-408.
- Büyüközkan, G., & Vardaloğlu, Z. (2008). Yeşil tedarik zinciri yönetimi. *Lojistik Dergisi*, 8, 66-73.
- Chen, H. Y., Li, A. J., & Finlow, D. E. (2009). The lead and lead-acid battery industries during 2002 and 2007 in China. *Journal of Power Sources*, 191(1), 22-27.
- Chen, T. H. (2017). Optimizing pricing, replenishment and rework decision for imperfect and deteriorating items in a manufacturer-retailer channel. *International Journal of Production Economics*, 183, 539-550.
- Cheng, Y. L., Wang, W. T., Wei, C. C., & Lee, K. L. (2018). An integrated lot-sizing model for imperfect production with multiple disposals of defective items. *Scientia Iranica*, 25(2), 852-867.
- Chiu, C. Y., Yang, M. F., Tang, C. J., & Lin, Y. (2013). Integrated imperfect production inventory model under permissible delay in payments depending

- on the order quantity. *Journal of Industrial & Management Optimization*, 9(4), 945.
- Çoban, O., & Şahbaz Kılınc, N. (2016). Enerji kullanımının çevresel etkilerinin incelenmesi. *Marmara Coğrafya Dergisi*, 33, 589-606.
- Dağ, S. & Kabadayı, N. (2020). ISO 44001 işbirlikçi iş ilişkileri yönetim sistemi standardının tedarik zinciri ortaklık süreçlerine etkisinin değerlendirilmesi. *Beykoz Akademi Dergisi*, 8(2), 60-81.
- Daniel, J. S. R., & Rajendran, C. (2005). A simulation-based genetic algorithm for inventory optimization in a serial supply chain. *International Transactions in Operational Research*, 12(1), 101-127.
- Dey, O., & Giri, B. C. (2014). Optimal vendor investment for reducing defect rate in a vendor-buyer integrated system with imperfect production process. *International Journal of Production Economics*, 155, 222-228.
- Diaz, A., & Fu, M. C. (1997). Models for multi-echelon repairable item inventory systems with limited repair capacity. *European Journal of Operational Research*, 97(3), 480-492.
- Erkök, B. (2018). Türkiye sanayisinin küresel değer zincirine entegrasyonu. *Ankara Üniversitesi SBF Dergisi*, 75(2), 637-666.
- Fanuc. (2020, Haziran 1). FANUC Türkiye tamir merkezi açıldı. Erişim adresi <https://www.fanuczone.com/2020/06/01/fanuc-turkiye-tamir-merkezi-acildi/>.
- Gautam, P., Kishore, A., Khanna, A., & Jaggi, C. K. (2019). Strategic defect management for a sustainable green supply chain. *Journal of Cleaner Production*, 233, 226-241.
- Gersil, A. (2007). Üretim sistemleri ve teknolojilerindeki gelişmelerin ve küreselleşmenin geleneksel maliyet muhasebesine etkileri. *Ankara Üniversitesi SBF Dergisi*, 62(4), 107-123.
- Giri, B. C., Chakraborty, A., & Maiti, T. (2017). Consignment stock policy with unequal shipments and process unreliability for a two-level supply chain. *International Journal of Production Research*, 55(9), 2489-2505.
- Glock, C. H. (2012). The joint economic lot size problem: A review. *International Journal of Production Economics*, 135(2), 671-686.
- Goonatilake, P. C. L. (1984). Inventory control problems in developing countries. *International Journal of Operations & Production Management*, 4(4), 57-64.
- Goonatilake, L. (1990). Inventory management in the manufacturing sector in developing countries. *Engineering Costs and Production Economics*, 19(1-3), 19-24.
- Goyal, S. K. (1976). An integrated inventory model for a single supplier-single customer problem. *International Journal of Production Research*, 15(1), 107-111.
- Guide Jr, V. D. R. (2000). Production planning and control for remanufacturing: industry practice and research needs. *Journal of Operations Management*, 18(4), 467-483.
- Gurtu, A., Jaber, M. Y., & Searcy, C. (2015). Impact of fuel price and emissions on inventory policies. *Applied Mathematical Modelling*, 39(3-4), 1202-1216.
- Güner, E. D., & Turan, E. S. (2017). Yenilenebilir enerji kaynaklarının küresel iklim değişikliği üzerine etkisi. *Doğal Afetler ve Çevre Dergisi*, 3(1), 48-55.
- Harris, F. W. (1990). How many parts to make at once. *Operations Research*, 38(6), 947-950.

- Hill, R. M. (1997). The single-vendor single-buyer integrated production-inventory model with a generalised policy. *European Journal of Operational Research*, 97(3), 493-499.
- Hsu, J. T., & Hsu, L. F. (2013). An integrated vendor-buyer inventory model with imperfect items and planned backorders. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 68(9), 2121-2132.
- Huang, C. K. (2002). An integrated vendor-buyer cooperative inventory model for items with imperfect quality. *Production Planning & Control*, 13(4), 355-361.
- Jaber, M. Y., Glock, C. H., & El Saadany, A. M. (2013). Supply chain coordination with emissions reduction incentives. *International Journal of Production Research*, 51(1), 69-82.
- Jaber, M. Y., Zanoni, S., & Zavanella, L. E. (2014). Economic order quantity models for imperfect items with buy and repair options. *International Journal of Production Economics*, 155, 126-131.
- Jaber, M. Y. ve Zolfaghari, S. (2008). Quantitative models for centralised supply chain coordination. V. Kordic (Ed.). *Supply chains: Theory and applications* içinde (s. 307-338). Vienna, Austria: I-Tech Education and Publishing.
- Jauhari, W. A., Pujawan, I. N., & Suef, M. (2022). Sustainable inventory management with hybrid production system and investment to reduce defects. *Annals of Operations Research*, doi:10.1007/s10479-022-04666-8
- Khan, M., Jaber, M. Y., Zanoni, S., & Zavanella, L. (2016). Vendor managed inventory with consignment stock agreement for a supply chain with defective items. *Applied Mathematical Modelling*, 40(15-16), 7102-7114.
- Kobu, B. (1994). *Üretim yönetimi* (8. Baskı). İstanbul: Avcıol Basım-Yayın.
- Konstantaras, I., Skouri, K., & Benkherouf, L. (2021). Optimizing inventory decisions for a closed-loop supply chain model under a carbon tax regulatory mechanism. *International Journal of Production Economics*, 239, 108185, 1-13.
- Lai, X., Chen, Z., Giri, B. C., & Chiu, C. H. (2015). Two-echelon inventory optimization for imperfect production system under quality competition environment. *Mathematical Problems in Engineering*, 2015.
- Lin, F., Jia, T., Fung, R. Y., & Wu, P. (2021). Impacts of inspection rate on integrated inventory models with defective items considering capacity utilization: Rework-versus delivery-priority. *Computers & Industrial Engineering*, 156, 107245.
- Liu, X., & Cetinkaya, S. (2011). The supplier-buyer integrated production-inventory model with random yield. *International Journal of Production Research*, 49(13), 4043-4061.
- Malleeswaran, B., & Uthayakumar, R. (2022). An integrated vendor-buyer supply chain model for backorder price discount and price-dependent demand using service level constraints and carbon emission cost. *International Journal of Systems Science: Operations & Logistics*, 9(1), 111-120.
- Orak, İ. M., & Çelik, A. (2017). Üretim aşamasında ray ve profilde oluşan kusurlarının tespitine yönelik bir paralel kusur algılama algoritması. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 32(2), 439-448.
- Ouyang, L. Y., Chuang, C. J., Ho, C. H., & Wu, C. W. (2014). An integrated inventory model with quality improvement and two-part credit policy. *Top*, 22(3), 1042-1061.

- Ouyang, L. Y., Wu, K. S., & Ho, C. H. (2006). Analysis of optimal vendor-buyer integrated inventory policy involving defective items. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 29(11), 1232-1245.
- Özkan, Ş. (2012). *Yöneylem araştırması* (3. Baskı). Ankara: Nobel Akademik Yayıncılık.
- Öztürk, H. (2021). A study and comparison of shipment policies with repair options in a two-tier supply chain model. *Engineering Management Journal*, 33(2), 96-125.
- Paksoy, T., Altıparmak, F. (2003). Dağıtım ağlarının tasarımı ve eniyilemesi kapsamında tedarik zinciri ve lojistik yönetimine bir bakış: Son gelişmeler ve genel durum. *YTÜD*, 4, 149-169.
- Plambeck, E. L. (2012). Reducing greenhouse gas emissions through operations and supply chain management. *Energy Economics*, 34, S64-S74.
- Rizky, N., Wangsa, I. D., Jauhari, W. A., & Wee, H. M. (2021). Managing a sustainable integrated inventory model for imperfect production process with type one and type two errors. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 23(9), 2697-2712.
- Rout, C., Paul, A., Kumar, R. S., Chakraborty, D., & Goswami, A. (2020). Cooperative sustainable supply chain for deteriorating item and imperfect production under different carbon emission regulations. *Journal of Cleaner Production*, 272, 122170.
- Salameh, M. K., & Jaber, M. Y. (2000). Economic production quantity model for items with imperfect quality. *International Journal of Production Economics*, 64(1-3), 59-64.
- Sarkar, B., Shaw, B. K., Kim, T., Sarkar, M., & Shin, D. (2017). An integrated inventory model with variable transportation cost, two-stage inspection, and defective items. *Journal of Industrial & Management Optimization*, 13(4), 1975-1990.
- Savaskan, R. C., Bhattacharya, S., & Van Wassenhove, L. N. (2004). Closed-loop supply chain models with product remanufacturing. *Management Science*, 50(2), 239-252.
- Sgarbossa, F., Grosse, E. H., Neumann, W. P., Battini, D., & Glock, C. H. (2020). Human factors in production and logistics systems of the future. *Annual Reviews in Control*, 49, 295-305.
- Sharafali, M., & Co, H. C. (2000). Some models for understanding the cooperation between the supplier and the buyer. *International Journal of Production Research*, 38(15), 3425-3449.
- Singh, R., & Mishra, V. K. (2022). Sustainable integrated inventory model for substitutable deteriorating items considering both transport and industry carbon emissions. *Journal of Systems Science and Systems Engineering*, 1-21.
- Soruşbay, C. (2007). Karayolu ulaşımından kaynaklanan karbondioksit emisyonlarının çevreye etkisi ve kontrolü. *Mühendis ve Makine*, 48(564), 22-26.
- Taft, E. W. (1918). The most economical production lot. *Iron Age*, 101(18), 1410-1412.
- Taleizadeh, A. A., Hazarkhani, B., & Moon, I. (2020). Joint pricing and inventory decisions with carbon emission considerations, partial backordering and planned discounts. *Annals of Operations Research*, 290(1), 95-113.

- Tiwari, S., Daryanto, Y., & Wee, H. M. (2018). Sustainable inventory management with deteriorating and imperfect quality items considering carbon emission. *Journal of Cleaner Production*, 192, 281-292.
- Toktas-Palut, P. (2021). İki kısımlı tarife kontratı ile yeşil endüstri 4.0 tedarik zincirinin koordinasyonu. *International Journal of Advances in Engineering and Pure Sciences*, 33(4), 556-567.
- Udayakumar, R., & Geetha, K. V. (2018). Supply chain coordination with controllable lead time under imperfect production process. *Journal of Intelligent & Fuzzy Systems*, 34(3), 2003-2019.
- Wahab, M. I. M., Mamun, S. M. H., & Ongkunaruk, P. (2011). EOQ models for a coordinated two-level international supply chain considering imperfect items and environmental impact. *International Journal of Production Economics*, 134(1), 151-158.
- Wangsa, I. D., & Wee, H. M. (2019). A vendor-buyer inventory model for defective items with errors in inspection, stochastic lead time and freight cost. *INFOR: Information Systems and Operational Research*, 57(4), 597-622.
- Yıldız, A. (2018). Endüstri 4.0 ve akıllı fabrikalar. *Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 22(2), 546-556.
- Yıldız Çankaya, S. (2015). *Tedarik zinciri yönetimine sürdürülebilirlik perspektifinden bakış ve yeşil uygulamalar* (Yayımlanmamış doktora tezi), Gebze Teknik Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü.
- Yıldıztekin, İ. (2005). Kalite maliyetleri ölçümlerinde belirlenen fırsat maliyetleri. *Atatürk Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Dergisi*, 19(1), 401-422.
- Zanoni, S., Mazzoldi, L., & Jaber, M. Y. (2014). Vendor-managed inventory with consignment stock agreement for single vendor-single buyer under the emission-trading scheme. *International Journal of Production Research*, 52(1), 20-31.