Pamukkale Univ Muh Bilim Derg, 28(1), 128-138, 2022

Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi

Pamukkale University Journal of Engineering Sciences

Madencilikte bir yedek parça envanter optimizasyonu çalışması

A spare parts inventory optimization study in mining

Sena ŞENSES[1], *Onur GÖLBAŞI*[1*], *İsmail Serdar BAKAL*[2]

[1]Maden Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Ankara, Türkiye.
ssenses@metu.edu.tr, golbasi@metu.edu.tr

[2]Endüstri Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Ankara, Türkiye.
isbakal@metu.edu.tr

Geliş Tarihi/Received: 13.10.2020 Düzeltme Tarihi/Revision: 22.04.2021 doi: 10.5505/pajes.2021.46243
Kabul Tarihi/Accepted: 25.04.2021 Araştırma Makalesi/Research Article

Öz

Yedek parça envanter yönetimi, özellikle madencilik gibi makine bazlı seri ve aralıksız üretim sağlamayı hedefleyen sektörler için, minimum maliyetle yüksek ekipman kullanılabilirliğini sürdürmek açısından hayati önem taşımaktadır. Bu çalışmada, Türkiye'nin büyük ölçekli üretim yapan bir madencilik şirketi için, toplam envanter bazlı masrafları en aza indirecek şekilde, optimum sipariş adet ve zamanlarının belirlenmesini sağlayan bir matematiksel modeli kullanılarak, envanter yönetimi probleminin çözümlenmesi amaçlanmıştır. Yapılan çalışma içerisinde, maden şirketinin mevcut envanter sistemi incelenmiş ve elde edilen gerçek veriler ile seri ve sürekli üretim gerektiren mekanize sistemlerin verimliliğinde büyük öneme sahip olan endüstriyel yağlar için bir vaka çalışması yapılmıştır. Yapılan çalışma sonucu, şirketin mevcut endüstriyel yağ envanter politikasının, yıllık 18.566 ₺'ye kadar tasarruf sağlayarak finansal olarak iyileştirilebileceği gözlemlenmiştir.

Anahtar kelimeler: Yedek parça envanter politikası, Karışık tam sayılı doğrusal optimizasyon modeli, Madencilik sistemleri.

Abstract

Spare parts inventory management is of vital importance in maintaining high equipment availability at minimum cost, especially for industries utilizing fully mechanized systems and aiming mass and continuous production such as mining. In this paper, it is intended to solve the spare parts inventory problem of a large-scale mining company operating in Turkey, by proposing a mathematical model to optimize the spare parts provisioning strategy in such a way that the total inventory related cost is minimized. Based on the current system analyzed and the real data provided by the company, a case study is conducted on inventory management problem of industrial lubricants, having a great importance in fully-mechanized systems to provide mass and continuous production. The optimization results show that the company's current lubricating oil inventory policy can be improved financially by yielding an annual saving up to ₺18,566.

Keywords: Spare parts ınventory policy, Mixed-Integer optimization programming, Mining systems.

1 Giriş

Envanter, şirketlerin makina bazlı operasyonlarına yedek parça temini sağlamak veya üreticiler tarafından müşteri talebini karşılamak üzere stokta tutulan kalem olarak tanımlanır. Envanter yönetimi, genellikle toplam envanter maliyetini en aza indirecek şekilde ne zaman ne kadar kalem sipariş verileceğini ve stokta ne kadar kalem tutulacağını belirleyen bir yönetimsel kontrol mekanizmasıdır. Envanter sistemlerinin etkin parametrelerinin, üretim değerleri ve envanter bazlı yatırım ve yan giderler dikkate alınarak optimize edilmesi hem yedek parça ve üretim kayıplarından kaynaklı maliyetleri en aza indirecektir.

Envanterler dört ana grupta ele alınmaktadır [1]. Bunlar, hammadde, yarı-mamul, nihai mallar ve yedek parçadır. Bunların ilk üçü genellikle tedarikçi kuruluşlarla ilişkilidir. Öte yandan, yedek parça envanteri yedek parça gereksinimini belirleyerek makina temelli üretimlerini aksatmamayı amaçlayan kuruluşlarla ilgilidir. Bu bağlamda, envanter problemi, kuruluşun tedarikçi mi yoksa talepçi mi olduğuna bağlı olarak iki farklı bakış açısıyla ele alınabilir. Bunlara ek olarak, çok kademeli envanter sistemleri, her iki perspektife de uyan üçüncü bir kategori yaratmaktadır. Bu çalışma, probleme talepçi gözünden bakacaktır.

Talep sahibinin perspektifinden bakılan envanter problemleri, genellikle yedek parça yönetime dair sorunları olarak ele almaktadır. Uygulama esnasında, yedek parça envanter yönetimi ve bakım-onarım yönetimi arasında karşılıklı ve büyük bir etkileşim mevcuttur. Çünkü, yedek parça taleplerini düzeltici veya önleyici bakım ihtiyacı belirlemektedir ve bakım-onarım faaliyetleri yedek parça mevcudiyetine bağlı olarak yürütülmektedir. Yedek parça envanter seviyesi, uygulanan bakım faaliyeti ile sistemin bozulma mekanizmasının bir fonksiyonu olup [2] genellikle aralıklı talep türü ile karakterize edilmektedir [3]. Bu nedenle, yedek parça envanter problemleri, literatürde envanter ve bakım-onarım sistemlerinin entegrasyonu ile ele alınmaktadır.

Yedek parça yönetimi, üretime bağlı ekonomik kayıpların azaltılması ve üretim hedeflerinin yerine getirilmesi açısından önem arz etmektedir. Yedek parça talebini karşılamak için büyük miktarlarda siparişlerin verilmesi, yetersiz depolama alanı, parça özelliklerinin uzun raf ömründen kaynaklı bozulması, yüksek stok tutma maliyeti ve yüksek sermaye yatırımı gibi sorunlara neden olabilmektedir. Öte yandan, sipariş adetlerini ihtiyaç seviyesinin altında verilmesi, stokta yedek parçanın bulunmama riskine ve neticesinde bakım-onarımın gerçekleştirilememesine bağlı uzun makina duruşlarına neden olabilir. Bu durum üretim kayıplarını arttırmanın yanı sıra ve üretim planlarında aksamalara ve muhtemel ceza maliyetlerine neden olabilmektedir. Yedek

*Yazışılan yazar/Corresponding author

parça politikası ile ilgili alınan kararlar, genellikle şirketlerin üretim riski alabilirliklerine yani risk iştahlarına göre şekillenmektedir. Özellikle, seri ve sürekli üretim halinde olan şirketlerde, üretimin herhangi bir nedenle sekteye uğraması büyük sonuçlar doğurabilir. Özetlemek gerekirse, yedek parça envanter yönetiminde, stok fazlası maliyetler ile stokta tükenme sonucu ortaya çıkan maliyetler arasında bir fayda değiş tokuşu söz konusudur. Yedek parça envanter yönetimi problemlerinin ana hedefi, genellikle sistemin envanter ve bakım yönlerini birlikte ele alarak ve oluşabilecek toplam maliyeti en aza indirecek şekilde ortak bir karar oluşturmaktır.

Mevcut çalışma kapsamında, büyük ölçekli bir madencilik şirketinin devam eden operasyonlarında kullanılan farklı türdeki endüstriyel yağlar için bir envanter optimizasyon çalışması yapılacaktır. Yağlama işlemi temel olarak, büyük makinelerin ve ağır hizmet ekipmanlarının düzgün bir şekilde çalışabilmesi için temas halindeki hareketli parçalar arasındaki sürtünmeden kaynaklı ısınma ve aşınmanın azaltmayı amaçlar. Yağlama işleminin makine şartlarına uygun şekilde yapılmadığı durumlarda yüksek maliyetli ve makinenin ömrünü önemli ölçüde azaltabilen arızalar olabilmektedir. Sıvı, yarı-katı (gresler), katı (kuru) ve sentetik yağlar (macunlar) olmak üzere dört ana endüstriyel yağ türü mevcuttur. En yaygın endüstriyel yağ türleri, sıvı yağlar ve greslerdir. Sıvı yağlar çoğunlukla menteşeler, rulmanlar ve bileme bıçakları gibi hareketli parçalarda veya fren, ekskavatör ve pompa gibi hidrolik mekanizmalarda kullanılır. Öte yandan gresler, yağın temas yüzeylerine uzun süre yapışması ve sabit kalması gerektiği durumlarda, su ve toza karşı bariyer oluşturarak parçaları aşırı ısı, pas ve korozyondan korumak için kullanılır. Bu tip yağlar, genellikle dişliler, zincirler ve mafsallı mekanizmalarda kullanılır. Endüstriyel yağlar, özellikle mühendislik, otomasyon, imalat, gıda işleme ve medikal sistemlerinde sıklıkla kullanılırlar ve bu sistemlerin üretim devamlılıkları için kritik öneme sahiptirler [4].

Bu çalışma, toplam envanter bazlı masrafları en aza indirecek şekilde, belirli bir zaman periyodu için optimum sipariş adet ve zamanlarının belirlenmesini sağlayan bir matematiksel modeli kullanarak, gerçek bir madencilik şirketinin envanter politikasının optimize edilmesini amaçlamaktadır. Sunulan bu çalışmada, büyük ölçekli üretim yapan bir madencilik şirketinin saha verileri ve uzman görüşleri dikkate alınmıştır. Model aşamasında, tedarikçi seçimi alt problem olarak ele alınmış ve asgari sipariş miktarı ve tedarikçiye bağlı tedarik maliyetinin bir fonksiyonu olarak gösterilmiştir. Böylelikle, sürekli stok kontrolü ve blok-tabanlı önleyici bakım politikası altında çok ürünlü ve çok tedarikçili bir sistem için uygulanmıştır. Genel olarak problem, envanter yatırımı ve emniyet seviyeleri üzerindeki kısıtlamalar dikkate alınarak sipariş verme ve envanterde tutma kararları arasında bir denge oluşturmaktadır.

Bu makalenin geri kalanı şu şekilde düzenlenmiştir: Bölüm 2'de, ilgili literatür incelenmiş ve tartışılmıştır. Bölüm 3 problemin tanımını ve matematiksel modelin gelişimini sunmaktadır. Gerçek verilere dayanan vaka çalışması Bölüm 4'te verilmiştir. Son olarak, Bölüm 5 çalışmaya ait sonuçları özetlemektedir.

2 Literatür taraması

Daha önce de belirtildiği gibi envanter problemi, ilgili sistemin dinamiklerine bağlı olarak, kuruluşun tedarikçi mi yoksa talep eden mi olduğunu gösteren iki farklı perspektifle ele alınabilir. Bunlara ek olarak hem tedarikçi hem de talep eden özelliklerinin aynı anda içinde barındığı ve çok kademeli envanter sistemi olan üçüncü bir kategori daha mevcuttur.

2.1 Tedarikçi bakış açısından envanter optimizasyonu problemi

Tedarikçi bakış açısından envanter problemlerinin amacı, genellikle etkin kaynak kullanımıyla, optimum envanter seviyesi ve istikrarlı üretim akışını sağlayan, kurulum, üretim ve envanter maliyetlerini en aza indirecek şekilde tüketici memnuniyetini arttırmak ve böylece rekabet karşısında piyasaya hâkim olabilmektir. Üretim planlamasında envanter yönetimi, genellikle üretim planlaması, kalite yönetimi, kapasite yönetimi, ekipman ve tedarik yönetimi konseptleriyle birlikte ele alınmaktadır. Bu nedenle, parti büyüklüğünü belirleyen problemlerinin yapısı birkaç farklı açıdan incelenebilir. Planlama ufku, üretim aşaması sayısı, sistemdeki ürün sayısı, talep türü ve kaynak kapasitesi kısıtları, problemin karmaşıklığını etkileyen faktörlerdendir [5]. Lu ve Qi [6] çok ürünlü bir sistem için tek aşamalı bir dinamik parti büyüklüğü belirleme problemi üzerinde çalışmıştır. Talebin deterministik dinamik olduğu ve talep reddine izin verildiği düşünüldüğünde, toplam üretim, stok ve satış kaybı maliyetlerinden oluşan toplam maliyeti en aza indirmek için iki sezgisel algoritma önermiştir. Noblesse ve diğ. [7] üretim hazırlık süresinin stokastik ve envanter modelinde yer alan siparişlere bağlı olduğu, tek ürünlü, tek aşamalı bir üretim-envanter sisteminde, parti büyüklüğü belirleme problemini incelemiştir.

Ayrıca, kurulum maliyeti ve üretim çizelgesi yapıları, problemin yapısını karakterize etmektedir. You ve diğ. [8] zamana bağlı değişen dinamik bir üretim ortamında, kapasiteli ve çok aşamalı parti büyüklüğü belirleme problemi için karışık tam sayılı doğrusal programlama modeli sunmuştur. Zamanla değişen kurulum maliyeti ve dinamik kapasite kısıtı düşünülerek, üretim planını, toplam maliyeti en aza indirilecek şekilde optimize etmiştir.

Ek olarak, parti büyüklüğü belirleme problemleri, bozulan ürünlerin yeniden üretilebilir olup olmadığını belirlemek için ürün kalitesi ile ilgili kararları da dikkate almaktadır. Sonntag ve Kiesmüller [9] stokastik verimden kaynaklanan rasgele verim kayıplarını dikkate alan, tek aşamalı tek ürünlü bir üretim sistemi üzerinde çalışmıştır. Arızalı ürünlerin elden çıkarılması veya yeniden işlenmesi gerekip gerekmediği konusunda karar verilecek bir üretim ortamında, toplam maliyetleri en aza indirecek şekilde, optimum taban stok seviyesini elde etmek için bir matematiksel model geliştirmiştir. Brulard ve diğ. [10] çok boyutlu bir sırt çantası problemini iki aşamalı bir parti büyüklüğü belirleme problemiyle birleştiren, karışık tam sayılı doğrusal optimizasyon modeli üzerine çalışmıştır. Geliri en üst düzeye çıkaracak şekilde, deterministik dinamik talep, kapasiteli kaynaklar ve ürünlerin kısa süreli ömrünü dikkate alarak, çok ürünlü ve çok müşterili sistemin stratejik ve taktiksel kararlarını entegre etmiştir.

Bunların yanında, üretim gecikmesine bağlı daha sonraki dönemlere yığılan talebe ilişkin kararlar, problemin yapısını şekillendirmekte ve her bir dönem başına her bir ardışık birim için ek bir maliyet oluşturmaktadır. Li ve Hu [11] iki aşamalı stokastik bir programlama modeli önererek tek makineli, çok ürünlü parti büyüklüğü belirleme ve çizelgeleme problemini incelemiştir. Stokastik işgücü verimliliği, stokastik talep ve üretim gecikmesine izin verilmesini göz önüne alarak, toplam sistem maliyetlerini en aza indirecek şekilde, üretim sırasını ve parti büyüklüklerini optimize etmiştir. Altendorfer [12]

planlanan teslim süresi, parti büyüklüğü ve güvenlik stoku parametrelerini aynı anda optimize etmek için, sınırlı kapasiteye sahip, stokastik ve tek aşamalı bir üretim-envanter sistemi üzerine çalışmıştır. Bu bağlamda, envanter ve sonraki dönemlerde karşılanan sipariş maliyetlerini en aza indirmeyi amaçlayan optimizasyon problemi için sezgisel bir yaklaşım önermiştir.

2.2 Çok kademeli sistemler açısından envanter optimizasyonu problemi

Literatürde, parti boyutlandırma problemiyle ilişkilendirilen hammadde tedariki ve üretim planlama problemleri, satın alma politikası, tedarik, envanter, üretim ve planlama gibi entegre sorun boyutlarının karmaşıklığının azaltılabilmesi için genellikle ayrı ayrı incelenmiştir. Bununla birlikte, yapılan son çalışmalardan, çok aşamalı tedarik zinciri yönetimi ile elde edilen, tedarik ve üretim planlaması arasındaki koordinasyonun öneminin arttığı gözlemlenmiştir [13]. Bu tür problemlerin genellikle birden fazla amacı vardır, ancak temel amaç, tedarik ve üretim kontrolünün tüm aşamalar için entegre optimizasyonu yoluyla, tedarik zincirinin genel performansını iyileştirmektir. Böylece, hedeflenen müşteri memnuniyeti seviyesine ulaşılarak ilgili maliyetler en aza indirilir. Song [14] üç aşamalı bir zincirde sipariş ve üretim kontrolünün ortak optimizasyonunu incelemiştir. Stokastik talep, stokastik işleme ve sipariş teslim süresi varsayımları altında, sipariş ve üretim politikaları, toplam maliyetler en aza indirilecek şekilde optimize edilmiştir. Taleizadeh ve diğ. [15] belirli bir depo kapasitesine sahip satıcılar ile satın alma limiti olan alıcıları içeren, çok ürünlü, çok alıcılı ve çok satıcılı bir tedarik zinciri problemi üzerine çalışmıştır. Stokastik talep ve değişken teslim süresini göz önüne alarak, tedarik zincirinin toplam maliyetini en aza indirecek olan optimum güvenlik stoku, yeniden sipariş noktası ve sevkiyat sayısını belirlemeyi amaçlamıştır. Sana [16] tedarikçi, üretici ve perakendeci için bir tedarik zinciri problemini incelemiş ve ürün kalitesini dikkate alarak entegre bir envanter-üretim modeli önermiştir. Tedarik zincirinin toplam kârını en üst düzeye çıkarmayı amaçlayan, ihmal edilebilir teslim süresi ve sabit talebi dikkate alarak optimum hammadde sipariş büyüklüğü ve üretim oranını elde etmek için bir analitik yöntem uygulamıştır. Pal ve diğ. [17] bir üretici, birden çok tedarikçi ve perakendeci içeren, çok aşamalı çok ürünlü tedarik zinciri sistemi için entegre bir envanter üretim modeli önermiştir. Her bir nihai ürünün, farklı hammaddeleri belirli bir oranda birleştirerek üretildiği ve bu ürünlerin deterministik talebe bağlı olarak satıldığı perakendecilere teslim edildiği düşünülerek, zincirin toplam kâr fonksiyonunu en üst düzeye çıkarmak amaçlanmıştır. Song ve diğ. [13] stokastik müşteri talepleri ve stokastik üretim süreleri gibi birden fazla sistem belirsizliğinin olduğu bir üretim tedarik zincirinde, hammadde tedariki ve üretim kontrolü için entegre bir envanter yönetimi politikası geliştirmiştir. Wang ve diğ. [18] üretim yapan bir tedarikçi ve ürünleri satan bir perakendeci içeren iki kademeli bir tedarik zinciri problemi için, entegre bir parti büyüklüğü belirleme ve fiyatlandırma modeli üzerine çalışmıştır. Tedarikçinin sınırlı üretim oranını ve fiyat duyarlı deterministik talebi göz önünde bulundurarak, sistem genelinde kârı en üst düzeye çıkararak satış fiyatı, sipariş miktarı ve parti büyüklüğünü optimize etmeyi amaçlamıştır. Tewary ve diğ. [19] bir üretici, iki depo, üç distribütör ve dört perakendeciden oluşan dört kademeli bir envanter sistemini incelemiş ve müşteri talebi ile teslim sürelerinin sabit olduğu, yeniden sipariş aralığına dayalı bir karışık tam sayılı doğrusal olmayan programlama problemini üzerinde çalışmıştır. Bu kapsamda, müşteri talebini karşılamayı ve toplam maliyeti en aza indirmeyi amaçlayarak, sipariş ve üretim büyüklüğü ile yeniden sipariş ve üretim aralığını optimize etmiştir. Daha sonra Das ve diğ. [20], deterministik bir probleme uygulanan bu modelleme tekniğini, stokastik modelleme için genişletmiştir. Stokastik müşteri talebi ve teslim süresini göz önünde bulundurarak, toplam envanter maliyetini en aza indirmeyi hedefleyen bir çözüm önermiştir. Bu bağlamda, her bir stok noktasındaki emniyet stoku miktarının, sipariş miktarının ve servis seviyesinin optimal parametrelerini elde etmeyi amaçlayan ve sürekli stok kontrolü sistemine sahip çok aşamalı bir dağıtım zinciri için olasılıksal bir model geliştirmiştir.

2.3 Talep sahibi bakış açısından envanter optimizasyonu problemi

Talep sahipleri açısından yedek parça envanter yönetimi problemlerinin ortak amacı, stoklama kapasiteleri ve sistem bileşenlerinin bakım profilleri hesaba katılarak, toplam maliyeti en aza indirgeyecek şekilde yedek parça sipariş verme aralıklarını ve sipariş miktarlarını optimize edilmesidir [21]. Uygulama esnasında yedek parça envanter yönetimi problemi, mevcut önleyici bakım politikasının türü, envanter politikasının özellikleri, sistem bileşenlerinin sayısı ve sistemin bozulma karakteristiğine bağlı olarak, çeşitli şekillerde oluşturulabilir [22]. Geçmiş çalışmalar, envanter kontrol politikası ile farklı önleyici bakım politikalarını birlikte ele almıştır. Bu bağlamda, bazı araştırmacılar, bir parçanın belirli bir yaşa ulaştığında değişiminin gerçekleştirildiği yaş-tabanlı önleyici parça değişim politikası ile envanter kontrolünün eşzamanlı optimizasyonunu üzerine çalışmıştır. Simülasyon tabanlı entegre optimizasyon modelleri kullanılarak, Kabir ve Al-Olayan [23] tek parçalı sistemler için sürekli stok kontrolü politikası altında, Kabir ve Al-Olayan [24] çok parçalı sistemler için sürekli stok kontrolü politikası altında ve Kabir ve Farrash [25] çok parçalı sistemler için periyodik stok kontrolü politikası altında çalışmalar gerçekleştirmiştir. Hu ve diğ. [26] yaş-tabanlı önleyici parça değişim politikası ve yedek parçaların sipariş politikası için, ayrık olaylı simülasyonunu genetik algoritma ile bütünleştiren genel bir optimizasyon yaklaşımı önermiştir. Louit ve diğ. [27] uzun gözlem süresinde oluşan birim maliyeti en aza indirerek, kritik onarılabilir yedek parçaların envanter politikasını optimize eden dinamik bir kontrol modeli geliştirmiştir. Panagiotidou [28] sürekli stok kontrolü politikası ve yaş-tabanlı önleyici parça değişim politikası kapsamında, birden fazla özdeş parçaya sahip sistemler için önleyici değiştirme süresi ve yedek parça sipariş politikasının ortak optimizasyonunu gerçekleştirmişlerdir. Sipariş politikası ve önleyici parça değişimi arasındaki analitik ilişkiyi temsil eden bir model geliştirerek, toplam maliyetin en aza indirilmesini amaçlayan bir bütünleşik bir model oluşturmuşlardır.

Bunların yanı sıra, bazı araştırmacılar bir parçanın arıza geçmişine bakılmaksızın önceden belirlenmiş zamanlarda değiştirildiği blok-tabanlı önleyici parça değişim politikası ile envanter kontrolünün eşzamanlı optimizasyonu üzerine çalışmışlardır. Ilgin ve Tunali [29] çok bileşenli bir üretim sistemi için, yedek parça tedariki ve önleyici bakım politikalarının entegre optimizasyonunu incelemiş ve genetik algoritmayla birleştirilmiş bir simülasyon optimizasyonu yaklaşımı sunmuştur. Huang ve diğ. [30] blok-tabanlı önleyici parça değişimi ile periyodik stok kontrolü politikaları altında, belirsiz teslim sürelerini hesaba katarak, yedek parça envanter yönetimi için genelleştirilmiş bir optimizasyon politikası incelemiştir. Kader ve diğ. [31] belirsiz arıza oranına maruz

kalan tek parçalı bir üretim sistemi için, entegre bir yedek parça envanteri ve blok-tabanlı önleyici parça değişim problemini incelemiştir. Sistemin bozulabilirliği ve envanter politikasının (s, Q) olduğu varsayılarak, optimum önleyici parça değiştirme aralığını ve sipariş edilecek yedek parça miktarını belirlemek için, maliyet kriterlerine dayalı bir matematiksel model geliştirmişlerdir. Mardin ve Dekker [32] özdeş ve çok bileşenli bir sistemde yedek parça siparişi ve blok-tabanlı önleyici parça değişim politikasının ortak optimizasyonu için, bir simülasyon modeli oluşturmuştur. Önerilen model, bakım ve envanter faaliyetleriyle ilgili toplam maliyeti en aza indirerek, optimum parça değiştirme aralığını, yeniden sipariş noktasını ve maksimum stok seviyesini bulmak için geliştirilmiştir. Yaş-tabanlı önleyici parça değişim politikası ile karşılaştırıldığında, blok-tabanlı önleyici parça değişiminin, özellikle çok sayıda özdeş parçaya sahip sistemlerde, ölçek ekonomisi açısından daha avantajlı olduğu sonucuna varılmıştır. Yang ve Kang [33] Monte Carlo simülasyon optimizasyonu yaklaşımını uygulayarak, çok bileşenli bir sistemde blok-tabanlı önleyici parça değişim politikası ile yedek parça envanter politikasının ortak optimizasyonu üzerine çalışmıştır. Toplam maliyeti en aza indirecek şekilde, ihmal edilebilir teslim süresi ve R'nin önleyici parça değişim aralığına eşit olduğu (R, S) envanter politikası varsayımları altında, maksimum stok seviyesinin ve parça değiştirme aralığı optimize etmeyi amaçlamıştır.

Bunlara ek olarak bazı çalışmalarda, yedek parça envanter problemi, sistem durumu önceden belirlenmiş bir eşik değere ulaştığında parça değişimini tetikleyen koşul-tabanlı önleyici parça değişim politikası ile birlikte düşünülmüştür. Wang [34] önleyici bakım kontrol aralığı ve yedek parça envanter kontrolü için, kontrol aralığını arıza sayısı ile bağlayan gecikme süresi konseptini dikkate alarak ortak bir optimizasyon problemi üzerinde çalışmıştır. Periyodik stok kontrolü sistemi, sabit sipariş teslim süresi ve (S, Q) sipariş politikası varsayımıyla, toplam sistem maliyetini en aza indirecek şekilde, önleyici bakım denetim aralığı, sipariş aralığı ve sipariş miktarının optimum değerlerini tespit etmeyi amaçlamıştır. Vaughan [35] düzeltici ve önleyici bakımı entegre bir şekilde iki farklı talep kaynağı olarak değerlendirerek, optimal bir yedek parça envanter politikası belirlemek için, stokastik bir dinamik programlama modeli önermiştir. Durağan olmayan talep, teslim süresinin bir dönem olması ve üretim gecikmesine izin verilmemesi varsayımlarını göz önüne alarak, envanter sisteminin toplam maliyetini en aza indirmek için bir yedek parça envanter kontrol politikası geliştirmiştir. Wang ve diğ. [36] optimum yedek parça nu belirlemek için bir yedek parça olasılık modeli oluşturmuş ve daha sonra parça bozulma seviyesi ile sistemin toplam maliyetine bağlı koşul-tabanlı önleyici parça değişim politikası kapsamında, sipariş ve bakım politikalarının ortak optimizasyonu için kapsamlı bir simülasyon modeli geliştirmiştir. Chen ve diğ. [37] servis süresi ve bozulma derecesini aynı anda dikkate alarak yeni bir arıza olasılık tahmin fonksiyonu geliştirmiştir. Tek parçalı bir sisteminde, optimum yedek parça sipariş süresi ve parça değişim aralığını belirlemek için, toplam maliyeti en aza indirecek bir simülasyon algoritması tasarlamıştır. Nguyen ve diğ. [38] önleyici bakım ve yedek parça tedarik operasyonlarının birlikte ele alındığı, çok bileşenli sistemler için entegre bir bakım-envanter stratejisi sunmuştur. Bu bağlamda, Monte Carlo simülasyon teknikleri kullanılarak, sabit bir teslim süresi varsayımı altında, optimum karar parametreleri toplam maliyeti en aza indirecek şekilde belirlenmiştir. Keizer ve diğ. [39] ortak yedek parça havuzu yaklaşımıyla, çok bileşenli bir sistem için, entegre bir envanter ve koşul-tabanlı önleyici parça değişim problemini incelemiştir. Model, sistemin periyodik denetimlerle izlendiği ve teslim süresinin sabit olduğu varsayılarak, maliyeti azaltacak şekilde stok politikası parametrelerinin belirlendiği ve modelin performansının hem (s, S) stok politikası hem de tek bileşenli sistem uygulamasıyla karşılaştırıldığı bir Markov Karar Süreci olarak formüle edilmiştir. Zhang ve Zeng [40] birden fazla özdeş birime sahip çok bileşenli sistemlerde, sistemin beklenen maliyet oranını en aza indirerek, periyodik stok kontrolü ve yedek parça tedarik politikalarının ortak optimizasyon stratejisini belirlemek için simülasyon tabanlı bir optimizasyon kullanmıştır.

Madencilik, özellikle operasyonel seviyedeki belirsizliğin oldukça yüksek olduğu makine bazlı bir sektör olmasına rağmen, plansız üretim kesintileri ve buna bağlı planlama gecikmelerinde kayda değer bir etki sağlayabilecek olan yedek parça envanter çalışmalarına nadiren rastlanmaktadır. Bu bağlamda, Ghodrati ve diğ. [41] yedek parça envanter yönetimi kararlarının çoklu kombinasyonlarını görselleştirmek ve tahmin etmek için bir ağaç diyagramı geliştirmiş ve bir demir madeninde kullanılan yükleyiciler için bir uygulama yaparak envanter kararlarının olasılıksal sonuçlarını ele almıştır. Wang ve diğ. [42] durum izleme göstergelerinin bir envanter politikasına nasıl entegre edilebileceğini araştırmış ve bu yönde geliştirilen metodolojinin bir madendeki çekici kamyonların motorlarına uygulandığı bir çalışma yapmıştır. Louit ve diğ. [43] amaç fonksiyonunun, maliyeti en aza indirmek, sistem güvenilirliğini en üst düzeye çıkarmak ve kullanılabilirliği en üst düzeye çıkarmak olarak düzenlenebileceği çok amaçlı bir envanter optimizasyon modeli oluşturmuştur. Geliştirilen model, bir madendeki nakliye kamyonlarının tamir edilebilir bir bileşenine uygulanmıştır. Martinez ve diğ. [44] stokta yedek parça kalmaması nedeniyle oluşabilecek üretim kaybına karşı sigorta poliçesinin dahil edildiği entegre bir envanter modeli oluşturmuştur. Model bir madendeki hidrolik ekskavatörün onarılamaz bir bileşeni için uygulanmıştır. Rosienkiewicz ve diğ. [45] madencilik endüstrisinde kullanılabilecek yeni bir yedek parça talep tahmin yöntemi geliştirmiş ve bir bakır madeninden alınan gerçek verilere dayanarak bir nakliye aracının üç yedek parçasına yönelik gelecekteki talebi tahmin etmek için uygulamıştır. Zhang ve diğ. [46] birden fazla şirketi içeren bir paylaşımlı envanter sorununu ele alarak maliyeti en aza indirmeyi amaçlayan bir model geliştirmiş ve üç altın madeninin ortak olarak kullandığı bir yedek parça envanter sistemine uygulamıştır.

Bu çalışma, özellikle seri ve sürekli üretim gerektiren mekanize sistemlerin verimliliğinde büyük öneme sahip olan endüstriyel yağlar için, çok ürünlü ve çok tedarikçili bir envanter yönetimi probleminin çözümlenmesini amaçlamıştır. Tüm makine bazlı üretim sektörleri için kritik öneme sahip bu konu, gözlemlerimize göre literatürde daha önce çalışılmamıştır. Aynı zamanda, talep eden perspektifine yönelik literatürde yapılan envanter çalışmaları incelendiğinde, bu çalışmaların çoğunlukla hipotetik verilere dayandığı görülmektedir. Mevcut çalışma içerisinde, bir maden şirketine ait gerçek veriler ile bir endüstriyel vaka çalışması yapılacaktır. Böylelikle, bir yedek parça envanter politikasında yapılacak iyileştirmelerin sektöre görünür faydalarının daha net ortaya konulması amaçlanmıştır. Ek olarak, yedek parça envanter probleminin modellenmesi konusunda oldukça noksan olan madencilik sektörü ile ilgili literatüre de katkı sunulması muhtemeldir.

3 Matematiksel model

3.1 Problem tanımı

Çalışmaya temel oluşturan yedek parça envanter problemi, büyük karlılık oranına sahip bir çözelti madenciliği şirketinin, planlanan üretimini gerçekleştirebilmesi için gerekli olan endüstriyel yağların temini ve stoklanması süreci ile ilgilidir. Çözelti madenciliği, doğal gaz ve petrol çıkarılmasında kullanılan tekniklere benzer özel bir uygulama ile boru ve pompalardan oluşan bir makine sistemi kullanılarak yer altında sıcak su ile çözdürülen mineralin kazanılması demektir. Buna ek olarak, çözelti halindeki mineralin nihai ürüne dönüştürülmesi için maden sahası içerisinde yüksek kapasiteli bir kompleks üretim tesisi de mevcuttur. Bu nedenle, maden sahasındaki bu nispeten kapalı döngü işleyen sistem, seri ve paralel bağlı özdeş olmayan makinelerin birbiri ile entegrasyonundan oluşmaktadır. Mineralin çıkarılmasından nihai ürünün elde edilmesine kadarki süreç tamamen mekanize bir sistem olarak çalıştırılmaktadır. Makinelerin sistem içerisindeki verimliliği, üretim kayıplarının en aza indirilmesi için kritik öneme sahiptir. İşletim sisteminin hareketli parçalarını yağlamak için kullanılan ve bu çalışmada yedek parça olarak tanımlanan endüstriyel yağların mevcudiyeti, sistemin verimliliğini etkileyen en önemli faktörlerden biridir.

Sistem bileşenlerinin yağlanması, şirket tarafından farklı tiplerde endüstriyel yağlar kullanılarak gerçekleştirilmektedir. İncelenen sistemde, T dönemlerinden oluşan planlama süresi üzerinde I tipte farklı envanter kaleminin talebini karşılayacak J tedarikçi bulunmaktadır. Tedarikçiler, her yılın başında ürettikleri endüstriyel yağ türleri için bir teklif sunmakta ve seçilen tedarikçinin sunduğu fiyat yıl boyunca sabit kalmaktadır. Herhangi bir nedenle alternatif bir tedarikçiye ihtiyaç duyulduğu durumlarda, ilgili yağın kalitesini sağlayan ve en düşük fiyat teklifini veren tedarikçi tercih edilmektedir.

Sistemin işletim ünitelerinin zamana bağlı bozulmalarının kontrol altında tutmak için, bakım-onarım politikası altında düzeltici ve önleyici olarak iki bakım türü uygulanmaktadır. Şirket tarafından belirlenen politikaya göre, bir makine normal çalışma aşamasındaysa, önleyici bakım uygulanır ve makine durumu yeni kadar iyi olarak güncellenir. Öte yandan, bir makine bir arıza nedeniyle çalışmaz durumdaysa, tamir edilene kadar başka bir özdeş makine ile değiştirilir veya üretim planı yeni koşullara uyarlanacak şekilde güncellenir. Bakım-onarım uygulamaları altında sürdürülen yağlama faaliyeti çoğunlukla, bir makinenin arıza geçmişine bakılmaksızın önceden belirlenmiş zamanlarda ve miktarlarda gerçekleştirildiği için, blok-tabanlı önleyici bakım özelliklerine sahiptir. Şirketin envanter politikası (Q, s) olarak belirtilmiştir. Başka bir deyişle, sipariş verme kararları, envanter emniyet stoku seviyesinin altına inmeyecek şekilde, ilgili kalemin yıllık tüketiminin belirli bir yüzdesi alınarak hesaplanmaktadır. Bu oran, yağlanan bileşenin çalışma kritikliğine bağlı olarak %30 ile %50 arasında değişmektedir.

Karışık tam sayılı doğrusal model, planlama süresi boyunca sipariş ve envanter maliyetlerini en aza indirecek şekilde, sipariş planlamasını ve sipariş büyüklüklerini optimize etmeyi amaçlamaktadır. Bu bağlamda, sürekli stok kontrolü ve blok-tabanlı önleyici bakım politikaları düşünülerek, çok öğeli ve çok tedarikçili bir sistem geliştirilmiştir. Sipariş büyüklüğüne ilişkin karar, maksimum stok yatırımının ve emniyet seviyesinin bir fonksiyonu olan hem talep hem de stok seviyesine bağlıdır. Bu nedenle, en uygun sipariş miktarının elde edilebilmesi için, stok pozisyonu her bir kalem için her dönemin sonunda kontrol edilmelidir. Aynı öğeyi farklı tedarikçilerden sipariş etmeyi mümkün kılan problemin çok öğeli ve çok tedarikçili yapısı, minimum sipariş miktarı ve tedarikçiye bağlı tedarik maliyetinin bir fonksiyonu olarak bir alt problemde ele alınmaktadır.

3.2 Model açıklaması

3.2.1 Varsayımlar

Sunulan model için yapılan varsayımlar aşağıdaki gibidir:

- Sistemin çok ögeli ve çok tedarikçili bir yapısı vardır,
- Sınırlı bir planlama süresi için uygulanmaktadır. Bu süre boyunca tedarikçilerin sunduğu fiyat sabit kalmaktadır,
- Yedek parça temin süresi deterministiktir,
- Emniyet stoku seviyesi, stokların tükenme durumunu engellemektedir. Bir penaltı (ceza) maliyeti mevcut değildir,
- Depoda mevcut durumdaki yedek parçaların raf ömürleri dikkate alınmamıştır,
- Sipariş adetinin birim ürün fiyatı üzerine etkisi yoktur,
- Verilen sipariş miktarının tamamı tek seferde ulaşmaktadır.

3.2.2 Parametre ve değişkenler

Model parametreleri ve değişkenlerine yönelik açıklamalar aşağıda verilmektedir.

Parametreler

K_j : j tedarikçisinin sabit sipariş maliyeti,
k_i : i öğesini bir siparişe dahil etmenin sabit maliyeti,
c_{ij} : j tedarikçisinden i öğesinin birim tedarik maliyeti,
h_i : i öğesini dönem başına envanter tutma maliyeti,
d_{it} : t dönemindeki i öğesi için oluşan talep miktarı,
C : Envanter için yapılabilecek dönemlik azami yatırım seviyesi,
ss_i : i öğesi için emniyet stoku seviyesi,
w_i : i öğesi için en düşük birim maliyet,
P_j : j tedarikçisinden sipariş vermek için gerekli minimum sipariş miktarı,
M : Büyük bir sayı.

Karar Değişkenleri

I_{it} : t döneminin sonunda i öğesinin stok seviyesi,
Q_{ijt} : t döneminde j tedarikçisinden sipariş edilen i öğesinin miktarı,
X_{it} : t döneminde sipariş edilen i öğesinin toplam miktarı,
y_{ijt} : t döneminde j tedarikçisinden i öğesi için bir siparişin gerçekleşip gerçekleşmediği,
z_{jt} : t döneminde j tedarikçisinden bir siparişin gerçekleşip gerçekleşmediği.

3.2.3 Optimizasyon modeli

Envanter planlama problemine dair matematiksel model aşağıda gösterilmiştir.

$$Min\ Z = \sum_{j,t} K_j \cdot z_{jt} + \sum_{i,t} k_i \cdot y_{ijt} + \sum_{i,j,t} c_{ij} \cdot Q_{ijt} + \sum_{i,t} h_i \cdot I_{\text{it}} \qquad (1)$$

Kısıtlar:

$$I_{it} = I_{it-1} + X_{it} - d_{it} \quad \forall i,t \quad (2)$$

$$I_{it} \geq ss_i \quad \forall i,t \quad (3)$$

$$\sum_i I_{it} \cdot w_i \leq C \quad \forall t \quad (4)$$

$$X_{it} = \sum_j Q_{ijt} \quad \forall i,t \quad (5)$$

$$Q_{ijt} \leq M \cdot y_{ijt} \quad \forall i,j,t \quad (6)$$

$$\sum_i y_{ijt} \leq M \cdot z_{jt} \quad \forall j,t \quad (7)$$

$$\sum_i c_{ij} \cdot Q_{ijt} \geq P_j \cdot z_{jt} \quad \forall j,t \quad (8)$$

$$I_{it} \geq 0 \quad \forall i,t \quad (9)$$

$$X_{it} \geq 0 \quad \forall i,t \quad (10)$$

$$Q_{ijt} \geq 0 \text{ ve tam sayı} \quad \forall i,j,t \quad (11)$$

$$y_{ijt} \in \{0,1\} \quad \forall i,j,t \quad (12)$$

$$z_{jt} \in \{0,1\} \quad \forall j,t \quad (13)$$

Amaç fonksiyonu (1), sabit sipariş maliyetleri, birim tedarik maliyeti ve envanterde tutma maliyeti dahil olmak üzere toplam yedek parça maliyetini en aza indirmeyi amaçlar. Kısıt (2) envanter bilanço denklemidir. Bir talep, önceki dönemde sipariş edilmiş olan kalemlerin tedarikinden veya önceki dönemden kalan envanterden karşılanabilir. Kısıt (3), bir öğenin envanter seviyesinin, her dönemin sonunda en azından emniyet stoku seviyesinde olmasını sağlar. Kısıt (4), envanterde tutulan kalemlerinin toplam tedarik maliyetinin her dönem için maksimum envanter yatırımını aşamamasını sağlar. Bir öğe için mevcut dönemde sipariş edilen toplam miktar, ilgili öğenin tüm tedarikçilerden sipariş edilen miktarlarının toplamına eşittir (5). Kısıt (6), bir tedarikçiden verilen siparişe dahil edilmeyen öğenin sipariş miktarının pozitif olmamasını sağlar. Kısıt (7), tedarikçiden sipariş verilmedikçe, ilgili tedarikçiden verilen siparişe hiçbir öğenin dahil edilemeyeceğini belirtir. Kısıt (8), bir tedarikçiden verilen toplam sipariş miktarını, tedarikçinin sipariş alması için gereken minimum sipariş miktarını karşılamaya zorlar. Kısıt (9) ve (10) karar değişkenlerinin negatif olmamasını sağlar. Kısıt (11) değişkeni tamsayı değerlerle kısıtlarken, kısıt (12) ve (13) değişkenleri iki bileşenli, 1 veya 0, olmaya zorlar.

4 Vaka çalışması

Bu bölümde, Türkiye'nin önde gelen çok prosesli ve büyük ölçekli madencilik şirketlerinden biri tarafından sağlanan veriler kullanılarak, Bölüm 3'te önerilen model yardımıyla ilgili şirketin endüstriyel yağ envanter sistemi analiz edilecektir. Karışık tam sayılı doğrusal programlama modeli LINGO 18.0 yazılımı kullanılarak çalıştırılmıştır. Daha sonra, parametre değerlerindeki değişime bağlı olarak elde edilen çıktıların incelenebilmesi için bir duyarlılık analizi yapılmıştır. Son olarak, sistemin dinamik doğası göz önünde bulundurularak, kararların değişen koşullara uyarlanabilmesi için dönen planlama ufuklu envanter politikası kullanılmıştır.

4.1 Veri toplama

On farklı tipte sıvı yağlama yağı ve yedi farklı tipte gres yağı ile birlikte, işletim sisteminin yağlanması için kullanılan on yedi farklı endüstriyel yağ tipinin verileri şirket tarafından sağlanmıştır. Gres yağı tiplerinin düşük talep sıklıklarına sahip olması ve tek bir tedarikçinin mevcut olmasının, modelin tedarikçi seçim yapısına hizmet etmemesi nedeniyle, modelin karar alma mekanizmasına büyük bir katkıda bulunamayacağı öngörülmüştür. Bu nedenle, modelin kapsayıcı ve çoklu karar alma yapısının daha iyi incelenebilmesi için, sadece sıvı endüstriyel yağ tipleri dikkate alınmış ve optimize edilecek planlama süresi bir sene olarak belirlenmiştir. Bu bağlamda, on farklı tip endüstriyel yağ türü ve bu yağ türlerinin potansiyel tedarikçilerine ait eşleştirme matrisi Tablo 1'den incelenebilir.

Tablo 1. Şirkette kullanılan endüstriyel yağ türleri ve tedarikçileri.

Table 1. Types of industrial oil types used in the company and their suppliers.

Endüstriyel Yağ Türleri	Tedarikçiler						
	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7
Y1	●						
Y2	●	●	●				
Y3		●	●				
Y4	●	●	●				
Y5	●	●	●				
Y6						●	
Y7					●		
Y8							●
Y9							●
Y10				●			

Şirketteki yağlama çalışmaları, çoğunlukla bir makinenin önceden belirlenmiş zamanlarda önceden belirlenmiş yağ miktarlarıyla yağlandığı önleyici bakıma dayanmaktadır. Bu nedenle, talep türü, değeri zaman içinde sabit olmayan ve önceden bilinen, başka bir deyişle deterministik dinamik talep olarak kabul edilmiştir. Talep değerleri, aylık talep olarak kabul edilmiş ve varil sayısı olarak ele alınmıştır. Mevcut tedarikçilerden alınan kalemlerin birim tedarik maliyet değerlerinin, on iki dönem (bir sene) olarak belirlenen planlama süresi boyunca sabit kaldığı varsayılmaktadır. Emniyet stoku seviyeleri, şirket tarafından sağlanan seviyelere bağlı olarak alınmış ve başlangıç stok seviyeleri olarak kabul edilmiştir. Sabit sipariş maliyeti, bir öğeyi siparişe dahil etmenin sabit maliyeti ve stok tutma maliyeti, şirketteki uzmanlar tarafından tanımlanmıştır. Bir kalem için dönem başına stok tutma maliyeti, o kalemin birim tedarik maliyetinin %30'unun dönem sayısına bölünmesiyle elde edilmiştir. Şirket tarafından belirlenen yatırım kapasitesi için bir kısıtlama olmadığından, maksimum envanter yatırımı çok büyük bir sayı olarak alınmıştır. Ayrıca, şirket tarafından sağlanan bilgilere göre, tedarikçiler, minimum sipariş miktarları üzerinde herhangi bir kısıtlamaya sahip olmadığından, modelde genel bir ifade olarak sunulan minimum sipariş miktarları sıfır olarak kabul edilmiştir.

4.2 Sayısal sonuçlar

Model sonuçları, toplam sipariş sayısı, ortalama envanter yatırımı, sipariş başına ortalama tedarik maliyeti ve amaç fonksiyonundaki tüm maliyet kalemlerinin hesaplanması dikkate alınarak analiz edilmiştir. İlk olarak, şirketin mevcut sistemine dayalı sipariş ve envanter politikasının uygulanmasından elde edilen sonuçlar tespit edilmiştir. Daha

sonra, aynı parametre değerleri kullanılarak, Bölüm 3.2'de belirtilen model kullanılarak envanter sistemi için bir optimizasyon işlemi gerçekleştirilmiştir. Mevcut ve iyileştirilmiş envanter politikalarının çıktıları Tablo 2'de sırasıyla Model 01 ve 02 olarak verilmektedir.

Şirketin mevcut uygulamasına göre, ortalama envanter yatırımının 70.345 ₺ ve toplam maliyetin verilen 26 sipariş için 750.766 ₺ olduğu gözlenmiştir. Diğer taraftan, optimizasyon modeli uygulandığında, toplam 19 adet sipariş ile ortalama 64.680 ₺ envanter yatırımı ve 732.200 ₺ toplam maliyetin gerçekleştiği görülmektedir. Bu bağlamda, optimizasyon modelinde, envantere daha az yatırım yapılırken, aynı zamanda daha az sipariş verildiği, başka bir deyişle sipariş başı tedarik adetini arttırıldığı görülmektedir. Buna ek olarak, amaç fonksiyonundaki her bir maliyet kalemi ve dolayısıyla toplam maliyet, şirketin uygulamasında daha yüksektir, çünkü mevcut şirket politikası, sipariş verileceği zaman gereken miktara bakmaksızın, sistemin en az emniyet stoku seviyesinde sipariş vermesini sağlamaktadır. Böylelikle, Bölüm 3.2'de verilen matematiksel modelin uygulanması ile birlikte finansal açıdan 18.566 ₺ civarı bir tasarruf sağlanabilmektedir.

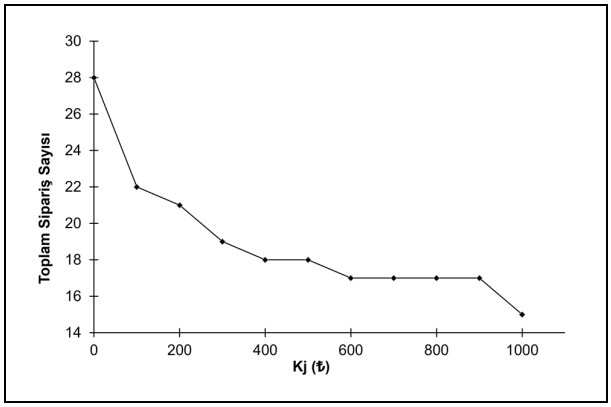
Matematiksel modelin, şirketin envanter politikasına kıyasla avantajını daha net şekilde göstermek amacıyla Denklem (14) modele eklenmiştir. Burada amaç, şirketin yıllık sipariş adetini koruması durumunda, sipariş verme zamanları ve her siparişteki kalem adetlerindeki değişiklikler ile ne kadar finansal fayda sağlanabileceğinin tespit edilmesidir. Bu kısıtın modele eklenmesi durumunda elde edilen sonuçlar, Tablo 2'de Model 03 olarak verilmektedir.

$$\sum_{jt} z_{jt} \leq 26 \qquad \forall\, j, t \qquad (14)$$

Model 03 sonucunda elde edilen maliyet kalemleri incelendiği zaman, bu fazladan kısıtlanmış modelin bile mevcut envanter politikasına kıyasla 17.262 ₺ tutarında bir tasarruf getirebileceği görülmektedir. Bu durumda, sipariş sayısına bağlı olan sabit maliyetler aynı kalmış, ancak her siparişte istenilen endüstriyel yağ varili adetleri farklılık göstereceği ve sipariş zamanları da mevcut politikaya kıyasla iyileştirileceği için diğer tüm kalemlerde görünür tasarruflar sağlanmıştır. Bu durum, sipariş adetinin mevcut politika ile aynı kaldığı durumlarda bile, sipariş zamanı ve siparişte istenilen talep miktarlarındaki değişiklikler ile finansal tasarruflar sağlanabileceğini göstermiştir.

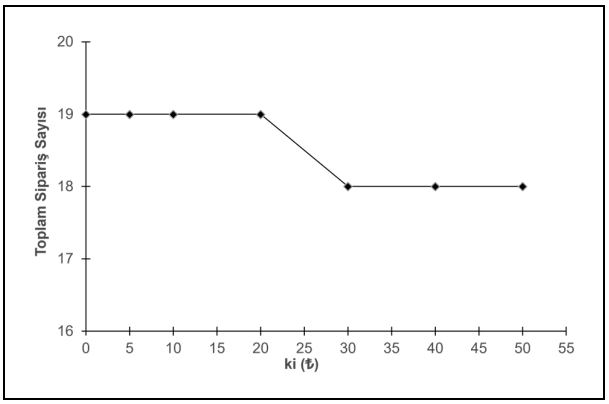
4.3 Duyarlılık analizi

Sonuçlar üzerine yapılan ilk incelemeden sonra, değişen parametre değerlerinin model sonuçlarına etkisini ölçmek amacıyla duyarlılık analizi gerçekleştirilmiştir. Öncelikle, sabit sipariş maliyetinin (K_j) ve bir öğeyi siparişe dahil etmenin sabit maliyetinin (k_i) toplam sipariş sayısına etkisi incelenmiş ve analiz sonuçları sırasıyla Şekil 1'de ve Şekil 2'de verilmiştir.



Şekil 1. Değişen sabit maliyet değerlerine göre toplam sipariş sayısındaki değişiklik.

Figure 1. Total number of order vs. fixed ordering cost values.



Şekil 2. Değişen bir öğeyi bir siparişe dahil etme sabit maliyet değerlerine göre toplam sipariş sayısındaki değişiklik.

Figure 2. Total number of order vs. fixed cost of ıncluding an ıtem in an order values.

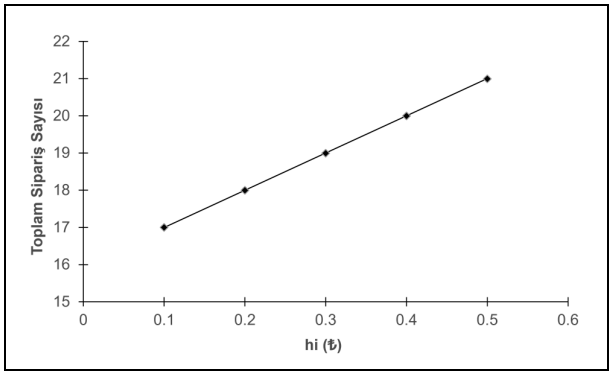
Her iki sabit maliyet değerindeki artışın, modeli daha az sıklıkta siparişler vererek envanterde daha fazla kalem tutmaya zorladığı görülmektedir. Ancak, bir öğeyi bir siparişe dahil etmenin sabit maliyetinin (k_i) sipariş kararları üzerindeki etkisinin, sabit sipariş maliyetinin (K_j) etkisine kıyasla önemli olmadığı gözlemlenmiştir. Buna ek olarak, her iki sabit maliyet değeri sıfıra eşitlendiğinde ve bir öğenin bir tedarikçiden sipariş edilen miktarının (Q_{ijt}) üzerindeki tamsayı olma kısıtı kaldırıldığında, beklendiği gibi, siparişin her dönem sadece oluşan talep kadar verildiği ve bir öğenin envanterinin yalnızca emniyet stoku seviyesi kadar tutulduğu gözlemlenmiştir.

Tablo 2. Şirketin mevcut envanter politikasının uygulanmasından elde edilen sonuçlar.

Table 2. Outputs obtained from the inventory models.

Model No	Toplam Sipariş Sayısı	Sipariş Başına Ort. Tedarik Maliyeti (₺)	Ort. Envanter Yatırımı (₺)	Envanter Tutma Maliyeti (₺)	Toplam Tedarik Maliyeti (₺)	Sabit Maliyetler (₺)	Toplam Maliyet (₺)
01	26	27.738	70.345	21.146	721.180	8.440	750.766
02	19	37.185	64.680	19.454	706.506	6.240	732.200
03	26	27.173	61.672	18.539	706.506	8.460	733.504

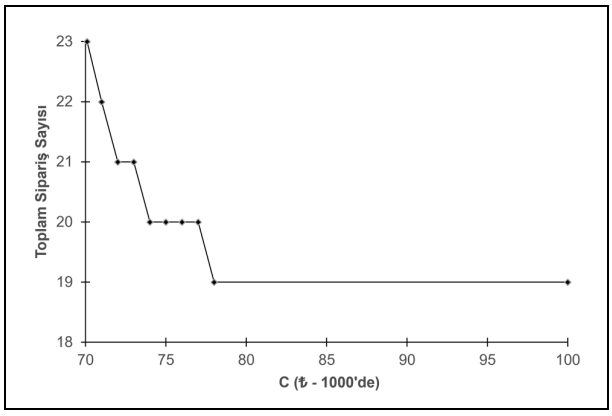
İkinci olarak, envanterde endüstriyel yağı depolamanın maliyetinin toplam sipariş sayısına etkisi incelenmiştir (Şekil 3). Bölüm 4.1'de bahsedildiği üzere, mevcut koşullar altında, bir birim malı envanterde depolamanın yıllık masrafının birim tedarik maliyetinin %30'u civarı olduğu tahmin edilmektedir. Şekil 3'te verilen grafik, sipariş sayısı bu parametrenin değeri arasında yüksek bir korelasyon olduğunu göstermektedir.



Şekil 3. Değişen envanter tutma maliyet oranı değerlerine göre toplam sipariş sayısındaki değişiklik.

Figure 3. Total number of order vs. ınventory holding cost values.

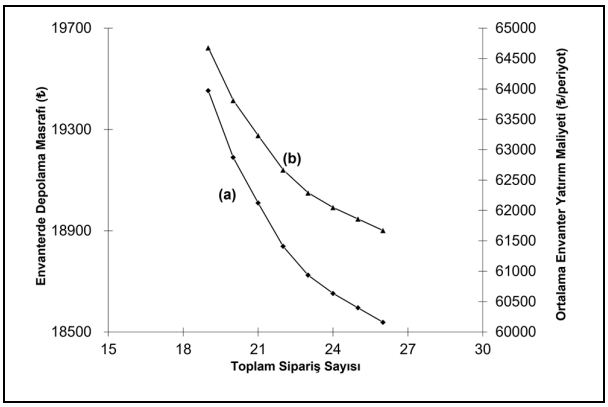
Ek olarak, azami uygulanabilir envanter yatırımının toplam sipariş sayısı üzerine etkisi analiz edilmiştir (Şekil 4). Envanter yatırım kapasitesindeki artışın, modeli daha az sıklıkta siparişler vererek envanterde daha fazla kalem tutmaya zorladığı görülmektedir. Normal koşullarda, şirketin finansal gücünün yüksek olmasından dolayı, bu parametrenin değeri çok büyük bir sayı olarak alınmıştır. Bu değer model içerisinde 77.000 ₺'nin altına indirildiği durumlarda, sipariş sayılarında artışların başladığı gözlenmektedir. Buna ek olarak, talep değerlerinin varil sayısı olarak hesaplanması ve her öğenin belirli bir emniyet seviyesine sahip olması nedeniyle, envanterin hiçbir öğe için hiçbir zaman tamamen tükenmemesi beklenmektedir. Dolayısıyla, envanter yatırım kapasitesi parametresi belirli bir eşik değerinin altına düştüğünde, modelin beklendiği gibi uygulanabilir bir çözüm üretemediği de gözlemlenmiştir.



Şekil 4. Değişen maksimum envanter yatırımı değerlerine göre toplam sipariş sayısındaki değişiklik.

Figure 4. Total number of order vs. maximum ınventory ınvestment values.

Son olarak, kısıt (14), modeli farklı seviyelerde sipariş vermeye zorlamak için değiştirilmiştir. Değişken sipariş sayılarına göre, ortalama envanter yatırımı ve envanter tutma maliyetindeki değişiklikleri gösteren sonuçlar Şekil 5'te gösterilmektedir. Toplam sipariş sayısındaki artışın, modeli envanterde daha az kalem tutmaya zorladığı, böylece sipariş sayısı arttıkça her iki maliyet parametresinin de azaldığı görülmektedir.



Şekil 5. Değişen sipariş sayılarına göre envanterde tutma maliyetindeki. (a): Ortalama envanter yatırımındaki. (b): değişiklikler.

Figure 5. Inventory holding cost. (a): and Avr. Inventory Investment. (b): vs. Total # of Order.

4.4 Dönen planlama ufku envanter analizi

Bir envanter sisteminde, planlama süresi (ufku) boyunca dahili ve harici birçok faktörden kaynaklanabilecek belirsizlikler mevcuttur. Örneğin, sistemin beklenmedik duruş süreleri yedek parça talebinde belirsizliğe neden olabilmektedir. Ayrıca, sipariş verme ile ürünü elde etme arasındaki zaman olarak tanımlanan teslim süresindeki belirsizlikler genellikle tedarikçilerden kaynaklı harici bir faktör olarak düşünülür ve yine envanterde bir belirsizliğe neden olabilir. Bunlara ek olarak, diğer yönetimsel bakım planlaması kararları da yedek parça envanter politikasında belirsizlikler oluşturabilmektedir.

Modelin verdiği kararların, sistemin dinamik doğasını göz önünde bulundurarak, değişen koşullara uygun olmasını sağlamak için dönen planlama ufku analizi yapılmıştır. Bu bağlamda, modelin optimizasyon sonuçları elde edildikten sonra, sabit tutulan periyodik kararlar, değişen koşullar dikkate alınarak yeniden uygulanmıştır. Daha sonra, ilgili değişkenler, bu uygulamadan elde edilen gerçek sonuçlar dikkate alınarak bir sonraki dönem için güncellenmiştir. Böylelikle, veri gerçekleştirme süreci, sonunda yeni bir optimizasyon planı elde edilene kadar planlama süresi boyunca tekrarlanmıştır. Bu kapsamda, şirketteki uzmanların, her bir envanter türünün gerçekleşen kullanım miktarları üzerine sağladığı öznel veri ve öngörüler ışığında, bir stokastik talep veri seti oluşturulmuştur. Sonrasında, stokastik talebe bağlı olarak envanter yokluğu olduğu durumlar kaydedilmiş, on iki aylık planlama süresi (ufku) için bir maliyet fonksiyonu oluşturulmuştur. Bu çalışmaya ilişkin sonuçlar Tablo 3'te gösterilmektedir.

Talep belirsizliğini göz önüne alan dönen planlama ufku konseptinin, sistemdeki mevcut maliyetler ve stokta tükenme sonucu ortaya çıkan maliyetler arası bir denge oluşturarak probleme yeni bir boyut getirdiği, karşılanamayan talebi tespit etmede fayda sağladığı görülmüştür. Şirketin uygulamasına

kıyasla daha az sayıda sipariş verildiğinden, diğer maliyetlerin dolayısıyla toplam maliyetin daha yüksek olmasına rağmen, sabit maliyet değerlerinin daha düşük olduğu gözlemlenmiştir.

Tablo 3. Stokastik talep verileri ile dönen planlama ufku uygulamasından elde edilen sonuçlar.

Table 3. Outputs obtained from one implementation of the stochastic demand data on rolling horizon basis.

Toplam Sipariş Sayısı	24
Karşılanamayan Talep Sayısı	5
Envanter Tutma Maliyeti (₺)	21.270
Toplam Tedarik Maliyeti (₺)	745.668
Sabit Maliyetler (₺)	7.840
Toplam Maliyet (₺)	774.778

5 Sonuçlar

Yedek parça envanter yönetimi, özellikle seri ve aralıksız üretim sağlamak için kompleks makinelere ihtiyaç duyan şirketler için hayati öneme sahiptir. Bu çalışmada, Türkiye'nin çoklu proses ile büyük ölçekli üretim yapan bir madencilik şirketi için, yedek parça envanter ve tedarik sistemi üzerine bir optimizasyon çalışması yapmayı amaçlamaktadır. Çalışma içerisinde incelenen karışık tam sayılı doğrusal programlama modelinde, deterministik dinamik talep ve ihmal edilebilir teslim süresi göz önünde bulundurulmuştur. Ayrıca, sürekli stok kontrolü ve blok-tabanlı önleyici bakım politikalarını da dikkate alarak, toplam maliyetin en aza indirecek şekilde çok öğeli, çok tedarikçili bir sistem için önerilmiştir. Bu bağlamda problem, envanter yatırımı ve emniyet seviyeleri üzerindeki kısıtlar dikkate alınarak, sipariş ve envanter kararları arasında kurulan bir denge olarak oluşturulmuştur.

Veriler elde edildikten sonra, karışık tam sayılı doğrusal programlama problemi, LINGO 18.0 yazılımı içerisinde çalıştırılmıştır. Elde edilen sonuçlar dikkate alındığında, önerilen modelin şirket tarafından uygulanmakta olan mevcut sistemi, daha az sayıda sipariş vererek finansal açıdan geliştirebileceği tespit edilmiştir. Bunun yanında, matematiksel modelin şirketin mevcut politikasına kıyasla avantajını daha net şekilde göstermek amacıyla, optimizasyon modeli, şirketin mevcut politikasında verilen yıllık sipariş adeti kadar sipariş vermeye zorlanmıştır. Böylece, yıllık sipariş adetinin mevcut politika ile aynı kaldığı durumda bile, sipariş zamanı ve siparişte istenilen talep miktarlarındaki değişiklikler ile finansal tasarruflar sağlanabileceğini göstermiştir. Ayrıca, etkin parametrelerin model sonuçlarına etkilerini değerlendirebilmek için bir duyarlılık analizi yapılmıştır. Bu analiz sonucunda, hem sabit maliyet değerlerindeki hem de envanter yatırım kapasitesindeki artışın, modeli daha az sıklıkta siparişler vererek envanterde daha fazla kalem tutmaya zorladığı gözlemlenmiştir. Öte yandan, sipariş sayısı ile envanter tutma maliyeti arasında yüksek bir korelasyon olduğu görülmüştür. Buna ek olarak, toplam sipariş sayısındaki artışın, modeli envanterde daha az kalem tutmaya zorladığı, böylece sipariş sayısı arttıkça, ortalama envanter yatırımı maliyetinin azaldığı sonucuna varılmıştır. Duyarlılık analizinin yanı sıra, model çıktılarının sistem belirsizliklere tepkisini değerlendirebilmek amacıyla dönen planlama ufku konsepti oluşturulmuş ve stokastik talebe bağlı maliyet değişimleri gözlenmiştir.

Son olarak, aynı dönen ufuk yaklaşımı kullanılarak, yeni emniyet seviyeleri belirlenebilmektedir. Matematiksel model, simülasyon ortamına uygun olarak çalıştırıldığında, toplam maliyet fonksiyonu ile servis seviyeleri arasında oluşan dengeye bağlı olarak, görece en iyi çözümü sağlayan emniyet seviyesi, yeni emniyet seviyesi olarak önerilebilir. Bu konu, gelecekte yapılacak çalışmalarda değerlendirilebilir. Yine gelecek çalışmalarda düşünülmesi adına, problemin karmaşık yapısına stokastik parça temin süreleri ve bir penaltı (ceza) maliyeti eklenerek uygulanan envanter kuralları içerisinde stokların tükenme durumunun ve bu durumun sistemin toplam maliyeti üzerindeki etkisinin incelenmesi önerilmektedir. Bunlara ek olarak, gelecek çalışmalarda envanter sistemi, yedek parçaların raf ömürleri, sipariş miktarına bağlı indirimler, sınırlı envanter yatırımı kapasitesi ve tek seferde verilmesi gereken minimum sipariş miktarları göz önünde bulundurularak bu yönde geliştirilebilir. Bu entegrasyonlar sonucunda, sistemin optimum sipariş adet ve zamanlarına yönelik değişen kararlarının toplam sistem maliyeti üzerindeki etkisi incelenebilir.

6 Conclusions

Spare parts inventory management becomes a vital topic, especially for companies requiring complex systems to provide mass and continuous production. In this paper, an optimization study was performed for the spare parts inventory and procurement policy of a multi-process large-scale mining company in Turkey. In this basis, a mixed-integer linear programming model was introduced for a multi-item, multi-supplier system under continuous review and block-based preventive maintenance policy, considering the deterministic dynamic demand and negligible lead time, in order to optimize the order quantity and schedule in such a way that the total cost is minimized. Indeed, the problem was constructed as a trade-off between ordering and inventory decisions by considering the constraints on inventory investment and safety stock levels.

After the data is acquired, the mixed-integer linear problem was run by using LINGO 18.0 software. It was observed from the outputs that the proposed model has improved the existing inventory system from an economic viewpoint, by placing less number of orders. Besides, the model was modified to ensure that the model places the same number of orders as much as it is in the existing system, so that the difference between these two approaches can be observed more apparently. Thus, even with the same number of orders, the results showed that the model still offers a better solution than the current policy, by implementing some alterations in the order schedule. Moreover, a sensitivity analysis was carried out to compare the findings considering the changing parameter values. It was observed that the increase fixed cost values and inventory investment capacity forces the model to keep more items in the inventory by placing less frequent orders. On the other hand, a high correlation was observed between the number of orders and the inventory holding cost. Besides, it was also deduced that the increase in the total order number triggers the model to store fewer items in the inventory, so the average inventory investment has a descending trend with the rise in the order numbers. In addition, the rolling horizon framework was proposed to assure that the model decisions comply with the changing conditions by considering the dynamic nature of the system. The realization of random cost function depending on the stochastic demand was performed for a finite time horizon.

Finally, using the same rolling horizon approach, the new safety stock levels can be determined. The mathematical model is run in accordance with the simulation environment, and the safety stock level providing relatively the best solution is proposed as

the new safety stock level, depending on the trade-off created between total cost function and the required service levels. This topic may be extended for further studies. Moreover, it is recommended to be considered in the future studies that examining the stockout condition and its effect on the total system cost under the inventory policy applied, which created by taking into consideration of stochastic lead times and a penalty cost. In addition to these, in future studies, the inventory system may be improved by taking into account the shelf life of the spare parts, quantity discounts, inventory investment capacity and minimum order quantities. As a result of these integrations, the effect of the new inventory system decisions on the total system cost may be examined.

7 Teşekkür

Yazarlar, veri ve deneyim paylaşımı sunarak çalışmaya katkı sağlayan Tuğçe BEŞİR, Zafer GÜVEN ve Zafer Ömer GÜNİNDİ'ye teşekkürlerini iletmektedir. Aynı zamanda, çalışmanın içerik ve yapısını geliştirmeye katkı sunan üç anonim hakeme de teşekkür edilmektedir.

8 Yazar katkı beyanı

Gerçekleştirilen çalışmada, Sena ŞENSES, Onur GÖLBAŞI ve İsmail Serdar BAKAL araştırma kapsamının belirlenmesi ve literatür taramasında; Sena ŞENSES modelin oluşturulması ve çalıştırılması, sonuçların analizi ve görsellerin oluşturulmasında; Onur GÖLBAŞI uygulama alanının belirlenmesi ve kullanılan verilerin temininde; İsmail Serdar BAKAL modelin oluşturulması ve doğrulanmasında; Sena ŞENSES, Onur GÖLBAŞI ve İsmail Serdar BAKAL elde edilen sonuçların değerlendirilmesinde; Sena ŞENSES ve Onur GÖLBAŞI makalenin yazımı konularında katkı sunmuşlardır.

9 Etik kurul onayı ve çıkar çatışması beyanı

Hazırlanan makalede etik kurul izni alınmasına gerek yoktur.

Hazırlanan makalede herhangi bir kişi/kurum ile çıkar çatışması bulunmamaktadır.

10 Kaynaklar

[1] Heizer J, Render B, Munson C. *Principles of Operations Management: Sustainability and Supply Chain Management*. 10th ed. London, England, Pearson Education Limited, 2017.

[2] Kennedy WJ, Wayne Patterson J, Fredendall LD. "An overview of recent literature on spare parts inventories". *International Journal of Production Economics*, 76(2), 201-215, 2002.

[3] Rego JRD, Mesquita MAD. "Controle de estoque de peças de reposição: Uma revisão da literatura". *Production*, 21(4), 645-655, 2011.

[4] Anonim. "Global Platform for Industrial Demand & Supply". https://industrialecart.com/blog/what-are-industrial-lubricants-and-their-types/ (25.11.2018).

[5] Suwondo E, Yuliando, H. "Dynamic lot-sizing problems: a review on model and efficient algorithm". *Agroindustrial Journal*, 1(1), 36-49, 2012.

[6] Lu L, Qi X. "Dynamic lot sizing for multiple products with a new joint replenishment model". *European Journal of Operational Research*, 212(1), 74-80, 2011.

[7] Noblesse AM, Boute RN, Lambrecht MR, Van Houdt B. "Lot sizing and lead time decisions in production/inventory systems". *International Journal of Production Economics*, 155, 351-360, 2014.

[8] You M, Xiao Y, Zhang S, Zhou S, Yang P, Pan X. "Modeling the capacitated multi-level lot-sizing problem under time-varying environments and a fix-and-optimize solution approach". *Entropy*, 21(4), 1-15, 2019.

[9] Sonntag D, Kiesmüller GP. "Disposal versus rework-Inventory control in a production system with random yield". *European Journal of Operational Research*, 267(1), 138-149, 2018.

[10] Brulard N, Cung VD, Catusse N, Dutrieux C. "An integrated sizing and planning problem in designing diverse vegetable farming systems". *International Journal of Production Research*, 57(4), 1018-1036, 2019.

[11] Li Y, Hu G. "Computers & Industrial Engineering Shop floor lot-sizing and scheduling with a two-stage stochastic programming model considering uncertain demand and workforce efficiency". *Computers & Industrial Engineering*, 111, 263-271, 2017.

[12] Altendorfer K. "Effect of limited capacity on optimal planning parameters for a multi-item production system with setup times and advance demand information". *International Journal of Production Research*, 57(6), 1892-1913, 2019.

[13] Song DP, Dong JX, Xu J. "Integrated inventory management and supplier base reduction in a supply chain with multiple uncertainties". *European Journal of Operational Research*, 232(3), 522-536, 2014.

[14] Song DP. "Optimal integrated ordering and production policy in a supply chain with stochastic lead-time, processing-time, and demand". *IEEE Transactions on Automatic Control*, 54(9), 2027-2041, 2009.

[15] Taleizadeh AA, Niaki STA, Barzinpour F. "Multiple-buyer multiple-vendor multi-product multi-constraint supply chain problem with stochastic demand and variable lead-time: A harmony search algorithm". *Applied Mathematics and Computation*, 217(22), 9234-9253, 2011.

[16] Sana SS. "A production-inventory model of imperfect quality products in a three-layer supply chain". *Decision Support Systems*, 50(2), 539-547, 2011.

[17] Pal B, Sana SS, Chaudhuri K. "A three layer multi-item production-inventory model for multiple suppliers and retailers". *Economic Modelling*, 29(6), 2704-2710, 2012.

[18] Wang C, Huang R, Wei Q. "Integrated pricing and lot-sizing decision in a two-echelon supply chain with a finite production rate". *International Journal of Production Economics*, 161, 44-53, 2015.

[19] Tewary M, Das D, Hui NB. "Inventory control model of a 4-Echelon production-distribution system". *IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management*, Singapore, 10-13 December 2017.

[20] Das D, Hui NB, Jain V. "Optimization of stochastic, (Q, R) inventory system in multi-product, multi-echelon, distributive supply chain". *Journal of Revenue and Pricing Management*, 18(5), 405-418, 2019.

[21] Samal NK, Pratihar DK. "Joint optimization of preventive maintenance and spare parts inventory using genetic algorithms and particle swarm optimization algorithm". *International Journal of Systems Assurance Engineering and Management*, 6(3), 248-258, 2015.

[22] Panagiotidou S. "Joint optimization of spare parts ordering and maintenance policies for multiple identical items subject to silent failures". *European Journal of Operational Research*, 235(1), 300-314, 2014.

[23] Kabir AZ, Al-Olayan AS. "Joint optimization of age replacement and continuous review spare provisioning policy". *International Journal of Operations & Production Management*, 14(7), 53-69, 1994.
[24] Kabir AZ, Al-Olayan AS. "A stocking policy for spare part provisioning under age based preventive replacement". *European Journal of Operational Research*, 90(1), 171-181, 1996.
[25] Kabir AZ, Farrash SHA. "A fixed interval ordering policy for joint optimization of age replacement and spare part provisioning". *International Journal of Systems Science*, 28(12), 1299-1309, 1997.
[26] Hu R, Yue C, Xie J. "Joint optimization of age replacement and spare ordering policy based on genetic algorithm". *International Conference on Computational Intelligence and Security*, Suzhou, China, 13-17 December 2008.
[27] Louit D, Pascual R, Jardine A. "Dynamic optimization model for mining equipment repair by using the spare-parts inventory". *Journal of Mining Science*, 46(4), 394-403, 2010.
[28] Panagiotidou S. "Joint optimization of spare parts ordering and age-based preventive replacement". *International Journal of Production Research,* 58(20), 6283-6299, 2020.
[29] Ilgin MA, Tunali S. "Joint optimization of spare parts inventory and maintenance policies using genetic algorithms". *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 34(5-6), 594-604, 2007.
[30] Huang R, Meng L, Xi L, Liu CR. "Modeling and analyzing a joint optimization policy of block-replacement and spare inventory with random-lead time". *IEEE Transactions on Reliability*, 57(1), 113-124, 2008.
[31] Kader B, Sofiene D, Nidhal R, Walid E. "Jointly optimal preventive maintenance under spare parts order strategy". In *IFAC Proceedings Volumes*, 46(9), 1376-1380, 2013.
[32] Mardin F, Dekker R. "Simultaneous optimization of block replacement and spare part ordering time for a multi component system with separate spare part ordering for block and failure replacements". *Journal of Engineering and Technological Sciences*, 48(5), 495-522, 2016.
[33] Yang R, Kang J. "A joint optimal policy of block preventive replacement and spare part inventory". International *Journal of Systems Assurance Engineering and Management*, 8(4), 740-746, 2017.
[34] Wang W. "A stochastic model for joint spare parts inventory and planned maintenance optimisation". *European Journal of Operational Research*, 216(1), 127-139, 2012.
[35] Vaughan TS. "Failure replacement and preventive maintenance spare parts ordering policy". *European Journal of Operational Research*, 161(1), 183-190, 2005.
[36] Wang Y, Zhao J, Cheng Z, Yang Z. "Integrated decision on spare parts ordering and equipment maintenance under condition-based maintenance strategy". *Eksploatacja i Niezawodnosc*, 17(4), 591-599, 2015.
[37] Chen X, Xu D, Xiao L. "Joint optimization of replacement and spare ordering for critical rotary component based on condition signal to date". *Eksploatacja i Niezawodnosc*, 19(1), 76-85, 2017.
[38] Nguyen KA, Do P, Grall A. "Joint predictive maintenance and inventory strategy for multi-component systems using birnbaum's structural importance". *Reliability Engineering and System Safety*, 168, 249-261, 2017.
[39] Olde Keizer MCA, Teunter RH, Veldman J. "Joint condition-based maintenance and inventory optimization for systems with multiple components". *European Journal of Operational Research*, 257(1), 209-222, 2017.
[40] Zhang X, Zeng J. "Joint optimization of condition-based opportunistic maintenance and spare parts provisioning policy in multiunit systems". *European Journal of Operational Research*, 262(2), 479-498, 2017.
[41] Ghodrati B, Akersten PA, Kumar U."Spare parts estimation and risk assessment conducted at choghart iron ore mine: a case study". *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, 13(4), 353-363, 2007.
[42] Wang L, Chu J, Mao W. "A condition-based replacement and spare provisioning policy for deteriorating systems with uncertain deterioration to failure". *European Journal of Operational Research*, 194, 184-205, 2009.
[43] Louit D, Pascual R, Banjevic D, Jardine A. "Optimization models for critical spare parts ınventories - a reliability approach". *Journal of the Operational Research Society*, 62, 992-1004, 2011.
[44] Martínez A, Pascual R, Maturana S. "A methodology for integrated critical spare parts and insurance management". *Applied Stochastic Models in Business and Industry*, 32(1), 90-98, 2016.
[45] Rosienkiewicz M, Chlebus E, Detyna J. "A hybrid spares demand forecasting method dedicated to mining industry". *Applied Mathematical Modelling*, 49, 87-107, 2017.
[46] Zhang Q, Lv X, Shi J. "Research on inventory sharing model of frequent mining machinery maintenance spare parts". *12th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications,* Siem Reap, Cambodia, 18-20 June 2017.