

T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

OTOMOTİV SEKTÖRÜNDE YEDEK PARÇA DAĞITIM SİSTEMİ
TASARIMI

Sinan ŞAHİN

DOKTORA TEZİ

Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı

Endüstri Mühendisliği Programı

Danışman

Prof. Dr. Umut Rıfat TUZKAYA

Ocak, 2021

T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

OTOMOTİV SEKTÖRÜNDE YEDEK PARÇA DAĞITIM SİSTEMİ
TASARIMI

Sinan ŞAHİN tarafından hazırlanan tez çalışması 28.01.2021 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı, Endüstri Mühendisliği Programı **DOKTORA TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Prof. Dr. Umut Rifat TUZKAYA
Yıldız Teknik Üniversitesi
Danışman

Jüri Üyeleri

Prof. Dr. Umut Rifat TUZKAYA, Danışman
Yıldız Teknik Üniversitesi

Doç. Dr. Doğan ÖZGEN, Üye
Yıldız Teknik Üniversitesi

Doç. Dr. Sinan APAK, Üye
Maltepe Üniversitesi

Doç. Dr. Nezir AYDIN, Üye
Yıldız Teknik Üniversitesi

Doç. Dr. Murat BASKAK, Üye
İstanbul Teknik Üniversitesi

Danışmanım Prof. Dr. Umut Rifat TUZKAYA sorumluluğunda tarafımca hazırlanan Otomotiv Sektöründe Yedek Parça Dağıtım Sistemi Tasarımı başlıklı çalışmada veri toplama ve veri kullanımında gerekli yasal izinleri aldığımı, diğer kaynaklardan aldığım bilgileri ana metin ve referanslarda eksiksiz gösterdiğimi, araştırma verilerine ve sonuçlarına ilişkin çarpıtma ve/veya sahtecilik yapmadığımı, çalışmam süresince bilimsel araştırma ve etik ilkelerine uygun davrandığımı beyan ederim. Beyanımın aksinin ispatı halinde her türlü yasal sonucu kabul ederim.

Sinan ŞAHİN

TEŞEKKÜR

Tez çalışmam sırasında kendisinden çok şey öğrendiğim, tüm aşamalarda yönlendirmesini ve desteğini gördüğüm, başta tez danışmanım Prof. Dr. Umut Rıfat Tuzkaya'ya ve tez izleme komitemde bulunan hocalarım Doç. Dr. Doğan Özgen'e ve Doç Dr. Sinan Apak'a sonsuz teşekkürlerimi sunarım. Çalışma ve eğitim hayatım boyunca, kendimi geliştirmem için fırsatlar yaratan ve cesaretlendiren yöneticilerim Olivier Jaumont'a, Hormoz Baharvand'a, Holger Jetses'e ve Barış Göncü'ye teşekkür ederim.

Bugün bu çalışmaları yapabilir duruma gelmemde en büyük katkıya sahip olan ve üzerimdeki emeklerini hiçbir zaman ödeyemeyeceğim aileme minnettarım, sonsuz teşekkürlerimle.

Sinan ŞAHİN

İÇİNDEKİLER

SİMGE LİSTESİ	vii
KISALTMA LİSTESİ	viii
ŞEKİL LİSTESİ	x
TABLO LİSTESİ	xii
ÖZET	xiv
ABSTRACT	xvi
1 GİRİŞ	1
1.1 Literatür Özeti	3
1.2 Tezin Amacı	5
1.3 Orijinal Katkı	6
2 OTOMOTİV SEKTÖRÜNDE YEDEK PARÇA DAĞITIMI	7
2.1 Otomotiv Sektörü	7
2.1.1 Motor Türlerine Göre Araçlar	9
2.1.2 Kullanım Türlerine Göre Araçlar	10
2.1.3 Bağlantı Türlerine Göre Araçlar	11
2.1.4 İş Modellerine Göre Araçlar	11
2.2 Otomotiv Yedek Parçaları ve Eklemeli Üretim Teknikleri	12
2.2.1 FDM Teknolojisi	15
2.2.2 SLA Teknolojisi	16
2.2.3 SLS Teknolojisi	17
2.2.4 EBM Teknolojisi	18
2.2.5 SLM Teknolojisi	20
2.3 Otomotiv Yedek Parça Tedarik Zinciri	21
3 LİTERATÜR ARAŞTIRMASI	25
3.1 Optimum Sonuç Veren Çalışmalar	35
3.2 Optimuma Yaklaşık Sonuç Veren Çalışmalar	37

3.3 Diğer Metotların Kullanıldığı Çalışmalar	39
3.4 Genel Değerlendirme	43
4 MODEL ÇALIŞMASI	44
4.1 Modelleme Güçlükleri.....	46
4.2 Modelin Yapısı.....	47
4.2.1 Model Varsayımları	48
4.2.2 Üretim Operasyonu İlgili Özellikler	49
4.2.3 Taşıma Operasyonu İlgili Özellikler	49
4.2.4 Depolama Operasyonu İlgili Özellikler	50
4.2.5 Modeldeki Maliyet Kalemleri.....	50
4.3 Model Formülasyonu.....	51
4.3.1 Modelde Kullanılan İndisler, Parametreler, Karar Değişkenleri.....	51
4.3.2 Amaç Fonksiyonu	53
4.3.3 Modelin Kısıt Seti.....	56
5 ÇÖZÜM YAKLAŞIMLARI	58
5.1 Karma Tamsayılı Programlama.....	58
5.2 Meta-Sezgisel Yöntemler	59
5.2.1 Genetik Algoritma	60
5.2.2 Fizik Temelli Algoritmalar	74
5.2.3 Sürü Zekası Algoritmaları	75
6 SAYISAL UYGULAMA	76
6.1 Problemin Tanıtılması	76
6.2 Verilerin Toplanması.....	78
6.3 Modelin Tamsayılı Programlama ile Çözülmesi.....	81
6.3.1 Çözüm Tekniğinin Küçük Veri Setiyle Sınanması	81
6.3.2 Problemin Çözümü	85
6.3.3 Modelin Hacminin Genişletilmesi Durumu	87
6.4 Modelin Genetik Algoritma ile Çözülmesi	88

6.4.1 Taşıma Ağıının Belirlenmesi	89
6.4.2 Kromozom Yapısının Oluşturulması.....	89
6.4.3 Çözüm Algoritmasının Oluşturulması.....	90
6.4.4 Maliyet Matrisi	92
6.4.5 Uygunluk Fonksiyonu.....	94
6.4.6 Seleksiyon	94
6.4.7 Çaprazlama	94
6.4.8 Mutasyon	95
6.4.9 Çözüm Tekniğinin Küçük Veri Setiyle Sınanması	95
6.4.10 Problemin Çözümü.....	97
6.5 Çözüm Tekniklerinin Karşılaştırılması.....	98
6.6 Senaryo Analizleri.....	99
6.6.1 Senaryo 1: Talebin azalması veya artması durumu.....	99
6.6.2 Senaryo 2: Tedarik zincirinden 3D yazıcıların çıkartılması durumu.....	100
6.6.3 Senaryo 3: Üretim merkezlerine 3D yazıcı satın alınması durumu.....	101
6.6.4 Senaryo 4: Farklı filament çeşitleriyle üretim yapılması durumu	102
7 SONUÇ VE ÖNERİLER	103
KAYNAKLAR	107
TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR	123

SİMGE LİSTESİ

j	Bitmiş ürünler
k	Dağıtım merkezleri
s	Depolama merkezleri
a	Eklemeli üretim merkezleri (3D yazıcılar)
t	Periyot
i	Üretim merkezleri
y	Yarı mamuller

KISALTMA LİSTESİ

3D	3 Boyutlu
ABC	Artificial Bee Colony
ABD	Amerika Birleşik Devletleri
ABS	Acrylonitrile Butadiene Styrene
ACO	Ant Colony Optimization
AGV	Automated Guided Vehicle
AHP	Analytic Hierarchy Process
AI	Artificial Intelligence
APQP	Advanced Product Quality Planning
BAE	Birleşik Arap Emirlikleri
BOM	Bill of Material
CAD	Computer Aided Design
DEA	Data Envelopment Analysis
DNA	Deoxyribonucleic Acid
EBM	Electron Beam Melting
ERP	Enterprise Resource Planning
EU	European Union
EV	Electric Vehicle
FDM	Fused Deposition Modelling
GA	Genetic Algorithm
HGA	Hybrid Genetic Algorithm
HHS	Hybrid Harmony Search
HV	Hybrid Vehicle
ICE	Internal Combustion Engine
IoT	Internet of Things
IP	Integer Programming
LP	Linear Programming
MaaS	Mobility as a Service
MGA	Micro Genetic Algorithm
MILP	Mixed Integer Linear Programming
MIP	Mixed Integer Programming

MİN	Minimum
ML	Machine Learning
MPC	Model Predictive Control
NN	Neural Networks
OEM	Original Equipment Manufacturer
OES	Original Equipment Supplier
PSO	Particle Swarm Optimization
SA	Simulated Annealing
SKU	Stock Keeping Unit
SLA	Stereolithography
SLM	Selective Laser Melting
SLS	Selective Laser Sintering
SWOT	Strengths, Weaknesses, Opportunities, Threats
TL	Türk Lirası
V2C	Vehicle to Cloud
V2I	Vehicle to Infrastructure
V2P	Vehicle to Pedestrian
V2V	Vehicle to Vehicle
V2X	Vehicle to Everything
VSM	Value Stream Mapping

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 1.1	Literatür araştırması sırasında incelenen sektörler	3
Şekil 1.2	Matematiksel çözüm yaklaşımlarının dağılımı	4
Şekil 1.3	Çalışmaların yıllara göre dağılımı	4
Şekil 1.4	Literatüre katkı sağlayan ülkeler (ilk 10)	5
Şekil 2.1	Otomotiv sektörüne katkı sağlayan sektörler [4]	7
Şekil 2.2	Otomotiv sektörünün katkı sağladığı sektörler [4]	8
Şekil 2.3	Otomotiv sektöründe gelir ve kârlılık dağılımı[6]	13
Şekil 2.4	Eklemeli üretim tekniğiyle üretilebilen araç parçaları [10]	14
Şekil 2.5	FDM üretim tezgâhı örneği [12]	15
Şekil 2.6	FDM teknolojisiyle üretilmiş araç konsolu	16
Şekil 2.7	SLA üretim tezgâhı örneği [13]	16
Şekil 2.8	SLA tekniğiyle üretilmiş arka aydınlatma sistemi [14]	17
Şekil 2.9	SLS üretim tezgâhı örneği [15]	18
Şekil 2.10	SLS tekniğiyle üretilmiş hidrolik blok [16]	18
Şekil 2.11	EBM bileşenleri [17]	19
Şekil 2.12	EBM teknolojisiyle üretilmiş titanyum jant [18]	20
Şekil 2.13	SLM teknolojisiyle üretilmiş fren kaliperi [20]	20
Şekil 2.14	Yedek parça dağıtım ağı	21
Şekil 2.15	Eklemeli üretim - tedarik zinciri etki matrisi [10]	24
Şekil 3.1	Çalışmaların yayınlandıkları platformlara göre dağılımları	25
Şekil 3.2	GA'nın kullanıldığı sektörler	43
Şekil 4.1	Tedarik zincirindeki operasyonlar	46
Şekil 4.2	Üzerinde çalışılacak yedek parça dağıtım ağı	47
Şekil 4.3	Tedarik zincirinin yapısı	48
Şekil 5.1	DNA şeritleri [209]	61
Şekil 5.2	Kromozomun yapısı	61
Şekil 5.3	Kromozomal Çaprazlama [208]	62
Şekil 5.4	Mutasyon[208]	63
Şekil 5.5	Kromozomların programlaması ve çözüm haritalaması [206]	64
Şekil 5.6	Tek noktalı çaprazlama örneği	68

Şekil 5.7 Çok noktalı çaprazlama örneği.....	68
Şekil 5.8 Uniform çaprazlama örneği.....	68
Şekil 5.9 Aritmetik çaprazlama örneği	68
Şekil 5.10 Sıralı çaprazlama örneği	69
Şekil 5.11 Pozisyon temelli çaprazlama örneği	69
Şekil 5.12 Sıra temelli çaprazlama örneği.....	69
Şekil 5.13 Dairesel çaprazlama örneği	70
Şekil 5.14 Örnek popülasyonda tek noktalı çaprazlama	70
Şekil 5.15 Bit dönüştürme mutasyonu örneği.....	71
Şekil 5.16 Karıştırma mutasyonu örneği.....	71
Şekil 5.17 Tersinir mutasyon örneği-I.....	71
Şekil 5.18 Tersinir mutasyon örneği-II	71
Şekil 5.19 Ekleme-çıkarma mutasyonu örneği	71
Şekil 5.20 I.Iterasyon sonunda örnek popülasyon	72
Şekil 5.21 Tavlama Benzetimi algoritmasının genel adımları [215]	74
Şekil 5.22 Parçacık sürü optimizasyonunun genel adımları [216]	75
Şekil 6.1 Ürün teknik resmi.....	76
Şekil 6.2 Braket (sol) ve tutucu (sağ).....	77
Şekil 6.3 Tesislerin haritada gösterimi.....	77
Şekil 6.4 Tesislerin arasındaki mesafelerin hesaplanması.....	78
Şekil 6.5 Taşıma ağı.....	89
Şekil 6.6 1.aşamanın kromozom yapısı	90
Şekil 6.7 2.aşamanın kromozom yapısı	90
Şekil 6.8 3.aşamanın kromozom yapısı	90
Şekil 6.9 Genel çözüm prosedürü	91
Şekil 6.10 3.aşama çözüm prosedürü	91
Şekil 6.11 2.aşama çözüm prosedürü	92
Şekil 6.12 1.aşama çözüm prosedürü	92
Şekil 6.13 1.Ebeveyn(yeşil) ve 2. Ebeveyn(mavi) gösterimi.....	94
Şekil 6.14 Çaprazlama işlemi sonrası gen dizilimleri	95
Şekil 6.15 Mutasyon işlemi sonrası gen dizilimleri	95
Şekil 6.16 Iterasyonlarla toplam maliyetin değişimi	97

TABLO LİSTESİ

Tablo 2.1 Otonom araçların seviyeleri [6][7]	10
Tablo 2.2 Otomotiv yedek parça sektörü genel SWOT analizi	22
Tablo 3.1 Konu ile ilgili literatürün sınıflandırılması	26
Tablo 3.1 Konu ile ilgili literatürün sınıflandırılması (devamı).....	27
Tablo 3.1 Konu ile ilgili literatürün sınıflandırılması (devamı).....	28
Tablo 3.1 Konu ile ilgili literatürün sınıflandırılması (devamı).....	29
Tablo 3.1 Konu ile ilgili literatürün sınıflandırılması (devamı).....	30
Tablo 3.1 Konu ile ilgili literatürün sınıflandırılması (devamı).....	31
Tablo 3.1 Konu ile ilgili literatürün sınıflandırılması (devamı).....	32
Tablo 3.1 Konu ile ilgili literatürün sınıflandırılması (devamı).....	33
Tablo 3.1 Konu ile ilgili literatürün sınıflandırılması (devamı).....	34
Tablo 4.1 OEM-OES tedarik zinciri arasındaki farklılıklar [9]	45
Tablo 5.1 Genlerin belirlenmesine dair rastgele atama örneği	65
Tablo 5.2 Örnek popülasyon kromozomlarının değerleri	67
Tablo 5.3 Turnuva seçilimi örneği	67
Tablo 6.1 Tesisler arasındaki mesafeler (km).....	78
Tablo 6.2 BOM (adet)	79
Tablo 6.3 Tesis kapasiteleri	79
Tablo 6.4 Ürünlerin haftalık talepleri (Adet).....	79
Tablo 6.5 Yatırım maliyetleri (TL)	80
Tablo 6.6 Haftalık stok tutma maliyetleri (TL/m ³)	80
Tablo 6.7 Üretim süreleri (adet/dakika)	80
Tablo 6.8 Birim üretim maliyetleri (TL/dakika)	80
Tablo 6.9 Yarımamul ve bitmiş ürünlerin hacim bilgileri (cm ³).....	81
Tablo 6.10 Birim taşıma maliyetleri (TL x10000 km)	81
Tablo 6.11 Üretim merkezinde bitmiş ürün üretimi	82
Tablo 6.12 Üretim merkezinde yarımamul üretimi.....	82
Tablo 6.13 Eklemeli üretim merkezinde yarımamul üretimi.....	83
Tablo 6.14 Depolama-dağıtım merkezleri arasındaki taşıma miktarları	83

Tablo 6.15 Eklemeli üretim merkezi-üretim merkezleri arasındaki taşıma miktarları	84
Tablo 6.16 Üretim merkezi-depolama merkezleri arasındaki taşıma miktarları ..	84
Tablo 6.17 Üretim merkezinde bitmiş ürün üretimi	85
Tablo 6.18 Üretim merkezi-depolama merkezleri arasındaki taşıma miktarları ..	85
Tablo 6.19 Depolama-dağıtım merkezleri arasındaki taşıma miktarları	86
Tablo 6.20 Eklemeli üretim merkezinde yarımamul üretimi.....	86
Tablo 6.20 Eklemeli üretim merkezinde yarımamul üretimi (Devamı)	87
Tablo 6.21 Eklemeli üretim merkezi-üretim merkezleri arasındaki taşıma miktarları	87
Tablo 6.22 Tamsayılı programlamanın limitleri	88
Tablo 6.23 Depolama merkezi ve dağıtım merkezi için maliyet matrisi	93
Tablo 6.24 Üretim merkezi ve depolama merkezi için maliyet matrisi	93
Tablo 6.25 Eklemeli üretim merkezi ve üretim merkezleri için maliyet matrisi ..	93
Tablo 6.26 Depolama-dağıtım merkezleri arasındaki taşıma miktarları	96
Tablo 6.27 Üretim merkezi-depolama merkezleri arasındaki taşıma miktarları ..	96
Tablo 6.28 Eklemeli üretim merkezi-üretim merkezleri arasındaki taşıma miktarları	97
Tablo 6.29 Depolama merkezi-dağıtım merkezi arasındaki taşıma miktarları	98
Tablo 6.30 Üretim merkezi-depolama merkezi arasındaki taşıma miktarları	98
Tablo 6.31 Eklemeli üretim merkezi-üretim merkezi arasındaki taşıma miktarları	98
Tablo 6.32 Çözüm tekniklerinin performanslarının karşılaştırılması.....	99
Tablo 6.33 Talebin azalması veya artması durumu	100
Tablo 6.34 Tedarik zincirinde eklemeli üretim merkezlerinin olmadığı durum..	101
Tablo 6.35 Üretim merkezlerine 3D yatırımı yapılması durumu	101
Tablo 6.36 Farklı filamentlerin kullanılması durumu	102

Otomotiv Sektöründe Yedek Parça Dağıtım Sistemi Tasarımı

Sinan ŞAHİN

Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı

Doktora Tezi

Danışman: Prof. Dr. Umut Rıfat TUZKAYA

Otomotiv yedek parça üretiminin gelişen teknolojiyle beraber daha verimli gerçekleşebilmesi ve farklı fırsatlar sunması, yedek parça tedarik zincirinin yeniden ele alınması gerektiğini göstermektedir. Tez çalışmasında, endüstri 4.0 uygulamalarından biri olan 3D yazıcıların da göz önünde bulundurulduğu, otomotiv yan sanayinde faaliyet gösteren şirketlere yedek parça üretimi ve dağıtım ağı tasarımlarında yol gösterebilecek bir çözüm metodolojisi ortaya konulmaktadır.

Çalışmada klasik üretim tesisleri, 3D yazıcı merkezleri, depolar ve dağıtım merkezlerinin bulunduğu bir tedarik zinciri ağı ele alınmıştır. Üretimi yapılan parçalar, bitmiş ürün ve yarı mamul şeklinde ayrılmış, bunların nerede, ne miktarda, ne zaman, hangi üretim teknolojileri kullanılarak üretilmesi gerektiği, yatırımlar ve hangi depolama alanlarında tutulması gerektiği karar değişkenleri aracılığıyla belirlenmektedir. Üretim kapasitesi kısıtı, depolama alan kısıtı ve talebi karşılama kısıtları altında tam sayılı programlama kullanılarak üretim, dağıtım, envanter elde bulundurma ve yatırım maliyetlerinin toplamının minimizasyonunun gerçekleştirilmesi hedeflenmiştir.

Az sayıda üretim tesisi, 3D yazıcı merkezi, depo ve dağıtım merkezinin bulunduğu bir ağ modellenmiş, üzerinde belirli sayıda bitmiş ürün ve yarı mamul hareketlerini baz alan bir örnek için kodlanarak çözüm elde edilmiştir. Envanter elde bulundurma maliyetleri, birim taşıma maliyeti, üretim zamanları ve maliyetleri, gereken alanlar, tesisler arasındaki mesafeler, taşıma süreleri, ürün ağaçları, dağıtım merkezindeki zamana bağlı talepler, yatırım maliyetleri parametreleri kullanılmış ve dal-sınır algoritması ile optimum çözüme ulaşılmıştır. Model büyüdüğünde tamsayılı programlama yetersiz kaldığından, probleme özgü genetik algoritma modeli geliştirilmiştir. Çalışmanın sonunda, 3D yazıcıların kullanımının göreceli olarak daha az talebe sahip ürünlerin üretiminde maliyetleri düşürdüğü görülmüş, farklı tesislerde tüketilmesi gereken ortak yarı-mamullerin çok sayıda üretiminin klasik üretim tesislerinde üretimiyle birim maliyetleri düşürdüğü gözlemlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Otomotiv sektörü, yedek parça dağıtım ağı tasarımı, endüstri 4.0, 3D yazıcılar

Spare Part Distribution System Design in Automotive Industry

Sinan ŞAHİN

Department of Industrial Engineering

Doctor of Philosophy Thesis

Advisor: Prof. Dr. Umut Rifat TUZKAYA

Developments in manufacturing technologies and new opportunities lead to reconsider to redesign of spare part supply chain. In this thesis, 3D printing technology which is one of the most important application of industry 4.0 has been studied for determining new opportunities, different ways of manufacturing spare parts and integrated supply chain in automotive industry.

In this study, manufacturing facilities, 3D printing centers, warehouses, distribution centers have been taken into account in supply chain design. Parts have been examined in two fields such as finished goods and semi-finished goods and quantity of products, timing, technology to be used, assigned facility, investments, warehouse for storage are considered as decision variables. The output of this study proposing a mathematical model which minimize the sum of the costs of production, distribution and inventory holding costs under constraints of capacity of manufacturing facilities, warehouse's area, demand.

A sample supply chain has been designed with limited number of manufacturing facility, 3D printing centers, warehouses, distribution centers, finished goods and semi-finished goods for using in mathematical modelling and problem solving. Inventory holding cost, unit transportation cost, production time and cost, needed space, distances between facilities, transportation time, bill of materials, demand in periods and investment cost parameters have been used in mathematical model and reached to optimum solution with branch and bound algorithm. When the model size bigger, integer programming becomes insufficient. Therefore, a unique genetic algorithm has been demonstrated for the problem. At the end of study, we have observed that 3D printers reduce the production cost for low runners and using classical manufacturing technics&inventory pooling for high runners give opportunity to reduce unit costs.

Keywords: Automotive industry, spare part supply chain, industry 4.0, 3D printing

Otomotiv sektörü, 2017 yılında yapılan araştırmalara göre dünya ekonomisinin yaklaşık %5'ini oluşturmaktadır [1] ve yine 2017 yılı verilerine göre dünyada yaklaşık 97 milyon taşıt üretilmiştir [2]. Her yıl üretilen ve piyasaya sürülen taşıtlarla beraber günümüzde yaklaşık 1.250.000.000 taşıtın kullanımda olduğu düşünülmektedir [3]. Ulaşım gibi önemli bir ihtiyacın giderilmesi, buna bağlı olarak yoğun talebin karşılanması ve doğrudan-dolaylı bir şekilde milyonlarca insana istihdam yaratması, ülke ve dünya ekonomisine katkısı sektörün önemini açıkça ortaya koymaktadır. Tüm bu sistemin devamlılığının sağlanmasında üretim ve üretim sonrası faaliyetlerin organizasyonu büyük önem arz etmektedir. Müşteri ve servis ağının genişliği ve çeşitliliği, yıllık üretimin yaklaşık 13 kat büyüklüğüne ulaşmış olan taşıt sayısı, yedek parça üretiminin gelişen teknolojiyle beraber daha verimli gerçekleşmesi ve farklı fırsatlar sunması, yedek parça tedarik zincirinin yeniden ele alınması gerektiğini göstermektedir.

Otomotiv yedek parça üretimi ve dağıtımı, yan sanayi tedarik zinciri süreçlerinden ayrılmaktadır. Sektörde orijinal yedek parça temin süresi genellikle 10 yıl olacak şekilde anlaşmalarda belirtilir. Otomotiv yan sanayinde, genellikle kalıp vb. yatırımlar OEM tarafından karşılanır ve herhangi bir değişiklik olmadığı sürece otomotiv yan sanayi şirketi bu kalıplarla üretimlerine devam ederler. Bu da beraberinde, üretim planlamasını, envanter planlamasını, işgücünün organizasyonunu, kalıpların ve ilgili ekipmanların saklanması, parçanın üretimine özgü kalite ve proses spesifikasyonlarının eğitimli personeller tarafından yıllar sonra dahi uygulanabilir olmasını gerektirir. Yeni başlayan projeler, şirkete katılan yeni personeller ve çalışanların şirketten ayrılması, depolama ve üretim alanlarının kısıtlı olması, gelişen teknolojiyle beraber verimsiz süreçlerin ortadan kaldırılması, hammadde veya yarımamul tedarik imkânlarının zamanla azalması veya yüksek maliyetle karşılanması, talebin değişkenliği, otomotiv yan sanayinde yer alan

şirketler için zorlayıcı olmaktadır. Tez çalışmasında göz önünde bulundurulacak faktörlerden biri bu olmuştur.

Bir takım zorlayıcı faktörlerin yanısıra geliştirilen üretim sistemlerinin, teknolojinin ve dijitalleşmenin sunduğu fırsatlar da zamanla artmaktadır. Yalın üretim teknikleri, çekme sistemleriyle, talebi takip eden üretimi önermektedir ve katma değer yaratmayan işlemlerin ortadan kaldırılmasıyla süreç içi envanter miktarlarının azaltılmasına olanak sağlamaktadır. Toplam verimli bakım, belirsiz makine duruşlarının ortadan kaldırılmasına, standart koşulların garanti altına alınmasına ve makine operatörlerinin çalıştıkları makineler hakkında bilgi sahibi olmasını sağlayarak verimliliği geliştirmeye ve iş kazalarını minimize edilmesine yardımcı olmaktadır. Aynı zamanda, poka-yoke, jidoka gibi kalite araçları kullanılarak hata yapmamayı sağlamak ve yapılsa dahi bunu tespit etmek hedeflenmiştir. Proseslerin ve teknolojilerin iyileştirilmesinde, 6 sigma, kaizen, VSM teknikleri kullanılmaktadır. Proje yönetim sistemleri olgunlaşmaktadır (APQP vb.).

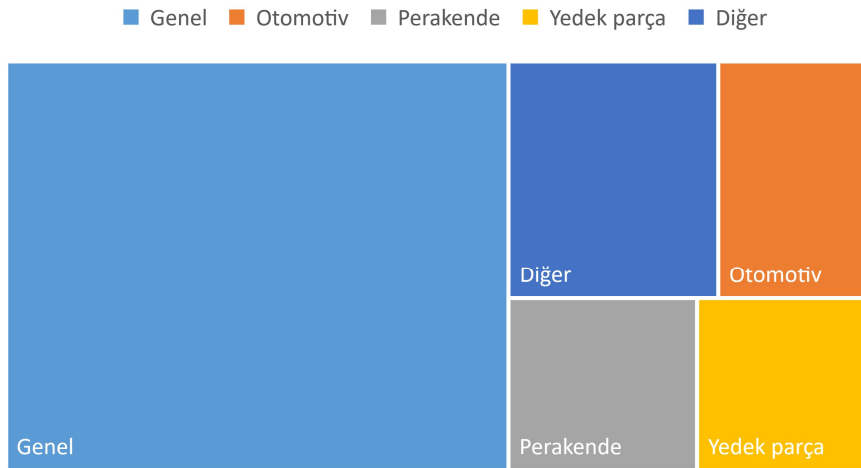
Klasik, konvansiyel üretim teknolojilerinin gelişmesine paralel olarak tüm bunlardan ayrılan, çığır açıcı gelişmelerden biri de üç boyutlu yazıcıların endüstriyel hâle gelmiş olmasıdır. Otomobillerde içten yanmalı motordan, elektrikli motorlara geçişle beraber, sektörde beklentiler de değişmektedir. Geçiş döneminde artan araç çeşitliliği, global çevre problemleri, araçların ağırlıklarının azaltılması gerekliliği, sürekli değişen pazar koşulları, müşterilerin kendi araçlarını tasarlama şansı vb. tüm yeni gelişmeler, tüm tedarik zincirinde dinamizme ve esnekliğe işaret etmektedir. Yeni gelişmelere ayak uydurmak konusunda farklı bir bakış açısı sunmak amacıyla, diğer çalışmalardan farklı olarak tezde üç boyutlu yazıcıların üretim ve dağıtım süreçlerine olan toplam etkisi irdelenecektir.

Operasyon yönetiminde seçeneklerin artması, zaman zaman problemin çözümünü de karmaşıktırmaktadır. Çalışmada, önerilen modelin çözümüne yönelik iki farklı çözüm tekniği detaylı olarak irdelenmiş, genetik algoritma çözüm tekniği modele uyarlanabilecek şekilde geliştirilmiştir. Geliştirilen çözüm metodolojisi sayısal uygulama ile gösterilmiştir ve senaryo analizleriyle beraber sonuçlar yorumlanmıştır.

Tez çalışmasının; 2. bölümünde konu ile ilgili literatür araştırmasına yer verilmiştir, 3. bölümde, otomotiv sektöründe yedek parça dağıtım sistemiyle ilgili bilgiler paylaşılmıştır, 4. bölümde model çalışmasına yer verilmiş, 5. bölümde geliştirilen modele uygun çözüm yaklaşımları tanıtılmıştır, 6. bölümde geliştirilen çözüm tekniğinin gösterimi yapılmıştır, 7. bölüm de ise sonuçlara ve gelecekteki çalışmalara ışık tutabilecek bilgilere yer verilmiştir.

1.1 Literatür Özeti

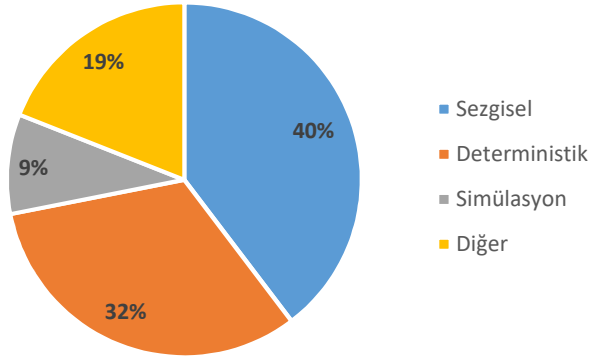
Literatür araştırmasında, yedek parça lojistiğinde geçmiş çalışmaları tespit etmek ve yeni eğilimleri anlamak amacıyla ilgili üretim ve dağıtım sistemlerine ait makale ve tezler incelenmiştir. İncelenen 2000'e yakın yayın içerisinde, tez çalışması konusuna ışık tutabilecek 164 çalışma Bölüm 3'de sınıflandırılmıştır. Ayrıca, 40 adet çalışma kapsamlı bir şekilde açıklanmıştır. Tez konusu olan, otomotiv sektöründe yedek parça dağıtım sistemi tasarımıyla ilgili benzer içeriğe sahip bir yayına rastlanılmamıştır. Sınıflandırılan çalışmalara göre, araştırmaların büyük çoğunluğunun genel tedarik zinciri modelleri üzerine yapıldığı görülmektedir (Şekil 1.1).



Şekil 1.1 Literatür araştırması sırasında incelenen sektörler

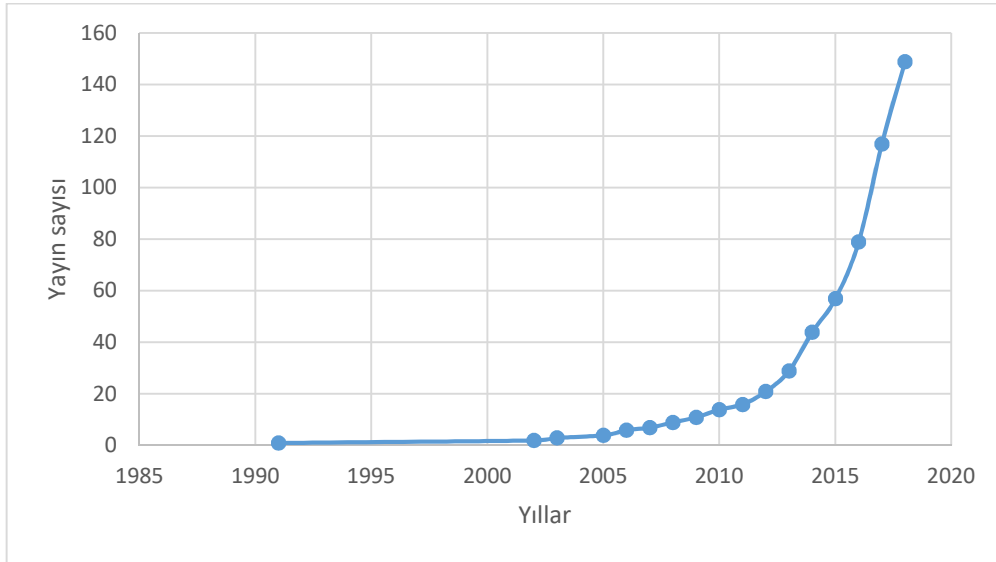
Çalışmaların %27'sinde herhangi bir uygulamaya yer verilmezken, %49'unda varsayımsal, %24'ünde gerçek uygulamalara yer verilmiştir. Ayrıca, %60'ında

matematiksel bir çözüm yaklaşımı sunulurken, %40'ında kavramsal açıklamalara değinilmiştir. Matematiksel çalışmaların dağılımları Şekil 1.2'de gösterilmektedir.



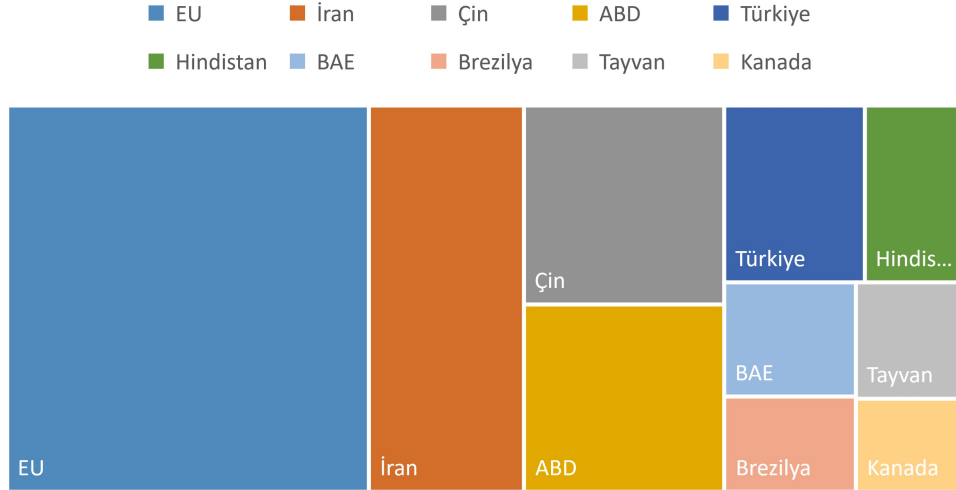
Şekil 1.2 Matematiksel çözüm yaklaşımlarının dağılımı

Çalışmaların yayınlandıkları yıllara göre oluşturulan S eğrisi Şekil 1.3'de gösterilmektedir. Buna göre, tedarik zincirinin yayın sayısında son yıllarda artış olduğu ve ivmedeki göreceli azalmayla beraber olgunluk evresine yaklaşıldığı görülmektedir.



Şekil 1.3 Çalışmaların yıllara göre dağılımı

İncelenen alanda literatüre katkı 35 farklı ülkeden gelmiştir. Bu alana en çok 56 yayınlı Avrupa Birliği ülkeleri katkı sağlamıştır, Türkiye'den 10 adet yayına yer verilmiştir (Şekil 1.4).



Şekil 1.4 Literatüre katkı sağlayan ülkeler (ilk 10)

1.2 Tezin Amacı

Bu çalışmada, otomotiv sektörünün yakın gelecekte nasıl şekilleneceğine dair bilgiler ve yorumlar paylaşılmış, dijitalleşmeyle artan ürün çeşitliliğini yine dijitalleşme yoluyla karşılamak amacıyla alternatif üretim teknikleri sunulmuş ve otomotiv yan sanayinde faaliyet gösteren şirketlere yedek parça üretim ve dağıtım ağı tasarımlarında yol gösterebilecek alternatif bir çözüm metodolojisi ortaya konulmuştur. Çözüm metodolojisi geliştirilirken ve model oluşturulurken, tedarik zinciri tedarikçilerden dağıtım merkezine kadar ele alınmıştır. Bu kapsamda, üretim modelleri içerisinde alternatif, yeni teknikler tespit edilip, tedarik zincirine olan etkisi araştırılmıştır. Ortaya konulan alternatif tedarik zinciri için optimum sonuç veren toplam maliyeti minimize etmeyi sağlayan tamsayılı programlama modeli kurulmuştur. Kurulan model gerçek bir işletmenin tedarik zincirinden esinlenerek sınanmıştır. Daha büyük ölçekli problemlerin çözümünde kullanılabilecek, optimum sonuca yakınsayan genetik algoritma temelli heuristik bir model geliştirilmiştir ve sayısal uygulama ile bu çözüm mimarisi açıklanmıştır.

1.3 Orijinal Katkı

Literatür incelendiğinde ortaya konulan çalışmaların genel tedarik zinciri modelleri üzerine olduğu, otomotiv sektörüne ve özellikle yedek parça dağıtımına ilişkin çalışmaların kısıtlı sayıda olduğu görülmüştür. Yedek parça ile ilgili çalışmalar genellikle üretim tesislerindeki makinelerin yedek parçalarını kapsamaktadır ve bu çalışmalarda talep tahmini, risk analizleri ve karar destek sistemlerine yoğunlaşıldığı görülmüştür.

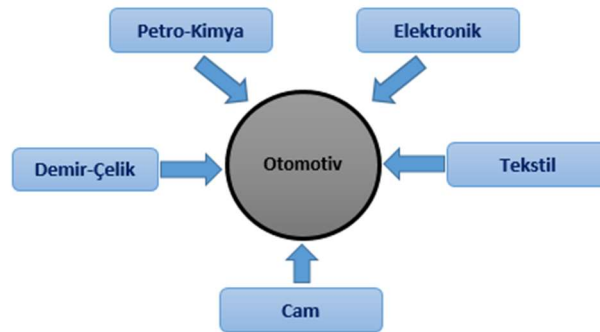
Bu çalışmada, spesifik olarak otomotiv yedek parça dağıtım sistemine odaklanılmış, 3 boyutlu yazıcılar gibi yeni gelişen üretim teknolojileri incelenmiş ve bunların otomotiv sektöründe, yedek parça üretim, depolama ve dağıtım sistemine olan entegrasyonunu sağlayabilecek, tedarik zinciri içerisindeki toplam maliyetlerin azaltılmasına katkı sağlayabilecek alternatif bir model geliştirilmiştir. Problemin çözümünde kullanılabilecek tamsayılı matematiksel programlama tekniğine ek olarak, büyük modellerin çözümüne olanak tanıyan, özgün genetik algoritma çözüm tekniği, problemin yapısına uygun olacak şekilde geliştirilmiştir. Çalışmanın sonunda eklemeli üretim merkezlerinin (3D yazıcıların) ne zaman ve hangi koşullarda, nasıl kullanılabileceğini gösteren senaryo analizleri yapılmış ve sonuçları paylaşılmıştır.

OTOMOTİV SEKTÖRÜNDE YEDEK PARÇA DAĞITIMI

Bu bölümde, dünya ekonomisinde ciddi bir paya sahip olan otomotiv sektörü hakkında genel bilgi verilecek, geleceğine yönelik bakış açısı ortaya konulacaktır. Otomotiv yedek parçaları üretimi için alternatif üretim tekniklerinden biri olan eklemeli üretim prosesleri incelenecek ve tedarik zincirinin yapısı paylaşılacaktır.

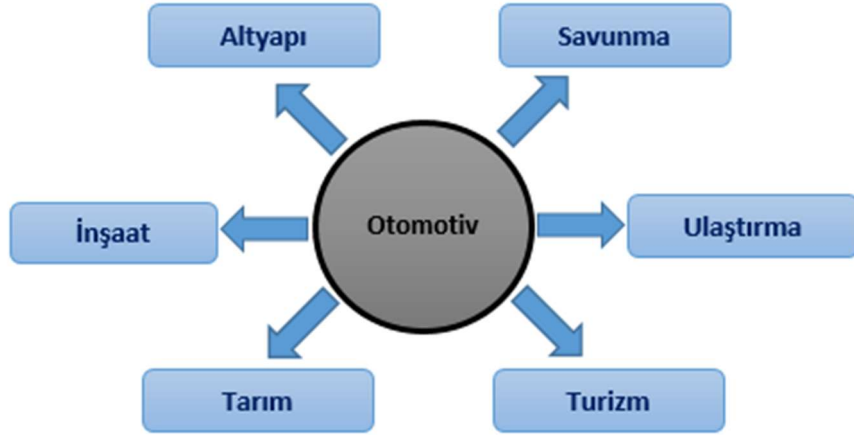
2.1 Otomotiv Sektörü

Otomotiv sektörü, 2017 yılında yapılan araştırmalara göre dünya ekonomisinin yaklaşık %5'ini oluşturmaktadır [1]. Sektör, dünya ve ülke ekonomileri için istihdam yaratma potansiyeli, araştırma-geliştirme faaliyetleriyle bilim ve teknolojinin etkin bir şekilde kullanılmasına olanak sağlamasıyla önemli yere sahiptir. Sadece, araçlarda kullanılan malzemelerin, maden yataklarından cevher halinde çıkartılıp, işlenip endüstriyel hâle getirilmesine kadarki süreçte direkt ve dolaylı olarak yüzlerce işkoluna ihtiyaç duyuluyor olması bile sektörün büyüklüğü ve önemini açıkça göstermektedir. Elektrikli ve otonom araç konseptlerinin gelişmesiyle beraber, içerik daha da artmış; yazılım sektörü, kimya sektörü, endüstriyel tekstil ve kompozit malzeme sektörü, şarj istasyonlarının optimizasyonu ile beraber elektrik-elektronik sektörleri de büyümeye başlamıştır. Günümüzde, otomotiv sektöründe yaratılan 1\$'lık katma değer, toplam ekonomide yaklaşık 3\$'lık katma değer yaratmaktadır [4]. Otomotiv sektörüne katkı sağlayan sektörler Şekil 2.1'de gösterilmektedir.



Şekil 2.1 Otomotiv sektörüne katkı sağlayan sektörler [4]

Otomotiv sektörünün diğer sektörlerle ilişkisi Şekil 2.2’de gösterilmektedir.



Şekil 2.2 Otomotiv sektörünün katkı sağladığı sektörler [4]

Otomotiv sektörü, yaratılan istihdam dışında, ülke ekonomilerine üretim ve satışlardan gelen vergilerle de katkı sağlamakta ve ihracatın, ithalattan daha fazla olduğu durumlarda cari dengeye pozitif yönde etki etmektedir.

Yapılan araştırmalarda, 2030 yılında satılan araçların yaklaşık %15’inin tamamıyla otonom olacağı tahmin edilmiştir [5]. Otonom araçlar, yolcuların daha çok kişisel vakit geçirebileceği bir imkân sunmaktadır. Böylelikle, mobilite servisleriyle beraber 2030 yılında 5.2 trilyon dolarlık büyüklüğe sahip geleneksel araç ve yedek parça gelirlerine, 1.5 trilyon dolar ek gelir sağlanacağı tahmin edilmektedir [5]. Bu potansiyel, sürdürülebilirlik açısından sektörün uzun vadeli ekonomik büyümedeki önemini açıkça ortaya koymaktadır.

Otonom araçların gelişmesiyle beraber, yolculuklardaki sorumluluğun üretici firmayla daha çok paylaşılacağı gerçeğiyle, adalet sisteminin de önplana çıkacağı şimdiden öngörülmektedir.

Otomotiv sektörü ve mobilitenin geleceği 4 ana kategoriyle tanımlanabilir: Motor türlerine göre araçlar, kullanım türlerine göre araçlar, bağlantı türlerine göre araçlar ve iş modellerine göre araçlar.

2.1.1 Motor Türlerine Göre Araçlar

Motor türlerine göre araçlar temelde 3 alt kategoride incelenebilir: İçten yanmalı motorlara sahip araçlar (ICE), elektrik motorlu araçlar (EV), hibrit araçlar (HV).

İçten yanmalı motora sahip araçlar benzin, dizel ve diğer hidrokarbon yakıtlarla çalışmaktadır. İçten yanmalı motora sahip araçlar, modellerine göre değişmekle beraber yaklaşık 2.000'e yakın yürüyen aksam parçalarına ve toplamda 30.000'e yakın parçaya sahiptir. Araçların bakım maliyetinin yüksek olması, çevreyi ilgilendiren emisyon kurallarının bazı ülkelerde yeniden düzenlenmesi gibi nedenlerle pazarda yerini elektrikli ve hibrit motorlu araçlara kaybetmeye başlamıştır. Araçların daha uzun menzile sahip olması, yakıt istasyonlarının yaygınlığı gibi avantajlara sahip olması nedeniyle bir süre daha üretimine devam edileceği düşünülmektedir.

Elektrik motorlu araçlar, bataryadan elde edilen elektrik enerjisiyle çalışmaktadır. Genellikle lityum bataryalar kullanılmaktadır. Geliştirme maliyetlerinin yüksekliği, sarj istasyonlarının yaygın olmayışı, batarya üretim kapasitesinin kısıtlı olması gibi nedenlerle her ne kadar pazar payı düşük olsa da, 2030 yılına gelindiğinde Avrupa ve Amerika'da üretilen araçların yaklaşık %35'inin elektrikli araçlar olacağı tahmin edilmektedir [6]. Ülkelerin sağladığı vergi avantajı, bakım maliyetlerinin düşüklüğü ve aracın çok daha az parçaya sahip olup daha az karmaşık olması, araç performansının sürdürülebilirliği, daha çevreci olması, bataryaların-sarj istasyonlarının geliştirilmesiyle araç menzilinin artması ve daha ekonomik olması gibi nedenlerle üretim yatırımları artmaktadır.

Hibrit motor, hidrokarbon yakıtlardan veya şebekeden sarj yoluyla elektriğin sağlanmasıyla hareket enerjisini üretmektedir. Hibrit motorlu araçlar birden fazla enerji kaynağıyla çalışabildiğinden elektrikli araçlara göre menzil ve performans, içten yanmalı motorlu araçlara göre de düşük karbon emisyonu ve daha az yakıt tüketimi avantajı bulunmaktadır. 2030 yılına gelindiğinde Avrupa ve Amerika'da üretilen araçların yaklaşık %15'inin hibrit motorlu araçlar olacağı tahmin edilmektedir [6].

2.1.2 Kullanım Türlerine Göre Araçlar

Otomobillerin kullanım türleri, önceleri şanzıman tipine göre manuel, yarı-otomatik ve otomatik şeklinde tanımlanırken, otonom araçların hayatımıza girmesiyle otomasyon seviyesine (Tablo 2.1) göre belirlenmeye başlamıştır: Sürücü yardımı (seviye 1), kısmi otonom (seviye 2), koşullu otonom (seviye 3), yüksek otonom (seviye 4), tam otonom (seviye 5). Bunlara ek olarak, geleneksel, otonom olmayan otomobiller seviye 0 kabul edilmektedir.

Tablo 2.1 Otonom araçların seviyeleri [6][7]

Otomasyon seviyesi	Tanım	Özellikler
1.Seviye <i>Sürücü yardımı</i>	Araç sürücü kontrolündedir. Sistem çok az noktada sürücüye yardımda bulunur	Çok büyük ölçüde insan kontrolünde Örnek: Park yardımı
2.Seviye <i>Kısmi otonom</i>	Sürücü aracı kontrol etse dâhi otonom sistem fonksiyonların çoğunda bulunur	Dönüş ve fren sistemleri araç tarafından kontrol edilebilir
3.Seviye <i>Koşullu otonom</i>	60km/h hıza kadar sürücü gereksinimi olmadan otonom sistem bütün fonksiyonları yerine getirebilir	Yönlendirme, hızlanma, dönüş ve frenleme otonom sistem tarafından kontrol edilebilir
4.Seviye <i>Yüksek otonom</i>	Yolların ideal olduğu durumlarda araç sürücü gereksinimi olmadan bütün fonksiyonları otonom bir şekilde yerine getirebilir	Yolun durumu izlenebilir, yönlendirme, hızlanma, dönüş ve frenleme otonom sistem tarafından kontrol edilebilir
5.Seviye <i>Tam otonom</i>	Sürücüye ihtiyaç olmadan, yapay zekadan yararlanılarak tüm fonksiyonlar yerine getirilir	Saatte 4TB data toplanabilir ve yapay zeka tarafından yorumlanabilir. Yolun durumu izlenebilir, yönlendirme, hızlanma, dönüş ve frenleme otonom sistem tarafından kontrol edilebilir

Full otonom araçların, teknolojik altyapının ve yasal düzenlemelerin ardından satışa hazır olacağı öngörülmektedir. Otonom araçların kullanıma girmesiyle beraber, otomotiv ve hizmet sektöründe köklü değişiklikler olması kaçınılmaz olacaktır. Sürücüsüz taksi hizmetlerinin, araç içi eğlence ve alışveriş sistemlerinin önplana çıkması beklenmektedir. Güvenli, ekonomik ve eğlenceli yolculuk deneyimi için donanım ve yazılımların optimizasyonunu önceleyen şirketler pazarda pozitif ayrışacaktır. Bununla beraber, araçların planlı bakımı ve yedek parça tedariği de kritik hâle gelecektir.

2.1.3 Bağlantı Türlerine Göre Araçlar

Bağlantılı araçlar, 5 alt başlık altında incelenmektedir [8], bunlar:

- Araçtan altyapıya (V2I): Güvenlik, mobilite ve çevresel koşullarla ilgili altyapıya dayalı verilerin araçtan toplanıp sürücüye iletilmesini sağlayan teknolojidir.
- Araçtan araca (V2V): Kazaların önüne geçmek, trafik yoğunluğunu azaltmak, çevreye pozitif katkıda bulunmak amacıyla, araçların birbirleriyle hız, pozisyon ve çevre bilgilerini kablosuz şekilde paylaşmasına olanak sağlayan teknolojidir.
- Araçtan buluta (V2C): Nesnelerin interneti kullanımı için araç içi uygulamalardan elde edilen verilerin bulut sistemlerle paylaşımını sağlayan teknolojidir.
- Araçtan yayaya (V2P): Araçların çevresindeki bilgileri toplayarak, mobilitayı ve güvenliği artırmak amacıyla çevresindeki diğer araçlarla, yayaların cihazlarıyla ve altyapıyla paylaşımını sağlayan teknolojidir.
- Araçtan her şeye (V2X): Otomobillerin, otoyolların, gemilerin, trenlerin ve hava taşıtlarının birbirleriyle bağlantı kurmasını sağlayan teknolojidir.

5G teknolojisinin gelişmesiyle, 2030 yılında satılan bağlantılı araçların sayısının 16 milyonu bulacağı öngörülmektedir [6]. Bağlantılı araçların sayısının artmasıyla, araçların anlık durumları daha iyi izlenebilmekte, olası arızaların önceden tespit edilmesi mümkün hâle gelebilecektir. Bu da yedek parça tedariğinin ve servis organizasyonunun planlamasına katkı sağlayacaktır.

Artan bilgi paylaşımı, belirsizliğin azalması ve rota optimizasyonu verimliliğinin artmasına pozitif katkı sağlayacaktır. Trafikte geçirilen sürenin azalması (yakıt tüketiminin azalması), altyapı yatırım kararlarının daha doğru verilmesi kaynakların etkin kullanımı konusunda ilk akla gelen örneklerdendir.

2.1.4 İş Modellerine Göre Araçlar

Geleneksel toplu taşıma sistemleri, internet kullanımının yaygınlaşmasıyla daha dinamik ve verimli hâle gelmeye başlamış, insanların seyahat etme tercihlerine

göre, farklı iş modelleri gelişmiştir. Mobilite servisi (MaaS) şeklinde adlandırılan bu yeni hizmet sektörü 4 temel başlık altında sınıflandırılabilir [6]:

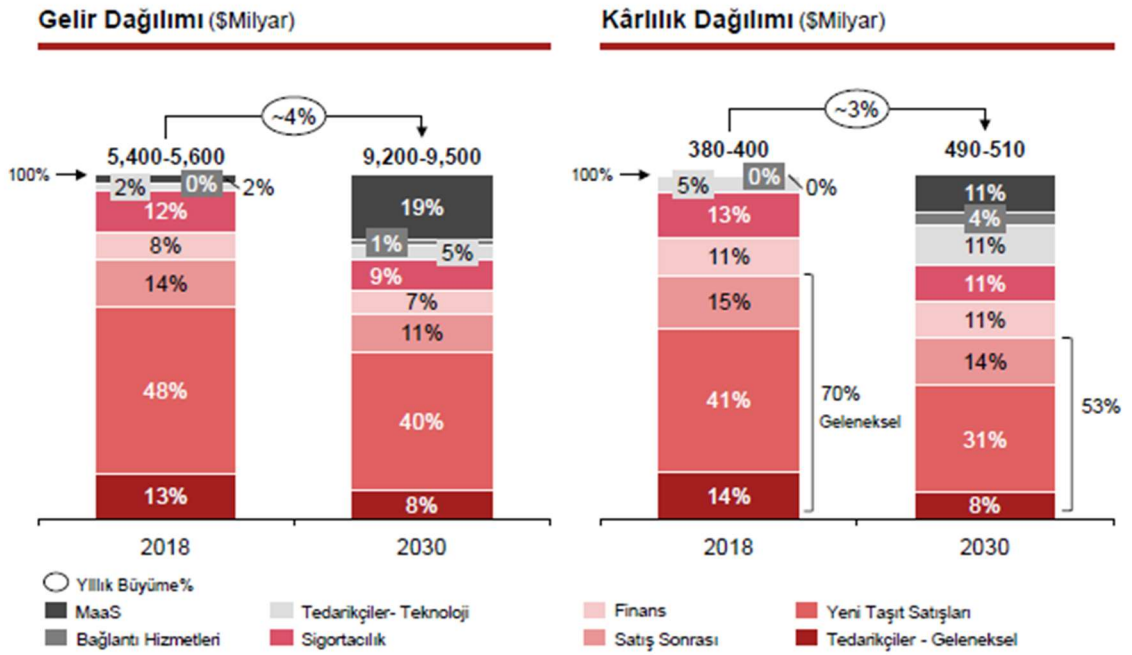
- Kişisel aktif mobilite: Özel araç, aile araçları, şirket araçları gibi kişilerin sahip olduğu özel araçların, sürücü tarafından kontrol edildiği, günümüzdeki en yaygın mobilite modelidir.
- Paylaşımlı aktif mobilite: Kiralık, araç paylaşımı, internet aracılığıyla araç çağırma, ticari taksiler gibi aktif sürücüler tarafından kullanılan, paylaşımlı şekilde araçların kullanıldığı mobilite şeklidir.
- Kişisel pasif mobilite: Özel araç, aile araçları, şirket araçları gibi kişilerin sahip olduğu özel araçların, sürücü müdahalesi olmaksızın, otonom şekilde kullanıldığı mobilite modelidir.
- Paylaşımlı pasif mobilite: Robotaksi, peplemover şeklinde isimlendirilen, yeni nesil tam otonom araçlarla sağlanan toplu taşıma modelidir.

Mobilite modellerinin büyük ve küçük şehirlerde farklı şekilleneceği öngörülmektedir. Mobilite servislerinin, araçlardan faydalanma oranlarını artıracağı bununla beraber parçalarda yıpranmanın artacağı ve yedek parça tedarikinin önemli hâle geleceği düşünülmektedir. Filo sahiplerinin, araç üreticileriyle fiyat pazarlıklarında daha güçlü olacağı varsayımıyla fiyatlar üzerinde baskı yaratması olasıdır. İçten yanmalı motorlu araçların bakım maliyetlerinin yüksek olması nedeniyle, servis sağlayıcıların elektrikli araçlara yöneleceği öngörülmektedir [6].

2.2 Otomotiv Yedek Parçaları ve Eklemeli Üretim Teknikleri

Yedek parça, envanterde tutulabilen, tamir edilecek parça veya hatalı parçanın yerine geçebilecek servis parçası, tamir parçası veya değiştirilebilir parça gibi çeşitli şekillerde tanımlanabilir. Otomotiv sektöründe, şirketlerin elde ettiği kârlarda, satış sonrasında elde edilen gelirlerin büyük bir etkisi olduğu yapılan araştırmalarla ortaya konulmuştur. 2001 yılında, General Motors'un 9 milyar dolarlık satış sonrası kârının, normal araç satışlarından (150 milyar dolar) elde ettiği kârdan fazla olduğu tespit edilmiştir [9]. Bu, otomotiv sektöründe yedek parçanın işletme kârlılığına ve sürdürülebilirliğine ne denli etki ettiğini göstermektedir.

Şekil 2.3’de özetlenen, sektörün geleceğine ışık tutan bir başka araştırmada 2030 yılına gelindiğinde toplam gelirlerin her yıl yaklaşık %4 büyüyeceği öngörülürken, satış sonrası gelirlerinin toplam gelir içerisinde %14 seviyesinden %11’e, kârlılığın ise %15’ten %14’e gerileyeceği tahmin edilmiştir [6]. Bu çalışma, yedek parça sektöründe kârlılığın ve gelirin toplam içerisindeki payının, yeni geliştirilen araçlardaki teknoloji yoğunluğundaki artıştan dolayı azalacağını gösterirken, her yıl %4 büyüme potansiyeliyle sektördeki rekabetin artacağını da sinyallerini vermektedir.



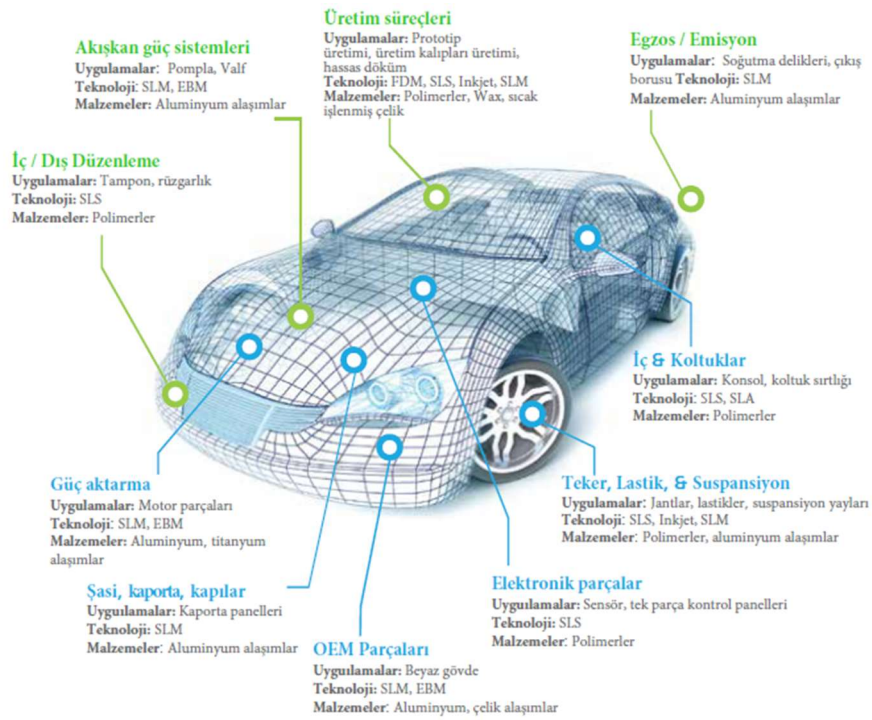
Şekil 2.3 Otomotiv sektöründe gelir ve kârlılık dağılımı[6]

Yapılan araştırmalar yedek parçaların her yıl yaklaşık %23’ünün satılmadan elde kaldığını ve müşterilerin araçlarının zamanında tamir edilmesi beklentisinin yaklaşık %15 sapmayla karşılanamadığını ortaya koymuştur [9]. Bu veriler, etkin bir yedek parça tedarik zinciri yönetiminin şirketlerin yıllık kârlarına pozitif etki edip, rekabet avantajı yaratabileceğini düşünmemize olanak sağlamaktadır.

Satış ve satış sonrası hizmetlerdeki rekabet artarken, sadece araç konseptlerinde değil, üretim süreçlerinde de farklılaşmaya gidilmesi şirketlere avantaj yaratacaktır. Eklemeli üretim tekniklerinin gelişmesiyle beraber prototip üretim süreçleri kısalmış, maliyetler azalmış ve kalite geliştirilmiştir. Esnek olmak, talebe hızlı ve

yüksek kaliteli çözümlerle karşılık vermek şirketlere büyük avantaj sağlamaktadır. Gelişen 3D yazıcı teknolojisiyle parça üretim maliyetleri azalmaya başlamıştır. 3D yazıcı ile üretilmeyen parçaların da üretilbilir hâle gelmesiyle seçenekler artmıştır. Yeni gelişen bu üretim tekniği, şirketlere değişen piyasa koşullarına hızlı uyum sağlamaları için avantaj yaratırken, işletme içerisinde karşılaşılabilecek iş kazası, ürün firesi, ihtiyaç fazlası stok gibi olumsuz operasyonel çıktıların minimize edilmesinde de yararlı olacaktır.

Sektördeki bir çok marka, neredeyse geliştirdikleri araçlara ait parçaların büyük çoğunluğunu 3D yazıcılar ile prototip aşamasında üretebilmektedir. Ayrıca, seri üretim aşamasında da 3D yazıcılardan faydalanan şirketlerin sayısı gün geçtikçe artmaktadır. Araçlarda eklemeli üretim teknikleri kullanılarak üretilen parçalar Şekil 2.4'te gösterilmektedir.



Şekil 2.4 Eklemeli üretim tekniğiyle üretilen araç parçaları [10]

Eklemeli üretim teknikleri, kendi içerisinde birçok teknolojiyi barındırmaktadır. Bunlardan öne çıkanları: FDM (Fused Deposition Modelling), SLA

(Stereolithography), SLS (Selective Laser Sintering), EBM (Electron Beam Melting), SLM (Selective Laser Melting) ve Inkjet (Material Jetting) teknolojileridir.

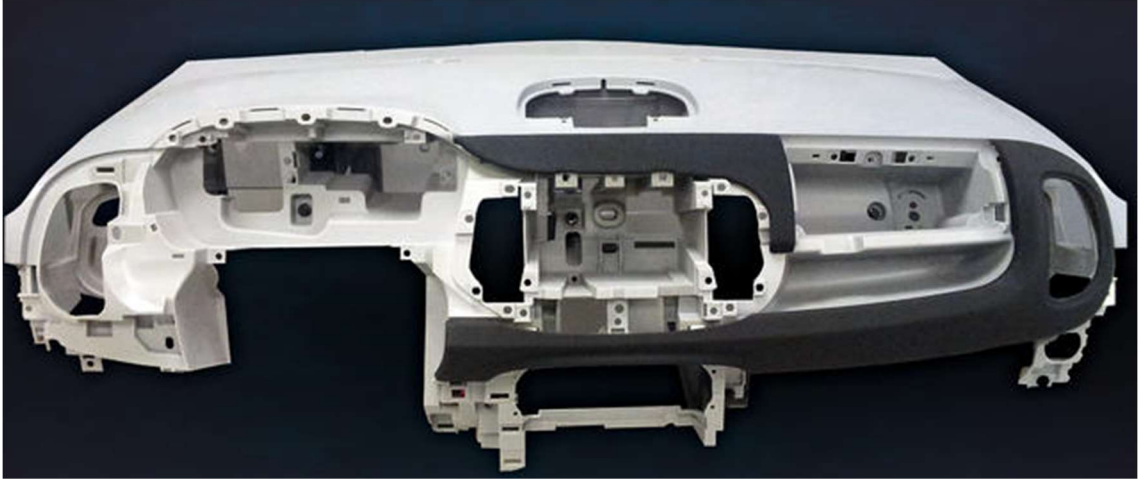
2.2.1 FDM Teknolojisi

FDM, Otomotiv parçalarının hızlı tasarımı ve üretimi için Acrylonitrile Butadiene Styrene (ABS) gibi termoplastik malzemelerin (filament) kullanıldığı eklemeli üretim tekniğidir. 3 boyutlu objelerin ve çalışır prototiplerin basılması için malzemenin ısıtılarak yarı likit hâle getirilmesinden sonra ekstrüzyon yoluyla yazıcı başlığının malzemeyi toparlayıp, biriktirmesine dayanan prosese sahiptir [11]. FDM üretim tezgâhı örneği Şekil 2.5'te gösterilmektedir.



Şekil 2.5 FDM üretim tezgahı örneği [12]

FDM teknolojisiyle üretilen otomotiv parçaları: Emisyon filtreleri, filtre kutusu ve kapakları, yakıt depo kapakları, konsollar, gösterge kabı, bağlantı çatalı koruyucusu, far çerçevesi, döşeme sacı bağlantıları, döşeme sacı altı, jant flanşı [11]. FDM teknolojisiyle üretilmiş konsol örneği Şekil 2.6'da gösterilmektedir.



Şekil 2.6 FDM teknolojisiyle üretilmiş araç konsolu

İlk üretim sonrası, yazıcıdan çıkartılan ürünler, beklentilere göre zımparalama, cilalama, boyama gibi çeşitli tamamlayıcı işlemlere tabi tutulabilirler.

2.2.2 SLA Teknolojisi

SLA, otomotiv parçalarının üretimi için termoplastikler, fotopolimerler, reçineler, kompozit polimerler gibi malzemelerin kullanıldığı eklemeli üretim tekniğidir. Likit malzeme kullanarak, parçanın katmanlı bir şekilde üretilmesini sağlayan ultraviolet lazerin kullanıldığı prosestir. Lazer ışığıyla temasa geçtiğinde malzeme çok hızlı bir şekilde katı hâle geçmektedir. SLA üretim tezgâhı örneği Şekil 2.7’de gösterilmektedir.



Şekil 2.7 SLA üretim tezgâhı örneği [13]

SLA teknolojisiyle üretilen otomotiv parçaları: Vites topuzu, pnömatik ve hidrolik sistem prototipleri, şeffaf motor parçaları prototipleri, far ve lens prototipleri, motor ve manifold kapakları için parça setleri.



Şekil 2.8 SLA tekniğiyle üretilmiş arka aydınlatma sistemi [14]

Üretilen parça türüne göre, SLA prosesi sonrası polisajlama, lake kaplama gibi tamamlayıcı prosesler de kullanılmaktadır.

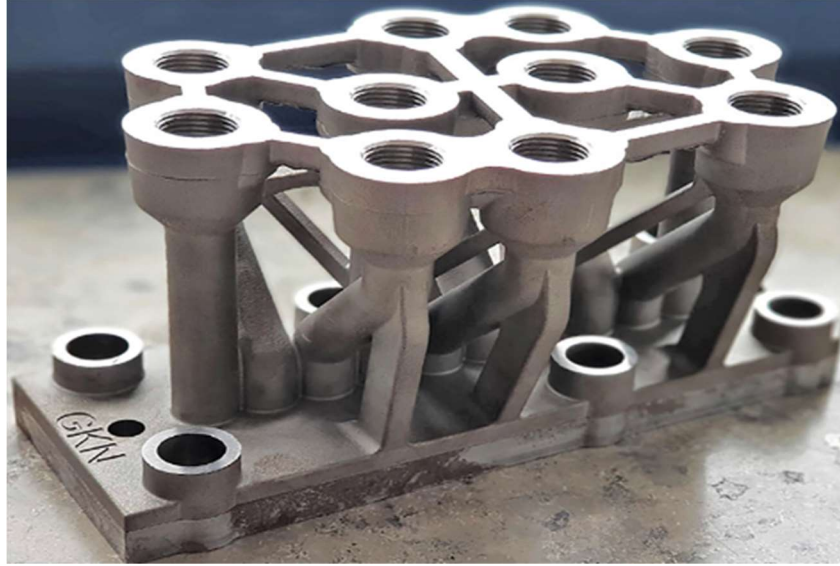
2.2.3 SLS Teknolojisi

SLS, üretim süreçlerinde karbon fiber, seramik, polimerler ve metal alaşımlar kullanılmaktadır. Güç kaynağı kullanılarak seçici bir şekilde eritilerek ve toz haline getirilmiş malzemeler kaynatılarak katmanlar oluşturulur ve istenen parçalar elde edilir. Malzemelerin uygun bir şekilde yayılmasını sağlayan dönen mekanizma mevcuttur ve toz haline getirilmiş malzemeler, istenilen tasarımı gerçekleştirmek amacıyla lazer sistemden yararlanılarak biraraya getirilir [11]. FDM ve SLA teknolojileri kadar yaygın olmayan SLS teknolojisi, küçük ve orta hacimli partilerde, kompleks geometrik yapıya sahip parçaların üretimi için idealdir. Düz geniş yüzeyler ve küçük deliklerin olduğu yapılarda, pürüzsüz yüzey istenen parçalarda ikincil işlemler gerekebilir, SLS üretim tezgâhı örneği Şekil 2.9'da gösterilmektedir. SLS teknolojisiyle üretilen otomobil parçaları: Şanzıman prototipleri, ızgara ve çamurluklar, yakıt tankları, küçük motor parçaları, hidrolik tahrik sistemi, ısı değiştiriciler, borular ve bağlantı elemanları.



Şekil 2.9 SLS üretim tezgâhı örneği [15]

SLS teknolojisi, konvansiyonel üretim teknikleriyle üretilen parçaların, üretim süreçlerinden kaynaklanan bazı tasarım kısıtların ortadan kaldırılmasına da imkan sağlamaktadır. Bu eklemeli üretim tekniğiyle parçaların tasarımları da gözden geçirilmeye başlanmıştır. Şekil 2.10'da gösterilen, hidrolik bloğun ağırlığı, SLS teknolojisinin sağladığı tasarım esnekliği sayesinde, 30kg'dan 5.5 kg'a düşürülmüştür.

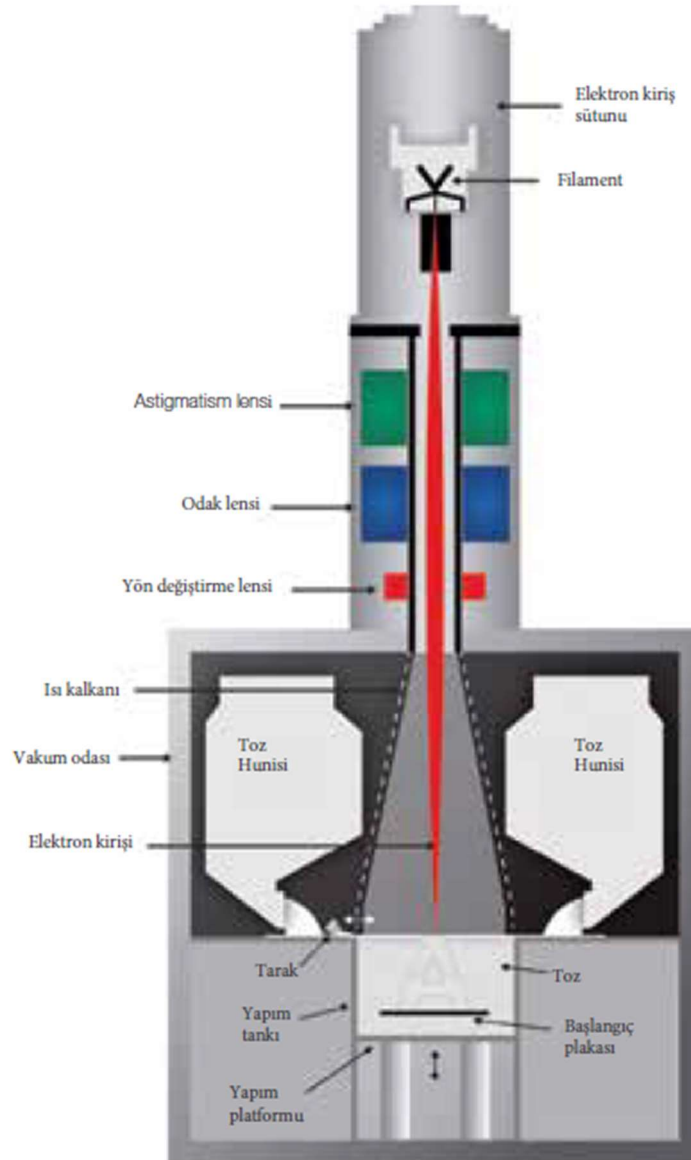


Şekil 2.10 SLS tekniğiyle üretilmiş hidrolik blok [16]

2.2.4 EBM Teknolojisi

EBM, güçlü bir elektron ışını ile üretim haznesinde bulunan metal tozlarının katman katman eritilerek tamamen yoğun bir metal bileşenin oluşturulmasını sağlar [17].

Aluminyum ve alaşımları, titanyum ve alaşımları, kobalt krom ve üstün alaşımlar EBM teknolojisiyle uyumludur. Malzeleler(filament), bilgisayardan alınan 3 boyutlu tasarım verileri (CAD) kullanılarak katman halinde eritilip ürüne dönüştürülür (Şekil 2.11) [11][17].



Şekil 2.11 EBM bileşenleri [17]

EBM teknolojisiyle üretilen otomobil parçaları: Pompa çarkı, tekerlek jantları (Şekil 2.12), küçük kompresör parçaları, şasi imalatı, türbin bıçakları.



Şekil 2.12 EBM teknolojisiyle üretilmiş titanyum jant [18]

2.2.5 SLM Teknolojisi

SLM (Selective Laser Melting) Lazerle Seçmeli Eritme manasına gelmektedir. Lazer ışınıyla haznesinde bulunan metal tozlarını eriterek, doğrudan 3D CAD dosyasından homojen olarak metal parçalar üreten lazer eritme işlemidir. Çok hızlı ve hassas olan bu işlem, hemen hemen her metal toz malzeme ile yüksek doğrulukla katman katman parça üretir. Titanyum, Alüminyum, Kob-Krom, İnkonel, paslanmaz çelik ve kalıp çelikleri ve çeşitli alaşımlarla üretim yapılabilmesi mümkündür [19]. SLM teknolojisiyle üretilmiş fren kaliperi Şekil 2.13’de gösterilmektedir.

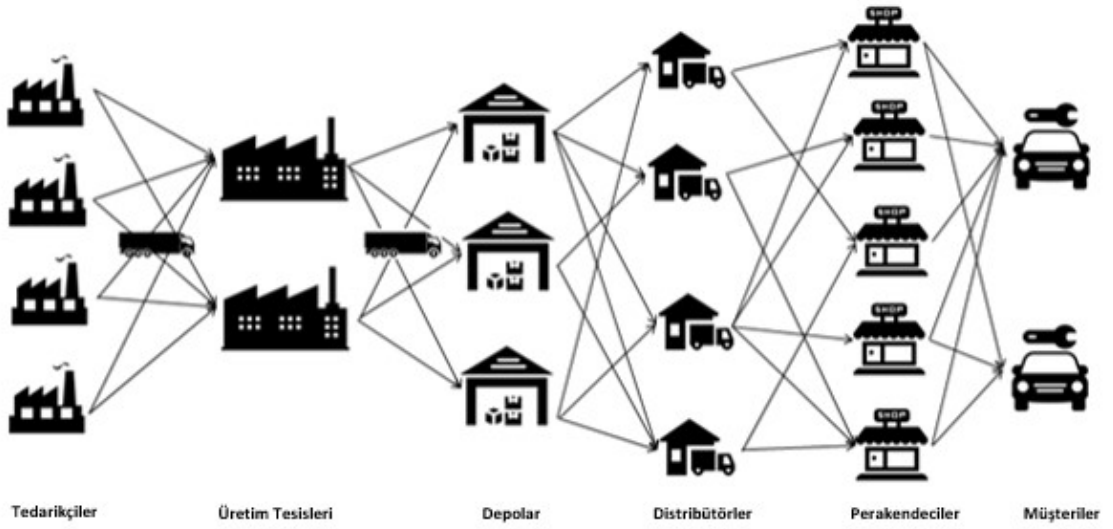


Şekil 2.13 SLM teknolojisiyle üretilmiş fren kaliperi [20]

2.3 Otomotiv Yedek Parça Tedarik Zinciri

Otomotiv ana sanayi, parçalarının büyük bir çoğunluğunu otomotiv yan sanayisinde faaliyet gösteren fabrikalardan tedarik etmekte ve final üretimlerini (montaj) kendi tesislerinde organize edip, araçların satışını yapmaktadır. Parçaların tasarımı ana sanayi ve yan sanayi firmalarının ortak çalışmalarıyla yapılmaktadır. Buna bağlı olarak, satış sonrasında, yedek parçaların temini de büyük çoğunlukla, orijinal parçanın üretimini(OEM) yapan yan sanayi firmaları tarafından sağlanmaktadır, aynı parçanın farklı tedarikçiler tarafından üretilip, pazara sunulması da söz konusudur.

Geleneksel yedek parça dağıtım ağı genel itibariyle Şekil 2.14’de gösterilmektedir.



Şekil 2.14 Yedek parça dağıtım ağı

Şekil 2.14’de gösterilen çizgiler ve oklar potansiyel taşıma işlemlerini sembolize etmektedir.

Tedarikçiler: Ürünün üretilmesi için gerekli olan hammadde veya yarı-mamulleri sağlayan işletmelerdir.

Üretim tesisleri: Ürünün tasarımının/imalatının gerçekleştirildiği yerlerdir.

Depolar: Ürünlerin sevkiyat zamanlarına kadar tutulduğu yerlerdir.

Distribütörler: Bölgedeki ihtiyaçlara göre satılabilecek ürünleri ellerinde

bulunduran dağıtımıcılarıdır. Birden fazla markaya ait ürünleri sağlarlar.

Perakendeciler: Tüketicinin ihtiyacı olan ürünü temin etmek için başvurduğu ilk kaynaktır. Müşteriler tarafından, doğru zamanda, doğru fiyatta, doğru parçayı temin etmesi istenilen birimdir.

Müşteriler: Talebi oluşturan, ürüne ihtiyaç duyan, kullanıcılarıdır.

Otomotiv sektöründe, lojistik maliyetlerinin yüksek olması nedeniyle üretim tesislerinin pazara yakın olması tercih edilir. Taşıma maliyetlerinin yanı sıra, ülkelerin korumacı politikaları, yüksek vergiler, pazara girişte kısıtlayıcı uygulamalar da bunda etkindir. Yedek parça tedarik zinciri için de geçerli olan bu geleneksel bakış açısı, dijitalleşmenin artması ve yeni üretim tekniklerinin etkin hâle gelmesiyle farklı bir boyut kazanabilir. Otomotiv yedek parça tedarik zincirinde yer alan firmaların güçlü ve zayıf yönleri, bekleyen fırsatlar ve tehditler (SWOT) Tablo 2.2’de özetlenmiştir.

Tablo 2.2 Otomotiv yedek parça sektörü genel SWOT analizi

GÜÇLÜ YÖNLER	ZAYIF YÖNLER
*Sektördeki yüksek büyüme oranları *Yüksek kâr marjı *Ana sanayi ile proje geliştirme *Yetişmiş işgücü *Global ticaret ağı *Know-how *Geniş servis ağları *Yüksek adaptasyon	*Daha fazla SKU, daha düşük parti hacmi *Yazılım alanında yetişmiş işgücü azlığı *Düşük verimlilik *Teknoloji yatırım maliyetleri *Talep oluşturmama, ihtiyaç olmadan satış yapılamaması *Depolama ve sevkiyat zorlukları, ölçek ekonomisinden yararlanamama *Envanter maliyetleri
FIRSATLAR	TEHDİTLER
*Araç bağlantı sistemleriyle parçaların durumunu anlık görebilme *Eklemeli üretim teknikleri gibi yeni geliştirilen üretim teknikleriyle esneklik sağlayabilme, hızlı ve uygun maliyetlerle parça ihtiyacını karşılayabilme *Dijitalleşmenin beraberinde getirdiği yeni iş fırsatları *Üretim ve depolama sistemlerinde otomasyon	*Araç çeşitliliğinin artması *Elektrikli araçlarla beraber araç başına düşen parça sayısında azalma *Artan rekabet *Ülkelerin koruyucu politikaları *Ekonomik daralma *Paylaşımlı araçların sayısında artış, filo şirketlerinin pazarlık avantajları

SWOT analiziyle ortaya konulan, sektörü bekleyen tehditlerin ve fırsatların kaynağının inovasyon ve coğrafi konumlandırmayla alakalı olduğu görülmektedir. Yedek parça üretim ve dağıtım stratejisinin, fırsatları maksimum seviyede kullanabileceği yol haritasıyla, tehditleri ortadan kaldıracak veya etkisini azaltacak yönde şekillendirilmesi gerekmektedir. Burada, eklemeli üretim teknikleri oyun değiştiricilerden biri olarak ortaya çıkmaktadır:

- Herhangi bir kalıp yatırımı yapılmaksızın, direkt final ürün üretilerek pazardaki talebe hızlı bir şekilde karşılık verilebilir.
- Sadece ürün üzerinde kullanılacak malzeme envanterde tutulacağından hurda, fire ve envanter maliyetleri tüm tedarik zinciri boyunca azaltılır.
- Eklemeli üretim tekniğiyle üretilen parçalar dayanıklı olmaları yanında daha hafif olmaları nedeniyle ve talep geldiği anda üretilmeleri nedeniyle taşıma ve depolama maliyetleri daha düşük olacaktır.
- Farklı ülkelerde, coğrafyalarda, sadece data transferi yöntemiyle müşterilere yakın olup, talep karşılanabileceğinden hükümetlerin politikalarından veya tedarik zincirinin karmaşık yapısından kurtulmak mümkün hâle gelecektir. Bu da aracısız, düşük-orta maliyetlerle şirketlerin dünya çapındaki talebi karşılamasına olanak sağlamaktadır.
- Eklemeli üretim tekniği, şirketlerin artan parça çeşitliliğini karşılamak için gerekecek yüksek yatırım maliyetlerini ortadan kaldırarak şirketlerin geniş pazarlara erişmesini kolaylaştırır.
- Eklemeli üretim tekniği, ölçek ekonomisi için gereken sermaye gereksinimi azaltır. Öte yandan, esnekliği artırarak, işin kapsamıyla veya hacmiyle doğru orantılı olan sermaye ihtiyacını da azaltır.

Şirketlerin tedarik zincirlerine eklemeli üretim tekniklerini entegre edebilmeleri veya yaygınlaştırabilmeleri için 4 temel taktiksel yol olduğu belirtilmiştir (Şekil 2.15) [10]:

Seçenek 1: Şirketler mevcut tedarik zincirleri ve ürünlerinde radikal değişikliğe gitmeden, mevcut ürün ve teslimatlarında değer yaratmak amacıyla eklemeli üretim tekniklerini araştırabilirler.

Seçenek 2: Şirketler, eklemeli üretim tekniğinin getirmiş olduğu ölçek ekonomisi avantajından yararlanarak sundukları ürünlerin tedarik zincirinin dönüőtürölmesinde eklemeli üretimden yararlanırlar.

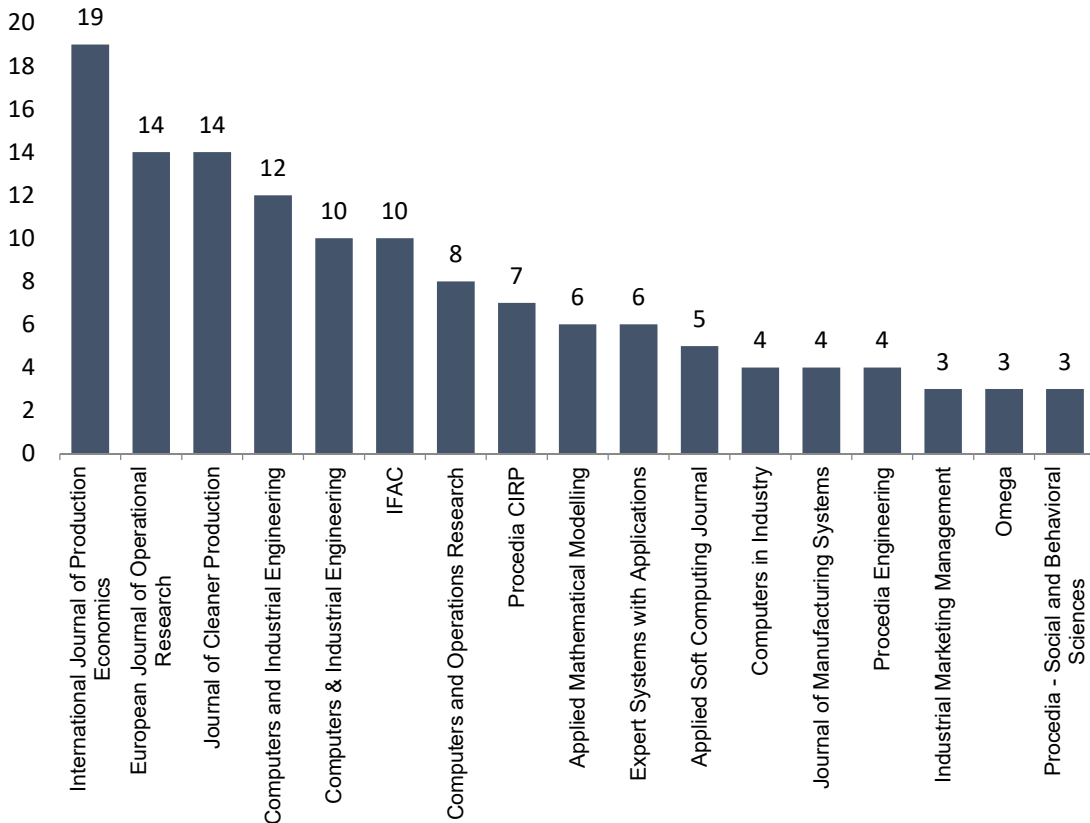
Seçenek 3: Şirketler, eklemeli üretim tekniğinin yarattığı kapsam ekonomisinden yararlanarak ürün inovasyonlarıyla ve performans iyileőtirmeleriyle avantaj sağlarlar.

Seçenek 4: Şirketler hem ürün hem de tedarik zincirlerini deėiőtirerek yeni iş yapıő modellerini gerçekleőtirmeye çalışırlar.



Şekil 2.15 Eklemeli üretim - tedarik zinciri etki matrisi [10]

Bu bölümde, tedarik zinciri süreçleri, yedek parça imalat türleri ve dağıtım seçenekleri, modelleme teknikleri ve benzer konuları kapsayan literatür araştırması yer almaktadır. Sciencedirect, Web of Science, Scopus, Research Gate, Google Scholar arama portallarında ve ulusal tez merkezlerinde yüzlerce çalışma taranmış, bunların içerisinde çalışma konusuna yakın olabilecek yayınların sınıflandırılması yapılmıştır (Tablo 3.1). Bununla beraber, çözüm tekniklerinin ve kapsamın belirginleştirilmesi açısından, yayınlar optimum sonuç veren çalışmalar, optimuma yaklaşık sonuç veren çalışmalar ve diğer metotların kullanıldığı çalışmalar şeklinde detaylı bir şekilde açıklanmıştır. Çalışmaların %80'inin yer aldığı, yararlanılan platformlar Şekil 3.1'de gösterilmektedir.



Şekil 3.1 Çalışmaların yayınlandıkları platformlara göre dağılımları

Tablo 3.1 Konu ile ilgili literatürün sınıflandırılması

Çalışmanın Yazarı	Yayınlanma Tarihi	Sektör	Alan	Uygulama			Çözüm Yaklaşımı				
				Varsayım	Gerçek Olay	Yok	Matematiksel				Kavramsal
							Sezgisel	Deterministik	Simülasyon	Diğer	
Schniederjans, D vd. [21]	2019	Genel	3D Printer			X					Sistem analizi
Berman, B vd. [22]	2012	Genel	3D Printer			X					Araştırma
Khajavi, S vd. [23]	2014	Havacılık	3D Printer	X					Monte-Carlo		
Barz, A vd. [24]	2016	Genel	3D Printer	X				IP			
Fahimnia, B vd. [25]	2018	Genel	Yeşil tedarik zinciri	X			GA, SA, CE				
Yeh, W [26]	2006	Genel	Tedarik zinciri	X			Hybrid				
Vignaux, G vd. [27]	1991	Genel	Ulaştırma	X			GA				
Altıparmak, F vd. [28]	2006	Plastik	Tedarik zinciri		X		GA				
Altıparmak, F vd. [29]	2009	Plastik	Tedarik zinciri		X		GA				
Lotfi, M vd. [30]	2013	Genel	Ulaştırma	X			GA				
Devika, K vd. [31]	2014	Cam	Tedarik zinciri		X		Hybrid				
Ghasimi, S vd. [32]	2014	Genel	Tedarik zinciri	X			GA				
Gorji, M vd. [33]	2014	Genel	Envanter optimizasyonu	X			GA				
Diabat, A [34]	2014	Genel	Envanter optimizasyonu	X			Hybrid				
Nasiri, G. Vd. [35]	2014	Genel	Tedarik zinciri	X			Hybrid				
Erbıyık, H vd. [36]	2015	Otomotiv	Tedarik zinciri		X					Six sigma	
Abraham, A vd. [37]	2015	Genel	Tedarik zinciri			X	GA				
Eskandarpour, M [38]	2015	Genel	Tedarik zinciri			X					Sistem analizi
Khalifehzadeh, S [39]	2015	Genel	Tedarik zinciri	X				MILP			
Çelebi, D [40]	2015	Genel	Envanter optimizasyonu	X			GA				

Tablo 3.1 Konu ile ilgili literatürün sınıflandırılması (devamı)

Çalışmanın Yazarı	Yayınlanma Tarihi	Sektör	Alan	Uygulama			Çözüm Yaklaşımı				
							Matematiksel				Kavramsal
				Varsayım	Gerçek Olay	Yok	Sezgisel	Deterministik	Simülasyon	Diğer	
Ahmadizar, F vd. [40]	2015	Genel	Tedarik zinciri	X			HGA				
Roosbeh, N vd. [41]	2015	Genel	Yeşil tedarik zinciri	X			HGA				
Dong, Y vd. [42]	2015	Enerji	Tedarik zinciri		X						Oyun Teorisi
Afrouzy, A vd. [43]	2016	Genel	Ürün geliştirme	X			GA				
Pires, M, vd. [44]	2016	Yedek parça	Tedarik zinciri			X					İnceleme
Huang, M vd. [45]	2016	Genel	Tedarik zinciri	X				LP			
Masoud, S vd. [46]	2016	Otomotiv	Tedarik zinciri	X			HGA	MILP			
Robles, J Vd. [47]	2016	Enerji	Tedarik zinciri		X		GA				
Diabat, A vd. [48]	2016	Genel	Tedarik zinciri	X			HGA	MINLP			
Ardjmand, E vd. [49]	2016	Kimya	Atama	X			GA				
Zhang, L vd. [50]	2016	Metal	Tedarik zinciri		X		GA				
Hiassat, A vd. [51]	2017	Perakende	Tedarik zinciri	X			GA				
Yılmaz, Ö vd. [52]	2017	Genel	Tedarik zinciri	X			ABC, GA				
Cui, Y vd. [53]	2017	Perakende	Tedarik zinciri	X			ABC				
Dolgui, A vd. [54]	2018	Genel	Tedarik zinciri			X					Endüstri 4.0
Monostori, J [55]	2018	Genel	Tedarik zinciri			X					Endüstri 4.0
Saghaeeian, A vd. [56]	2018	Genel	Tedarik zinciri	X			Hybrid				
Fazayeli, S vd. [56]	2018	Genel	Ulaştırma	X			GA				
Torkaman, S vd. [56]	2018	Metal	Üretim planlama		X		SA, GA				
Dai, Z vd. [57]	2018	Perakende	Tedarik zinciri	X			HGA, HHS				
Doolun, I vd. [58]	2018	Otomotiv	Atama	X			Hybrid				
Reddy, K vd. [59]	2019	Genel	Tedarik zinciri			X					PMS
Saif-Eddine, A vd. [60]	2019	Genel	ILRP	X			GA				
Tamannaei, M vd. [61]	2019	Genel	Çizelgeleme	X			GA	MILP			
Saragih, N vd. [62]	2019	Perakende	ILRP		X		SA	MINLP			

Tablo 3.1 Konu ile ilgili literatürün sınıflandırılması (devamı)

Çalışmanın Yazarı	Yayınlanma Tarihi	Sektör	Alan	Uygulama			Çözüm Yaklaşımı				
				Varsayım	Gerçek Olay	Yok	Matematiksel				Kavramsal
							Sezgisel	Deterministik	Simülasyon	Diğer	
Setak, M vd. [63]	2019	Perakende	Tedarik zinciri	X			Hybrid				
Govindan, K vd. [64]	2019	Genel	Araç rotalama	X			PSO, GA, ABC				
Khalifehzadeh, S vd. [65]	2019	Perakende	Tedarik zinciri		X		FA, GA	MILP			
Abdi, A vd. [66]	2019	Perakende	Yeşil tedarik zinciri		X		SA, GA, RDA	MINLP			
Rajendran, S vd. [67]	2019	Sağlık	Tedarik zinciri		X		GA	IP			
Mousavi, S vd. [68]	2019	Perakende	ILAP	X			MGA, PSO	MINLP			
Shoja, A vd. [69]	2019	Perakende	Tedarik zinciri	X			GA	MILP			
Bag, S vd. [70]	2020	Madencilik	Tedarik zinciri		X					AI, ML	Sistem analizi
Syam, N vd. [71]	2018	Genel	Satış			X				AI, ML	Talep tahmin
Baryannis, G vd. [72]	2019	Genel	Tedarik zinciri			X					Risk analizi
Vieira, A vd. [73]	2019	Otomotiv	Tedarik zinciri		X				Simio	AI, ML	Karar destek sistemi
Piramuthu, S [74]	2005	E-ticaret	Tedarik zinciri	X						AI, ML	
Carbonneau, R vd. [75]	2008	Metal	Tedarik zinciri	X						AI, ML, NN	Talep tahmin
Turrini, L vd. [76]	2017	Yedek parça	Envanter optimizasyonu			X					Talep tahmin
Lengu, D vd. [77]	2014	Yedek parça	Envanter optimizasyonu			X					Talep tahmin
Diabat, A vd. [78]	2015	Genel	ILP	X				MINLP			
Zhijie, H vd. [79]	2017	Genel	Envanter optimizasyonu			X					Talep tahmin
Feldmann, C vd. [80]	2017	Genel	3D Printer			X					Karar destek sistemi
Holmström, J vd. [81]	2010	Yedek parça	Tedarik zinciri			X					Rapid üretim
Zhikang, L [82]	2017	Otomotiv	Ters lojistik		X						SWOT analizi

Tablo 3.1 Konu ile ilgili literatürün sınıflandırılması (devamı)

Çalışmanın Yazarı	Yayınlanma Tarihi	Sektör	Alan	Uygulama			Çözüm Yaklaşımı				
				Varsayım	Gerçek Olay	Yok	Matematiksel				Kavramsal
							Sezgisel	Deterministik	Simülasyon	Diğer	
Chekurov, S vd. [83]	2017	Elektronik	3D Printer			X			Monte-Carlo		
Basten, R vd. [84]	2014	Yedek parça	Envanter optimizasyonu			X					Sistem analizi
Molenaers, A vd. [85]	2012	Kimya	Envanter optimizasyonu		X						AHP
Zahurul, D vd. [86]	2013	Genel	Lojistik		X						İnceleme
Kurilova, J vd. [87]	2018	Genel	Remanufacturing			X					Yalın üretim
Dombrowski, U vd. [88]	2017	Genel	Servis planlama			X					Yalın üretim
Lavastre, O vd. [89]	2012	Genel	Tedarik zinciri			X					Risk analizi
Espíndola, D vd. [90]	2012	Genel	Tedarik zinciri			X					Sistem analizi
Sleptchenko, A vd. [91]	2018	Yedek parça	İşgücü planlama		X			MIP			
Wu, M vd. [92]	2011	Genel	Tedarik zinciri	X			GA				
Grieger, M [93]	2003	E-ticaret	Tedarik zinciri			X					İnceleme
Neto, J vd. [94]	2009	Genel	Ters lojistik			X		LP			
Tang, Y vd. [95]	2018	Tarım	Envanter optimizasyonu	X				MIP			
Zhang, J vd. [96]	2017	Otomotiv	Remanufacturing		X						Araştırma
Wu, M vd. [97]	2008	Yedek parça	Envanter optimizasyonu	X			GA				
Hellingrath, B vd. [98]	2013	Yedek parça	Satış			X					Talep tahmin
Subramoniam, R vd. [99]	2010	Otomotiv	Aftermarket			X					Araştırma
Forster, C vd. [100]	2013	Otomotiv	Tedarik zinciri			X					İnceleme
Hedvall, K vd. [101]	2016	Otomotiv	Servis planlama			X					Sistem analizi
Ferreira, J [102]	2007	Otomotiv	Ürün yaşam çevrimi			X					İnceleme

Tablo 3.1 Konu ile ilgili literatürün sınıflandırılması (devamı)

Çalışmanın Yazarı	Yayınlanma Tarihi	Sektör	Alan	Uygulama			Çözüm Yaklaşımı				
							Matematiksel				Kavramsal
				Varsayım	Gerçek Olay	Yok	Sezgisel	Deterministik	Simülasyon	Diğer	
Bacchetti, A vd. [103]	2012	Yedek parça	Envanter optimizasyonu			X					İnceleme
Seles, B vd. [104]	2016	Otomotiv	Yeşil tedarik zinciri			X					Sistem analizi
Rudolph, J vd. [105]	2017	Genel	3D Printer	X							Endüstri 4.0, Cloud sistem tasarımı
Pour, M vd. [106]	2017	Yedek parça	3D Printer	X						Parametrik analiz, DOE	
Thomé, T vd. [107]	2014	Otomotiv	Tedarik zinciri			X					Araştırma
Tiemessen, H vd. [108]	2013	Yedek parça	Envanter optimizasyonu	X						Çalışmaya özgü dinamik atama modeli	
Strong, D vd. [109]	2018	Metal	3D Printer		X						İnceleme
Topan, E vd. [110]	2017	Genel	Envanter optimizasyonu	X			Hybrid				
Hu, Q vd. [111]	2017	Yedek parça	Envanter optimizasyonu		X						ABC sınıflandırma
Levner, E vd. [112]	2011	Yedek parça	Envanter optimizasyonu	X			Çalışmaya özgü algoritma				
Grassi, A vd. [113]	2015	Otomotiv	Envanter optimizasyonu	X						Probabilistic dynamic programming	
Padhi, S vd. [114]	2018	Genel	Tedarik zinciri		X					Fuzzy	Karar destek sistemi

Tablo 3.1 Konu ile ilgili literatürün sınıflandırılması (devamı)

Çalışmanın Yazarı	Yayınlanma Tarihi	Sektör	Alan	Uygulama			Çözüm Yaklaşımı				
				Varsayım	Gerçek Olay	Yok	Matematiksel				Kavramsal
							Sezgisel	Deterministik	Simülasyon	Diğer	
Al-aomar, R vd. [115]	2018	Hizmet	Tedarik zinciri		X						Yalın üretim
Eskandarpour, M vd. [116]	2017	Genel	Tedarik zinciri	X			LNP	LP			
Abdel-basset, M vd. [117]	2018	Genel	Tedarik zinciri	X							AHP, IoT
Israel, F vd. [118]	2017	Yedek parça	Tedarik zinciri	X				MILP			
Bilir, C vd. [119]	2017	Genel	Tedarik zinciri	X				MILP			
Gao, J vd. [120]	2018	Genel	Yeşil tedarik zinciri	X				MINLP			
Pettersson, A vd. [121]	2013	Genel	Tedarik zinciri		X					Maliyet analizi	Performans değerlendirme
Özceylan, E [122]	2016	Genel	Tedarik zinciri	X				MIP			
Blackhurst, J vd. [123]	2018	Genel	Tedarik zinciri	X						Petri net	Risk analizi
Monostori, J [124]	2018	Genel	Tedarik zinciri			X					İnceleme
Hong, J vd. [125]	2018	Genel	Tedarik zinciri	X			ACO		Monte-Carlo		
Alzaman, C vd. [126]	2018	Genel	Tedarik zinciri	X			Hybrid	MINLP			
Taleizadeh, A vd. [127]	2018	Genel	Tedarik zinciri	X						Nash game	
Giannoccaro, I [128]	2018	Genel	Tedarik zinciri		X						Araştırma
Fahimnia, B vd. [129]	2018	Perakende	Yeşil tedarik zinciri	X			GA, SA, CE				
Karuna, G vd. [130]	2018	Genel	Sipariş atama	X				LP			AHP
Luthra, S vd. [131]	2018	Genel	Tedarik zinciri			X					Endüstri 4.0
Jia, F vd. [132]	2018	Genel	Tedarik zinciri			X					Literatür araştırması
Stefansdottir, B vd. [133]	2018	Perakende	Tedarik zinciri	X				MILP			Teknoloji seçimi
Sinayi, M vd. [134]	2018	Genel	Tedarik zinciri	X				Çalışmaya özgü model			

Tablo 3.1 Konu ile ilgili literatürün sınıflandırılması (devamı)

Çalışmanın Yazarı	Yayınlanma Tarihi	Sektör	Alan	Uygulama			Çözüm Yaklaşımı				
				Varsayım	Gerçek Olay	Yok	Matematiksel				Kavramsal
							Sezgisel	Deterministik	Simülasyon	Diğer	
Pant, K vd. [135]	2018	Genel	Tedarik zinciri	X				MILP			
Büyükoçkan, G vd. [136]	2018	Genel	Dijital tedarik zinciri			X					Literatür araştırması
Badiezadeh, T vd. [137]	2018	Perakende	Tedarik zinciri		X					DEA	Performans değerlendirme
Rezapour, S vd. [138]	2017	Otomotiv	Tedarik zinciri		X			MINLP			
Zeng, B vd. [139]	2017	Genel	Tedarik zinciri	X							Risk analizi
Liebetruth, T [140]	2017	Genel	Tedarik zinciri			X					Performans değerlendirme
Kembro, J vd. [141]	2017	Genel	Tedarik zinciri		X						Bilgi paylaşımının etkileri, Delphi tekniği
Basiri, Z vd. [142]	2017	Perakende	Yeşil tedarik zinciri	X				Çalışmaya özgü model			Karar destek sistemi
Qu, T vd. [143]	2017	Genel	Tedarik zinciri	X				ALC			
Fan, Y vd. [144]	2017	Genel	Ulaştırma	X						Stokastik programlama	
Carvalho, H vd. [145]	2017	Genel	Yeşil tedarik zinciri	X				LP			Yalın üretim
Chen, L vd. [146]	2017	Genel	Tedarik zinciri			X					Literatür araştırması
Puji, K vd. [147]	2017	Genel	Yeşil tedarik zinciri	X				Tchebycheff yaklaşımı			

Tablo 3.1 Konu ile ilgili literatürün sınıflandırılması (devamı)

Çalışmanın Yazarı	Yayınlanma Tarihi	Sektör	Alan	Uygulama			Çözüm Yaklaşımı				
				Varsayım	Gerçek Olay	Yok	Matematiksel				Kavramsal
							Sezgisel	Deterministik	Simülasyon	Diğer	
Baumgartner, R vd. [148]	2017	Genel	Tedarik zinciri		X						Sürdürülebilirlik araştırması
Soleimani, H vd [149]	2017	Genel	Yeşil tedarik zinciri	X						Fuzzy logic	
Özceylan, E vd. [150]	2017	Otomotiv	Tedarik zinciri	X				LP			
Liu, F vd. [151]	2017	Genel	Tedarik zinciri	X				MIP		DEA	GBM, performans değerlendirme
Merlino, M vd. [152]	2017	Genel	Dijital tedarik zinciri			X					Sanal gerçeklik
Arapantzi, C vd. [153]	2017	Genel	Tedarik zinciri	X				MILP			
Qi, Y vd. [154]	2017	Genel	Tedarik zinciri		X						Strateji araştırması
Rajeev, A vd. [155]	2017	Genel	Yeşil tedarik zinciri			X					Literatür araştırması
Yue, D vd. [156]	2017	Kimya	Tedarik zinciri		X			MIBP			
Bechtsis, D vd. [157]	2017	Genel	Yeşil tedarik zinciri			X					AGV incelemesi
Amirtaheri, O vd. [158]	2017	Genel	Tedarik zinciri	X			GA, PSO				Stackelberg game
Brito, J vd. [159]	2016	Genel	Tedarik zinciri			X			Proses modelleme		Literatür araştırması
Dong, Q vd. [160]	2016	Elektronik	Tedarik zinciri		X						Risk analizi, AHP

Tablo 3.1 Konu ile ilgili literatürün sınıflandırılması (devamı)

Çalışmanın Yazarı	Yayınlan ma Tarihi	Sektör	Alan	Uygulama			Çözüm Yaklaşımı				
				Varsayım	Gerçek Olay	Yok	Matematiksel				Kavramsal
							Sezgisel	Deterministik	Simülasyon	Diğer	
Bogers, M vd. [161]	2016	Genel	3D Printer			X					Araştırma
Boulaksil, Y [162]	2016	Genel	Envanter optimizasyonu	X					MMFE		
Jia, F vd. [163]	2016	Perakende	3D Printer	X					ExtendSim		İş modeli geliştirme
Fischer, J vd. [164]	2016	Otomotiv	Tedarik zinciri		X						Performans değerlendirme
Shakourloo, A vd. [165]	2016	Genel	Tedarik zinciri	X				ILP		Fuzzy AHP	
Giannakis, M vd. [166]	2016	Genel	Tedarik zinciri		X						FMEA
Baud-lavigne, B vd. [167]	2016	Genel	Tedarik zinciri	X				MILP			
Fahimnia, B vd. [168]	2015	Metal	Yeşil tedarik zinciri		X			NLP	NICE		Yalın üretim
Nikfarjam, H vd. [169]	2015	Genel	Tedarik zinciri	X						DEA, NN	Performans değerlendirme
Claypool, E vd. [170]	2014	Genel	Tedarik zinciri	X				MIP	ARENA		Risk modelleme
Mendoza, J [171]	2014	Genel	Tedarik zinciri			X					AHP, SCOR
Akdogan, A vd. [172]	2014	Genel	Tedarik zinciri		X						Yönetmel rollerin araştırılması
Mastragostino, R vd. [173]	2014	Genel	Tedarik zinciri	X						MPC	Karar destek sistemi
Liao, S vd. [174]	2014	Elektronik	Tedarik zinciri		X					CFA	Araştırma
Vlachos, I [175]	2014	Perakende	Dijital tedarik zinciri		X						RFID performans analizi
Pawlewski, P [176]	2013	Otomotiv	Tedarik zinciri		X				MS Excel		
Mula, J vd. [177]	2010	Genel	Tedarik zinciri			X					Literatür araştırması
Min, H vd. [178]	2002	Genel	Tedarik zinciri			X					İnceleme
Hishamuddin, H vd. [179]	2015	Genel	Tedarik zinciri	X					Çalışmaya özgü model		

3.1 Optimum Sonuç Veren Çalışmalar

Bu başlık altında incelenen çalışmalar, elde bulunan farklı kaynakların, belirli bir amaca uygun bir şekilde kullanılmasına yönelik yapılan araştırmaları kapsamaktadır. Bunlar, maliyet minimizasyonu, kâr maksimizasyonu, kapasite kullanım ve verimliliğin maksimizasyonu olabilmektedir. Alt problemler göz önünde bulundurulduğunda, tedarik zinciri içerisinde, tesis yeri seçimi, araç rotalama, yükleme, atama problemleri, doğrusal programlama, doğrusal olmayan programlama, tamsayılı programlama, dinamik programlama gibi yöntemlerle çözülüp, optimum sonuç bulunabilir. Aşağıdaki paragraflarda, yedek parça tedarik zinciri üzerine yapılmış çalışmalar görülebilmektedir.

Ali Diabat, Tarek Abdallah, Andreas Henschel'in 2015 yılında yayınladıkları çalışmalarında, diğerlerinden farklı olarak, yeniden işleme merkezlerinin de hesaba katıldığı karma tamsayılı, non-lineer matematiksel modellerle kapalı döngüde lokasyon-envanter dağıtım merkezlerinin belirlenmesi hedeflenmiştir. Problemin çözümünde iki aşamalı lagrangian rahatlatma algoritmasından yararlanılmıştır. Tek ürün ve farklı perakendecilerin verilerinin kullanıldığı çalışmada sonuçlar ve duyarlılık analizi paylaşılmıştır. Buna göre, farklılaştırılan tesis yerleri ve sayıları sayesinde envanter maliyetinde azalma görülürken, taşıma maliyetlerinde artış gerçekleşmiştir. Tedarik zincirinde ek olarak kapasite ve rotalama problemlerinin, lokasyon belirleme problemiyle beraber göz önünde bulundurulmasının sonraki araştırmalarda katma değer yaratacağı vurgulanmıştır [78].

Jan-Peer Rudolph ve Claus Emmelmann, 2017 yılında yayınladıkları çalışmada endüstri 4.0 ile beraber gelişen eklemeli üretim tekniklerinin, diğer klasik üretim teknikleriyle kıyaslaması yapılmıştır. Maliyet modelleri ortaya konmuş ve hangi ürün tipinin nasıl üretilmesi gerektiğine karar verebilecek web arayüzüne sahip bulut sistem tasarımı gösterilmiştir. Konvansiyonel tekniklere oranla, daha verimli ve etkin bir sipariş verme süreci sonuç olarak ortaya konmuştur [105].

Samir Sebbah, Ahmed Ghanmi ve Abdeslem Boukhtouta, Kanada ordusunda besin, sağlık malzemeleri, inşaat malzemeleri, mermi ve diğer yedek parçaların dağıtım stratejisinin belirlenmesi amacıyla sütun kesme algoritmaları kullanılarak verimlilik, etkinlik ve güvenlik kriterleri göz önünde bulundurularak çözüm

algoritması geliştirmişlerdir. Taşıma maliyetlerinin ve sürelerinin minimizasyonun hedeflendiği çalışmada, taşıma esnasında hangi araçların kullanılacağı ve rotalarının nasıl olması gerektiği tespit edilmiştir [180].

Rainer Kleber, Stefan Minner ve Gudrun Kiesm. Uller, üretim ve envanter yönetiminde, bitmiş ürün, geri gönderilen ürünler ve yedek parçalar için talep planmada deterministik bir model üretmişlerdir. Çalışmada, statik bakış açısı yerine sürekli zaman ve dinamik çerçeve benimsenmiştir. Doğrusal maliyet modelinde, Pontryagin'in maksimum prensibinden yararlanılmıştır [181].

2017 yılında yayınlanan makalede, yedek parçaların envanter seviyelerinin belirlenmesi amacıyla dinamik programlamadan yararlanılarak matematiksel bir model geliştirilmiştir. Backorder maliyetlerini minimize etmek için envanter seviyeleri heuristik teknikler kullanılarak modellenmiştir [182].

Saman Hassanzadeh Amin, Guoqing Zhang tarafından yayınlanan makalede, kapalı döngü tedarik zinciri ağı için tesis yeri belirleme modeli önerilmiştir. Model, farklı fabrikalar, talep merkezleri, toplama merkezleri ve ürünler göz önünde bulundurularak tasarlanmıştır. Çok amaçlı programlama, karma tam sayılı lineer programlama, stokastik programlama araçları kullanılmıştır. Sonuçlar, modelin talep ve iadelerin belirsizliğini eş zamanlı bir şekilde çözümleyebildiğini göstermiştir [183].

Enzo Morosini Frazzon, Eduardo Israel, André Albrecht, Carlos Eduardo Pereira ve Bernd Hellgrath, yedek parça tedarik zincirinin stratejik, taktiksel ve operasyonel planlamasına değinmişlerdir. Operasyonel planlamaya yönelik, üretim, envanter, nakliye, hazırlık maliyetlerinin yer aldığı karma tamsayılı doğrusal programlama modeli önerilmiştir. Ortaya çıkan veriler simülasyon yardımıyla test edilmiştir. Sonuç olarak, yedek parça kaynaklı bekleme zamanının minimize edildiği sonucuna varılmıştır [184].

Oscar Salviano ve Frederic Andres'in makalesinde orta ve uzun vadeli envanter planlamalarının her zaman alışılgediği ancak 80 ve 90'larla beraber tersinir lojistik işlemlerinin bunlar kadar göz önünde bulundurulmadığından bahsedilmiş

ve tedarik zincirine dahil olabilecek tamir edilmiş, düzeltilmiş parçaların talebinin de göz önünde bulundurulduğu stokastik bir model ortaya konmuştur [185].

Lorenzo Tiacchi ve Stefano Saetta'nın makalesinde, ortalama tedarik süresini azaltmak amacıyla, birden fazla depo arasında envanter transferi yoluyla envanter havuzu kurulmuş ve standart sapmayı da azaltacak şekilde matematiksel modelleme yapılmıştır [186].

Tarım makinelerinin ve taşıtlarının yedek parça maliyetlerini minimize etmeyi amaçlayan matematiksel bir model kurulmuştur. Sipariş verme maliyeti, elde bulundurma maliyeti, taşıma maliyeti ve ilgili lokasyonlar ve talepler modelde yer almıştır, gerçek veriler kullanılarak model çözdürülmüştür. Önerilen model sayesinde %10'luk bir maliyet iyileştirme fırsatı sunulmuştur [95].

Esra Koca ve E. Alper Yıldırım, birden fazla yedek parçanın, merkezi depodan farklı talep noktalarına olan sevkiyat maliyetlerini minimize etmek adına tam sayılı doğrusal programlama modeli kurmuşlardır. Toplu sevkiyat ile toplam sevkiyat maliyetinin azaltılabileceği savunulmuştur [187].

Erhan Kutanoglu ve Divi Lohiya 2008 yılında yayınladıkları çalışmada, birden fazla tesis ve ulaştırma modelleri için optimizasyon modeli önerilmiştir [188].

Robert Ausgutsson ve Denijel Becevic, stok sınıflandırılmasının yapıldığı ve eklemeli üretim tekniğiyle otomotiv yedek parça üretimi üzerine vaka çalışmasının paylaşıldığı master tezlerini 2015 yılında yayınlamışlardır [189].

3.2 Optimuma Yaklaşık Sonuç Veren Çalışmalar

Optimum sonuca ulaşmanın çok uzun sürmesi, maliyetinin yüksek olması veya imkansız olması durumlarda, alternatif çözüm tekniklerine başvurulmaktadır. Bunların içerisinde en çok yararlanılanlar genetik algoritmalar, tavlama benzetimi, simülasyon, yapay sinir ağları, tabu arama, parçacık sürü optimizasyonu örnek verilebilir. Bu çalışmalarla, sonucun optimum olduğu garanti altına alınamasa da, yakın sonuçlara kısa sürede ve göreceli olarak daha düşük maliyetlerle ulaşabilmektedir. Bunlara dair çalışmalara bu bölümde yer verilmektedir.

Sergei C ve Mika S, elektronik parçaların eklemeli üretim yöntemiyle tamir edilmesi durumunda monte carlo simülasyonundan da yararlanarak 14 günlük sürenin 3 güne indirilebileceğini raporlamışlardır. Mevcut ve gelecek durumlara ait modellere yer verilmiştir. Ayrıca gerçek bir vaka analizi yapılmış ve görseller sunulmuştur [83].

Wenbin Wang, Shuai Yue tarafından yayınlanan çalışma, birden fazla şirketin ihtiyacı olan yedek parçaları nasıl yönetmeleri gerektiğine dair bir çözüm sunmaktadır. Buna göre en yüksek maliyet kalemi depolama maliyeti olarak tespit edilmiştir. Bu durumda şirketlerin, depolama maliyetlerini düşürmeleri durumunda stoksuz kalma maliyetine katlanmaktansa, depoda kritik yedek parçaları hazırda bekletmelerinin mantıklı olacağı savunulmuştur. Acil durum eşiği ve seçilen şirketlerin verileri göz önünde bulundurularak, matematiksel model oluşturulmuş ve çözümü makalede paylaşılmıştır [190].

Qiwei Hu, John E. Boylan, Huijing Chen ve Ashraf Labib, yedek parçaların elde bulundurulması, ekipmanların arızalı kaldıkları sürelerin azaltılmasında önemli rol oynadığına değinmişlerdir. Bu çalışmada yazarlar, yedek parça yönetimini, ürün geliştirme aşamasından, amaçlara ve ana görevlere, yöneylem araştırması metodlarını da dahil ederek, ortak bir çerçeveye oluşturup incelemişlerdir. Geleceği yönelik perspektif ortaya konulmuştur [191].

Andrea Bacchetti, Nicola Sacconi'nin makalesinde, yedek parçaların talep yapıları, farklı maliyetleri ve servis gereksinimleri nedeniyle farklı sınıflandırmalara ihtiyaç duyulduğu belirtilmiştir. ABC ve AHP gibi kalitatif ve kantitatif sınıflandırma teknikleri özet bir tablo ile sunulmuştur [103].

Qiwei Hu, Salem Chakhar, Sajid Siraj ve Ashraf Labib, yedek parça yönetimi için DRSA (Dominant based rough set approach) metodu kullanılarak, 3 aşamalı çok kriterli sınıflandırma yöntemi önermişlerdir. Endüstrideki uzmanlara göre, yapılan bu sınıflandırma %96 oranında başarılı bulunmuştur. Yazarlara göre ABC analizi her ne kadar yaygın kullanıma sahip olsada sadece yıllık maliyetler üzerinden sınıflandırma yapmaya olanak sağlamasının diğer unsurları göz ardı etmesinin dezavantaja yol açmaktadır. Çalışmada, tedarik süresi, talep, bulunabilirlik ve değiştirilebilirlik gibi diğer kriterler de göz önünde bulundurulmuştur [111].

Danielle Strong, Michael Kay, Brett Conner, Thomas Wakefiel ve Guha Manogharan, eklemeli üretim verilerinin sağlandığı, karma üretim sisteminin önerildiği, matematiksel modellerin yer aldığı bir çalışma yayınlamışlardır [109].

Pankaj Sharma, Makarand S Kulkarni ve Vikas Yadav, arızalanan parçaların tedarik süresini kısaltmak amacıyla, parçaların ne sıklıkla arızalandığı simülasyon modelleriyle tespit etmişlerdir. Buna göre, ortak kullanılabilir yedek parçaların gruplandırılması ve seçici bakım faaliyetlerinin yapılması önerilmiştir. Çalışmada, bir ülkenin ordusunda yer alan envanterlere dair veriler kullanılmıştır [192].

Hamid Ashfari, Masoud Sharifi, Tarek Y. ElMekkawy, Qingjin Peng, 2014 yılında yayınladıkları makalede, karma tamsayılı programlama ve genetik algoritma kullanılarak tesis yeri seçimine çalışmışlardır [193].

Peter K. Chemweno, Liliane Pintelon, Peter Muchiri, simülasyondan yararlanarak yedek parça havuzlama stratejisinin değerlendirilmesine çalışmışlardır [194].

Muh-Cherng Wu ve Yang-Kang Hsu, genetik algoritmadan yararlanarak, malzeme kalitesinin kullanılabilir envanter miktarına etki eden ürünlerin yedek parça ürün reçeteleri için konfigürasyon önerisi yapmışlardır [97].

3.3 Diğer Metotların Kullanıldığı Çalışmalar

Çözüm metodlarına değinilen çalışmaların dışında, tedarik zinciri üzerine çalışılmış bir çok kavramsal çalışma, yeni teknolojilere dair raporlar, sektörel araştırmalar ve yalın üretim teknikleri gibi performansa etki eden yöntemlerin paylaşıldığı yayınlar da yer almaktadır. Bunlara ilişkin örnekler bu bölümde ilerleyen paragraflarda paylaşılacaktır.

Margarete A. Seitz 2007 yılında yayınladığı çalışmada, otomotiv sektöründe faaliyet gösteren OEM şirketlerinin arızalı motorların yeniden üretimi konusunda nasıl bir yol izlemesi gerektiğine dair araştırma paylaşılmıştır. Buna göre, şirketler için arızalı motorların yeniden işlenmesi, motorun yedek parça olarak tedarikçi firmalardan temini yerine ciddi bir seçenek olarak sunulmuştur. Şirketlerin kendi marka değerlerini korumak istemesi, hatalı olan parçaların rakipler tarafından

tespitini zorlaştırmak, maliyetleri düşürmek ve müşteri tatminini artırma gibi hedeflere değinilmiştir [195].

Ramesh Subramoniam, Donald Huisinğ ve Ratna Babu Chinnam, yayınladıkları çalışmada otomotiv sektörü için remanufacturing (yeniden üretim) üzerine karar destek sistemi tasarlanmıştır. Ayrıca Amerika ve Avrupa'dan farklı şirketlerde çalışan 18 yönetici ve mühendislerle anket çalışmasına yer verilmiştir. Buna göre katılımcıların %60'a yakını yedek parçaların ürün yaşam döngüsünün en başında tasarlanması gerektiği fikrini savunmuşlardır [99]. Aynı yazarlar ayrıca, otomotiv sektöründe yedek parça üretimi ve tedarik zinciri konusunda literatür araştırmalarını paylaşmışlardır. Yeniden üretim teknikleri, tedarik zinciri, ürün yaşam çevrimi, çevresel faktörler ve gelişen ekonomilere olan etkiler ve bunların birbirleriyle olan ilişkileri ortaya konulmuştur [196].

Jorge V. L. Silva, Rodrigo A. Rezende'nin 2013 yılında yayınladıkları çalışmalarında, eklemeli üretim ve 3D yazıcıların üretim ve lojistik alanlarına olası etkisi değerlendirilmiştir. Buna göre, sağlık ve uzay ve havacılık gibi sektörlerde, ilerleyen yıllarda şirketlerin maliyet avantajı elde etmek adına prototip geliştirme ve farklı lokasyonlarda düşük miktarlarda üretimlerde 3D yazıcı kullanmaları teknik detaylara yer verilerek tavsiye edilmiştir. Ayrıca, eklemeli üretim ile daha çevreci ve ülkelerin diğer kısıtlayıcı prosedürlerine maruz kalmadan lojistik faaliyetlerin yürütülmesinin daha faydalı olacağına değinilmiştir [197].

Vittorio Zanetti, Sergio Cavalieri ve Giuditta Pezzotta, eklemeli üretim ve ürün servis sistemleri üzerine yapılan çalışmalarında, ürüne ait konumsal yakınlık, yaşam döngüsü, oryantasyon, ilişkisel yakınlık taslakları üzerinden eklemeli üretimin servis sistemlerle olan etkileşimi sonraki çalışmalara zemin sağlamak amacıyla kategorileştirilmişlerdir. Bu sistematik yaklaşımla, iş modelleri, tedarik zinciri ve strateji geliştirme konularında kolaylık sağlanacağı tespit edilmiştir [198].

Simon Ford ve Melanie Despeisse yayınladıkları çalışmada, eklemeli üretimin avantajları ve dezavantajları karşılaştırmalı bir şekilde özetlenmiştir. Tasarım, malzeme işleme, üretim, süreklilik gibi konularda faaliyet gösteren farklı işletmeler değerlendirilmiştir. Çalışmanın sonunda eklemeli üretimin dünyadaki endüstri sistemlerinin sürekliliği üzerine ciddi bir katkı sağlayacağı tespiti yapılmıştır [198].

Massimo Zanardini, Andrea Bacchetti, Simone Zanoni ve Milad Ashourpour'un 2016 yılında yayınladıkları makalede, US Navy, Maersk, Dallara Automobili ve Us Postal Service gibi işletmelerde yedek parçaların teminini 3D yazıcılar yoluyla sağlandığından bahsedilmiştir ve bunlarla ilgili vaka analizleri paylaşılmıştır. Düşük hacimli üretim, yüksek çeşitlilik, tedarik süresinin daha kısa olması nedeniyle yedek parça üretiminin 3D yazıcılar aracılığıyla yapılmasının avantaj yaratacağı vurgulanmıştır [199].

Siavash H. Khajavi, Jouni Partanen, Jan Holmstrom'un yayınladıkları makalelerinde, eklemeli üretim teknikleri final ürünlerin üretilmesinde kullanılmaya başlanmasına karşın bilgisayar destekli üretim teknikleri konusunda daha fazla çalışılması gerektiğine değinilmiş ve yedek parça tedarik zincirine etkisine değinilmiştir. Vaka analizinde F-18 Super Hornet fighter'a ait tedarik zinciri seçilmiştir. 4 farklı senaryo çalışılmıştır. Bu senaryoların çıktılarına göre, eklemeli üretim tekniğiyle üretilmiş yedek parçalar için, daha düşük operasyon maliyeti, daha düşük zaman kayıpları, daha yüksek müşteri tatmini, daha fazla esneklik, daha düşük kapasite kullanımı, daha az envanter gereksinimi, daha az lojistik bilgisi gereksinimi ve daha yüksek sürdürülebilirlik avantajları raporlanmıştır [23].

Ruth Jiang, Robin Kleer, Frank T. Piller'ın yayınladıkları çalışmada, 65 uzmanın 1172 kalitatif yorum, 3510 kantitatif tahminlerinden yararlanarak 2030 yılında 3D yazıcıların kullanım alanları ve bunların ilgili senaryolarına değinilmiştir. Önceki çalışmalarda 3D yazıcı teknolojisinin sadece üretim alanlarına etkisinin olmadığı aynı zamanda sosyolojik etkilerinin olacağından bahsedilirken, mevcut çalışmada stratejik planlama ve karar verme süreçlerine de etki edeceğinden bahsedilmiştir [200].

Jelena Kurilova-Palisaitiene, Erik Sundin, Bonnie Poksinska, yalın üretim prensipleri göz önünde bulundurularak yedek parça üretimi ve tedarik sistemi üzerine kavramsal bir çalışma yapmışlardır. Buna göre, yedek parça üretiminde değer yaratan ve yaratmayan süreçler belirtilmiştir. Envanter bulundurma süresi, yedek parça bekleme süresi, gerekli bilgiyi bekleme süresi gibi maliyet yaratan bileşenler 4 farklı işletme için incelenmiştir. Bu işletmelere, standart operasyonların

uygulanması, sürekli akış yaratılması, kanban sipariş sistemi, takım çalışması, eğitimler, iş yeri düzenleme ve tedarikçilerle işbirliği yapılması önerilmiştir [87].

Uwe Dombrowski, Constantin Malorny'nin çalışmalarında, ürün tasarım aşamasından itibaren yalın üretim prensipleri kullanılarak yedek parçaların üretim ve tedarik zincirinin oluşturulması gerektiği üzerinde durulmuştur. Standardizasyon, 0 hata prensibi, akış prensibi, çekme prensibi, sürekli iyileştirme süreci, çalışanın oryantasyonu ve hedeflerle yönetim, atık oranlarının azaltılması ve görsel yönetim gibi yalın üretim tekniklerine değinilmekte ve bunların yedek parça tedarik zincirine olan entegrasyonu ile ilgili karşılaştırmalı bir metodoloji sunulmaktadır [201].

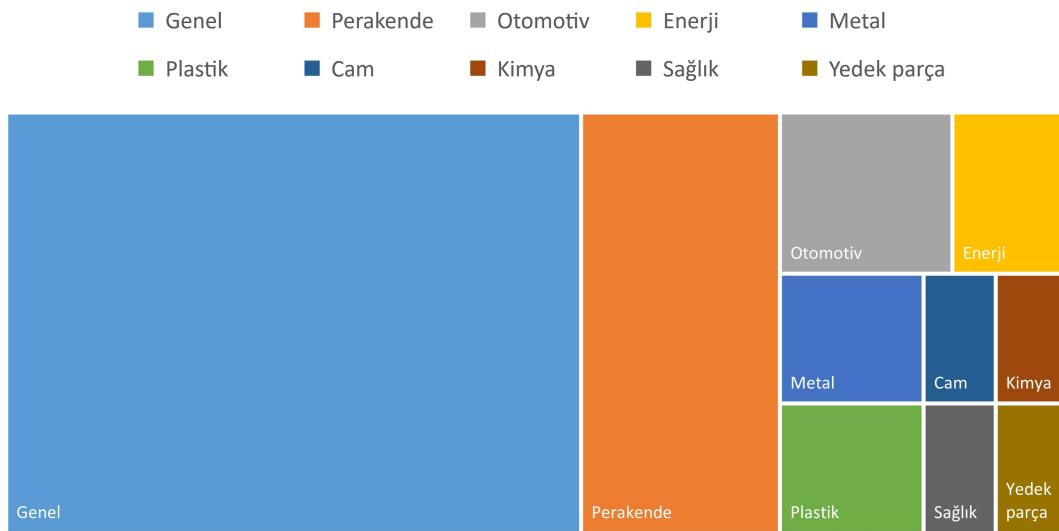
Jan Holmström, Jouni Partanen, Jukka Tuomi, and Manfred Walter'ın çalışmaları yedek parçaların rapid manufacturing teknikleri kullanılarak üretilebileceğinden bahsedilmiştir. Mevcut durumdaki üretim lokasyonları, depolama alanları, servis noktaları bir ağ içerisinde gösterilmiştir. Bununla beraber, rapid manufacturing tekniklerinin yedek parça üretimine olanak sağladığı bilinmesine rağmen, herhangi bir entegre tedarik zinciri çalışmasının yapılmadığına değinilmiştir ve herhangi bir matematiksel modele yer verilmemiştir [81].

Jan Holmström, Giacomo Liotta ve Atanu Chaudhuri, satış sonrası, kullanım, dağıtım, ürün tasarımı, operasyon aşamalarına dayalı süreçler ve ürünlerin sürekliliğini iyileştirmek için DDM (direkt dijital üretim) etkin bir araç olarak sunmuşlardır. Buna bağlı olarak çalışmada, ürün tasarımında sürekliliği sağlamak için DDM önerilmektedir ve tasarım aşamalarıyla olan etkileşimi ve çıktıları belirtilmektedir [202].

M. Braglia ve M. Frosolini, yedek parça verilerinin toplanması, kodlanması, sınıflandırılması ve temin edilme yöntemleri için önerilerde bulunmuşlardır. Yüksek maliyetli parçalara ihtiyacı olan farklı lokasyonların bu parçaları ortak stoklarında tutmalarını da sağlayan bir web tasarımı yapılmış ve yayında ekran görüntülerine yer verilmiştir [203].

3.4 Genel Değerlendirme

Eklemeli üretim merkezlerinin (3D yazıcıların) oldukça yeni olması nedeniyle bu konuda oldukça az sayıda yayın yapılmıştır ve yayınlarda tez çalışmasında bahsedilen matematiksel modeller yer almamaktadır. Genetik algoritma çözüm tekniklerine tedarik zinciriyle alakalı yayınlarda rastlanılmasına karşın, model yapılarının farklı olması nedeniyle benzer genetik algoritma modelinin geliştirilmediği görülmüştür. Çözüm algoritmaları modellerin gereksinimlerine uygun hâle getirildiğinden birbirinden ayrılmaktadır. Genetik algoritmanın kullanıldığı sektörlerin dağılımı Şekil 3.2’de gösterilmektedir, yedek parça dağıtım ağı üzerine geliştirilen çalışmaların sayısı oldukça düşük seviyededir.



Şekil 3.2 GA'nın kullanıldığı sektörler

Literatür araştırması sırasında, tez çalışması kapsamında çalışılan otomotiv yedek parça tedarik zinciriyle ilgili benzer bir çalışmaya rastlanılmamıştır.

Yedek parça üretiminde, çok çeşitli parçaların üretimi gerçekleştiğinden oldukça yüksek sayılarda ekipman, kalıp, makine gereksinimi doğmaktadır. Bundan dolayı, özellikle otomotiv ana sanayi projeleri devam eden fabrikalarda alan, makine ve ekipmanlar operasyon içerisindeki önemli kısıtlardandır. Sürekli değişen müşteri talepleri ve ürünler, üretim süreçlerinde de değişikliklere yol açmaktadır. Müşterilerle yapılan anlaşmalarla yedek parça imalatının en az 10 yıl devam edeceği de göz önünde bulundurulduğunda, siparişlerle beraber iş yükü artacak ve kaynakların kullanımı önem arz edecektir.

Tüm bu kaynakların optimizasyonunda üretim, depolama ve dağıtım süreçleri birlikte ele alınmalıdır. Bu çalışmanın kapsamı da böylelikle, tedarik zinciri içerisindeki üreticiler ve dağıtım merkezleri (distribütörler) arasındaki bölümle sınırlandırılmıştır.

Yedek parça tedarik zinciri üzerine yapılan çalışmada, iyi bir yedek parça tedarik zincirinden beklenen performans özetle, %98 müşteri talebini karşılama oranı (gerçekleşen ortalama %93), yılda 6-8 defa envanter çevrimi (gerçekleşen ortalama 3-4), %95 performansla 1 gün ve daha az sürede siparişin karşılanması (gerçekleşen ortalama 3-5 gün) ve lojistik maliyetlerinin (outbound ve depolama) satış fiyatının %5'ini geçmemesi (gerçekleşen ortalama %8) şeklindedir. Yine aynı çalışmada, etkin bir ERP sistemi ile tahmin hataları %40-%50, envanter seviyesi %20-%30 oranında azaltılabilir ve ileri analitik tekniklerle net kârlılık %2-%5 artırılabilir [204].

Bir başka araştırmada, müşterilerin araçları arızalandığında aldıkları yedek parçanın kaliteli olmasından çok, araçlarını en kısa sürede tekrar kullanabilmek istedikleri ortaya çıkmıştır. Müşterilerin beklentileri karşılığında aldıkları hizmetleri puanlamaları istendiğinde beklentilerinden %10-%15 daha düşük seviyede sonuç elde edilmiştir [9]. Araba modelleri, her yıl farklı tasarımlara sahip parçalarla üretildiğinden, tedarik zinciri boyunca elde bulundurulması gereken SKU

sayısı artmaktadır ve satış sonrası hizmetlerde, talep önceden yüksek doğrulukla tahmin edilememektedir. 1980’lerde 2 gün içerisinde ihtiyaçlarının karşılanması müşteri tatmin ederken, günümüzde bu süre çok kısalmıştır. Bununla beraber, bu ürünleri üretebilecek personelin zamanla azalması işletmeler için bir başka zorlayıcı unsurdur. Aynı sektörde hizmet verilmesine karşın orijinal araç (OEM) tedarik zinciri ve yedek parça(OES) tedarik zinciri arasında önemli farklılıklar bulunmaktadır (Tablo 4.1).

Tablo 4.1 OEM-OES tedarik zinciri arasındaki farklılıklar [9]

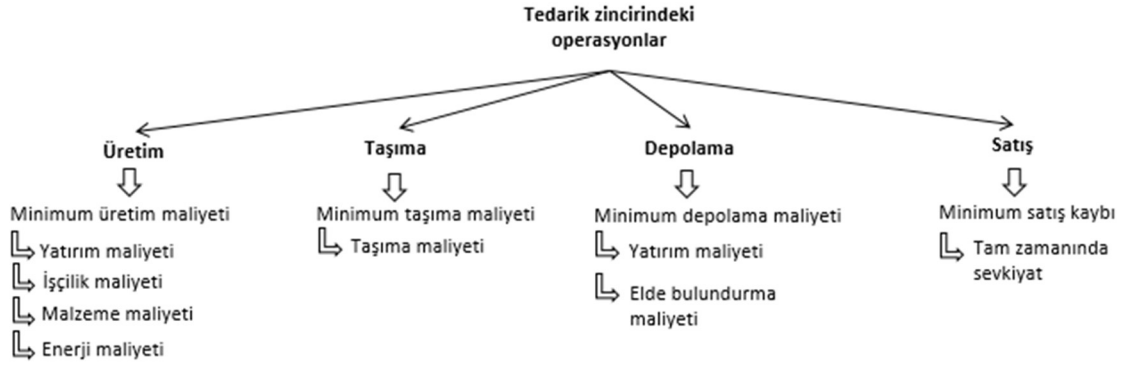
Parametre	OEM	OES
Talebin doğası:	Tahmin edilebilir	Düzensiz, tahmin edilemesi güç
Talebin karşılanması:	Standart, çizelgelenebilir	Aynı gün
SKU sayısı:	Kısıtlı	15-20 kat daha fazla
Ürün portfolyosu:	Homojen	Heterojen
Teslimat ağı:	Ürünün doğasına bağlı, çoklu ağ yapısı	Tekli ağ yapısı, farklı tipte ürün göndermek mümkün
Envanter yönetimi:	Kaynakların maksimum hızda kullanımı	Önceden ayarlanmış kaynak kullanımı
Ters lojistik:	Genellikle kapsam dışı	Hatalı parçalar geri dönüştürülebilir
Performans metriği:	Sipariş karşılama oranı	Ürün uygunluğu (zamanında)
Envanter çevrimi:	Yılda 6-50 arası	Yılda 1-4 arası

Buna göre;

- Pazar payını kaybetmemek adına, müşteri talebine cevap vermek için, ürünler talep geldiği anda gerekli miktarlarda hazır olmalılardır.
- Müşteri memnuniyetini sağlamak için siparişlere çok hızlı bir şekilde cevap verilmelidir.
- Yedek parça stok çeşitliliği(SKU) sayısı kümülatif olarak artacağından, çok satılan ürünler ile az satılan ürünler için farklı stratejiler belirlenmelidir.
- En az 10 yıl talep doğabilecek parçanın üretiminin sağlanması için kaynaklar (makine, malzeme, iş gücü, kalıplar vb.) hazır olmalıdır.

Yukarıdaki maddeler karşılanırken, üretim, sevkiyat ve depolama maliyetleri minimize edilmelidir. Bu temel alanlardaki iyileştirmeleri sağlayabilecek bir ağ tasarımı yapabilmek amacıyla, kısıtlar, değişkenler ve parametrelerin yer alacağı

bir matematiksel modelleme gerçekleştirilmelidir. Tedarik zincirinde yer alan operasyonlar Şekil 4.1’de gösterilmektedir.



Şekil 4.1 Tedarik zincirindeki operasyonlar

Tedarik zinciri göz önünde bulundurulduğunda, talep tahminleri, ortak veritabanı kullanımı, taşıma modu, kapasite, araç rotalama, tesis yeri belirleme, atama, envanter yönetimi ve yeni gelişen teknolojilerin getirebileceği fırsatlar tek başlarına veya birlikte problem olarak ele alınabilir, modelleme yapılabilir ve çözüm yöntemleri geliştirilebilir. Literatürde yer alan çalışmalar göz önünde bulundurulduğunda, otomotiv yedek parça tedarik zincirinde değer yaratabilecek çalışma alanları, hızlı üretim teknolojileri ve bunların kullanımının hedeflenmesiyle beraber ortaya çıkabilecek üretim teknolojilerinin tedarik zincirine entegrasyonu, atama-depolama-sevkiyat kararları olarak tespit edilmiştir.

4.1 Modelleme Güçlükleri

Özelleştirilmiş bir model oluşturmak, beraberinde bulundurduğu detay sayısının artmasına sebep olur. Bu da problemin çözümünü zor ve maliyetli hâle getirir. Öte yandan, benzer problemlerin çözümünde kullanılmasının ve yaygınlaştırılmasının da önüne geçilmektedir. Model, gerçek hayat problemlerinin çözümünde kullanılabilir olmalı ve büyük ölçüde doğru sonuçlar vermelidir.

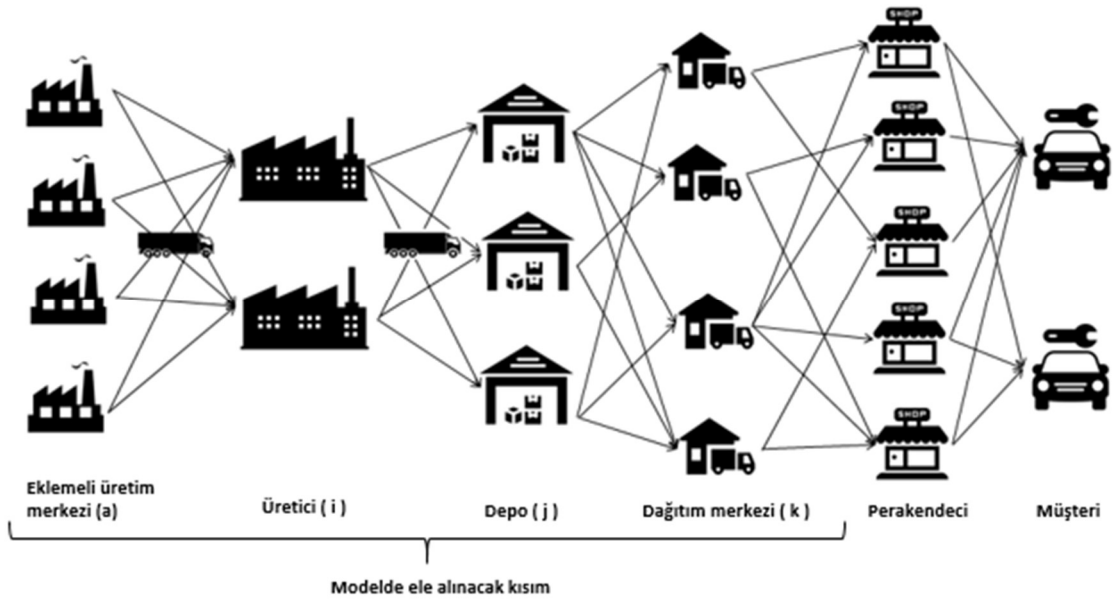
Sektördeki belirsizlikler model oluşturmayı zorlaştırmaktadır. Otomotiv sektörü oldukça dinamik yapıdadır ve gün geçtikçe araç çeşitliliği artmaktadır. Farklı özelliklere ve çeşitlere sahip otomobillerle beraber yeni üretim teknolojilerinin de gün geçtikçe gelişmesi farklı fırsatlar yaratmakla beraber, tedarik zincirini daha da

karmaşık hâle getirmektedir. Modelin, bu dinamik yapıya uygun, esnek tasarıma sahip olması gerekmektedir.

Verilerin sağlanmasıdaki zorluklar modelin çalışabilirliğini etkilemektedir. Satılabilecek parçaların hangi teknolojilerle ve nasıl üretilebileceği tespit edilmelidir. Maliyetler, tercihlere göre büyük ölçüde değişebilmektedir. Büyük veri seti, doğrusallığı bozan, birbirlerini etkileyen karar değişkenleri karmaşık ağ yapısı problemin çözüm süresini direkt etkilemektedir. Birden fazla dönem için işlemlerin hesaplanması da modelin çözümünü zorlaştırmaktadır. Sağlanan veriler ne kadar gerçeğe yakın olursa, modelin çıktıları da o ölçüde aydınlatıcı olmaktadır.

4.2 Modelin Yapısı

Şekil 4.2’de gösterildiği gibi, modelin yapısını oluşturan ve modelde çalışılan tedarik zinciri elemanları, tedarikçi (eklemeli üretim merkezi), üretici, depo ve dağıtım merkezleridir.



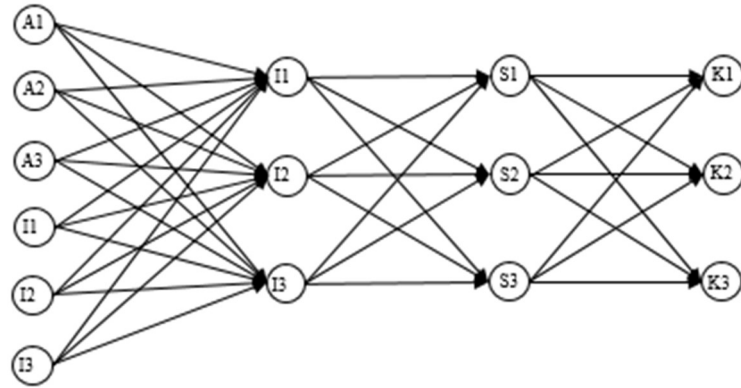
Şekil 4.2 Üzerinde çalışılacak yedek parça dağıtım ağı

Tedarik zinciri modelinin büyüklüğünü belirleyen öğelere aşağıda değinilmiştir:

- Çoklu aşama: Modelde A sayıda eklemeli üretim merkezi, I sayıda üretim merkezi, S sayıda depolama merkezi ve K sayıda dağıtım merkezlerinin yer aldığı 4 aşama bulunmaktadır.
- Çoklu ürün: Modelde farklı aşamalarda üretilebilen ve stoklanabilen Y sayıda yarı-mamul ve bu yarı-mamullerden meydana gelen J sayıda bitmiş ürün yer almaktadır.
- Çoklu dönem: Modelde yer alan, sipariş miktarı, envanter miktarı, üretim adedi, yatırım kararları T sayıda dönemde göz önünde bulundurulmaktadır ve her dönem birbirini etkilemektedir.

4.2.1 Model Varsayımları

Tedarik zinciri modelinin ağ yapısı Şekil 4.3'te gösterilmektedir.



Şekil 4.3 Tedarik zincirinin yapısı

Tedarik zinciri modeline ait genel kabuller aşağıdadır:

- Modelde 4 temel aşama vardır: Yarımamul üretimi-taşınması, bitmiş ürün üretimi-taşınması, depolama-sevkiyat, dağıtım-talep oluşumu
- Model en sondan; dağıtım merkezinden ve t . periyottaki taleple tetiklenir.
- Her aşamada birden fazla eklemeli üretim merkezi, üretim merkezi, depolama merkezi ve dağıtım merkezi bulunabilir.
- Eklemeli üretim merkezinde sadece yarımamul, üretim merkezinde yarımamul ve bitmiş ürün üretilebilir.
- Depoda yarımamul ve bitmiş ürün bulundurulabilir. Gerektiğinde yarımamuller üretim merkezine geri gönderilebilir.

- Farklı tipteki yarı-mamul ve mamuller birlikte herhangi bir taşıma modunda taşınabilir.
- Dağıtım merkezlerinin her periyot için ihtiyaçları belirlidir.
- Yarı-mamul ihtiyacı bitmiş ürün reçetesi (BOM) ile hesaplanır.
- Eklemeli üretim merkezi, üretim merkezi ve depolama merkezlerinin kapasiteleri sınırlıdır.

4.2.2 Üretim Operasyonu İlgili Özellikler

Eklemeli üretim merkezi ve üretim merkezindeki operasyonlara ait karar değişkenlerine etki eden ürün ve tesis özellikleri aşağıdadır:

Tesis yatırımı: Tesisin açılması veya tesiste ilgili ürünlerin üretilmesi için katlanılacak maliyettir. Tesis açık veya kapalıdır.

Üretim miktarı: İlgili tesiste t . periyotta, üretilmesi planlanan yarımamul y ve mamul j miktarlarıdır.

BOM: Her bitmiş ürün için gerekli olan yarımamul miktarının belirtildiği matristir.

Üretim süresi: Bitmiş ürün ve yarımamul üretimi için gereken zamandır.

Ürün hacmi: Bitmiş ürün ve yarımamulun üretim tesisinde kapladığı yerdir.

Kapasite: Üretimde kullanılan makinenin t . periyottaki zaman cinsinden kullanılabilir potansiyelidir.

Envanter: Üretim tesislerinde t . periyotta işlem gören yarımamul, bitmiş ürün miktarıdır.

4.2.3 Taşıma Operasyonu İlgili Özellikler

Eklemeli üretim merkezi, üretim merkezi, depolama merkezi ve dağıtım merkezleri arasında gerçekleşen taşıma operasyonlarındaki karar değişkenlerine etki eden ürün özellikleri aşağıdadır:

Mesafe: İki tesis arasındaki uzaklıktır.

Ürün hacmi: Bitmiş ürün ve yarımamulun taşıtta kapladığı yerdir.

Taşıma süresi: İki tesis arasındaki taşıma işlemi için gereken zamandır.

Taşıma miktarı: t . periyotta, iki tesis arasında taşınan yarımamul y ve mamul j miktarlarıdır.

4.2.4 Depolama Operasyonu ile İlgili Özellikler

Tesis yatırımı: Tesisin açılması veya tesiste ilgili ürünlerin üretilebilmesi için katlanılacak maliyettir. Tesis açık veya kapalıdır.

Depolama operasyonlarındaki karar değişkenlerine etki eden ürün özellikleri aşağıdadır:

Ürün hacmi: Bitmiş ürün ve yarımamulun depoda kapladığı yerdir.

Kapasite: Depolama merkezinin t . periyotta hacim cinsinden kullanılabilir potansiyelidir.

Envanter: Depolama merkezinde t . periyotta tutulan yarımamul, bitmiş ürün miktarıdır.

4.2.5 Modeldeki Maliyet Kalemleri

Yatırım maliyeti: Bir eklemeli üretim merkezi, üretim merkezi veya depolama merkezini operasyonlarda kullanabilmek için katlanması gereken maliyetler toplamıdır.

Üretim maliyeti: Bir eklemeli üretim merkezi veya üretim merkezindeki işçilik, malzeme ve enerji maliyetlerinin toplamıdır. Eklemeli üretim merkezi ve üretim merkezi için malzeme ve enerji maliyetleri, işçilik maliyetine olan oranları kullanılarak eklenebilir veya ayrıca hesaplanabilir.

Taşıma maliyeti: Bir bitmiş ürün veya yarımamulün taşınması için gerekli olan para birimidir.

Envanter (stok tutma) maliyeti: Eklemeli üretim merkezi, üretim merkezi veya depolama merkezinde tutulan yarımamul veya bitmiş ürünün ilgili periyot için elde bulundurma maliyetidir. Sektör ortalaması alınarak sabit çarpanla hesaplanabileceği gibi, kiralama bedeli, sigorta bedeli, elleçleme giderleri, hurda maliyetleri gibi detay maliyet kalemleri periyot bazlı hesaplanabilir.

Toplam maliyet: Yatırım maliyeti, üretim maliyeti, taşıma maliyeti ve stok tutma maliyetlerinin T periyottaki toplamıdır.

4.3 Model Formülasyonu

Model yapısının oluşturulması, tedarik zinciri varsayımlarının yapılması ve modelde yer alacak özelliklerinin oluşturulmasıyla beraber modelin indisleri, parametreleri, karar değişkenleri, amaç fonksiyonu ve kısıtları açıklanacaktır.

4.3.1 Modelde Kullanılan İndisler, Parametreler, Karar Değişkenleri

İndis seti:

a	Eklemeli üretim merkezleri (3D yazıcılar)
i	Üretim merkezleri
j	Bitmiş ürünler
y	Yarı mamuller
t	Periyot
s	Depolama merkezleri
k	Dağıtım merkezleri

Parametreler:

$INV1_{jit}$	t periyodunda i üretim merkezinde tutulan j bitmiş ürün miktarı
$INV2_{yit}$	t periyodunda i üretim merkezinde tutulan y yarımamul miktarı
$INV3_{yat}$	t periyodunda a eklemeli üretim merkezinde tutulan y yarımamul miktarı
$INV4_{jst}$	t periyodunda s depolama merkezinde tutulan j bitmiş ürün miktarı
$INV5_{yst}$	t periyodunda s depolama merkezinde tutulan y yarı mamul miktarı
$CP1_i$	i üretim merkezindeki birim işçilik maliyeti
$CP2_a$	a eklemeli üretim merkezindeki birim işçilik maliyeti

$CM1_y$	Üretim merkezinde y yarımamulü birim malzeme maliyeti
$CM2_y$	Eklemeli üretim merkezinde y yarımamulü birim malzeme maliyeti
$CE1_i$	i üretim merkezindeki birim enerji maliyeti
$CE2_a$	a eklemeli üretim merkezindeki birim enerji maliyeti
$CTRF_j$	j bitmiş ürünü birim taşıma maliyeti
$CTRS_y$	y yarımamulü birim taşıma maliyeti
$CFXM_i$	i üretim merkezi için yatırım maliyeti
$CFXP_a$	a eklemeli üretim merkezi için yatırım maliyeti
$CFXW_s$	s depolama merkezi için yatırım maliyeti
$CAPM_{it}$	t periyodunda i üretim merkezinin kapasitesi
$CAPA_{at}$	t periyodunda a eklemeli üretim merkezinin kapasitesi
$CAPW_{st}$	t periyodunda s depolama merkezinin kapasitesi
DEM_{jkt}	j bitmiş ürününün k dağıtım merkezi için t . periyottaki talebi
$TIMF_{ji}$	j bitmiş ürünün i üretim merkezindeki üretim süresi
$TIM1_{yi}$	y yarı mamulünün i üretim merkezindeki üretim süresi
$TIM2_{ya}$	y yarı mamulünün a eklemeli üretim merkezindeki üretim süresi
$SPAF_j$	j bitmiş ürünün kapladığı yer
$SPAS_y$	y yarımamulünün kapladığı yer
$CIH1_i$	i üretim merkezinde stok tutma maliyeti
$CIH2_a$	a eklemeli üretim merkezinde stok tutma maliyeti
$CIH3_s$	s depolama merkezinde stok tutma maliyeti
$DIS1_{is}$	i üretim merkezi ve s depolama merkezi arasındaki mesafe
$DIS2_{ai}$	a eklemeli üretim merkezi ve i üretim merkezi arasındaki mesafe
$DIS3_{sk}$	s depolama merkezi ve k dağıtım merkezi arasındaki mesafe

$LT1_{is}$	i üretim merkezi ve s depolama merkezi arasındaki taşıma süresi
$LT2_{ai}$	a eklemeli üretim tesisi ve i üretim merkezi arasındaki taşıma süresi
$LT3_{sk}$	s depolama merkezi ve k dağıtım merkezi arasındaki taşıma süresi
BOM_{jy}	j bitmiş ürününü üretebilmek için gerekli olan y yarımamul sayısı

Karar değişkenleri:

XPF_{ijt}	j bitmiş ürününün t . periyotta i üretim merkezindeki üretim miktarı
$XPS1_{iyt}$	y yarımamulünün t . periyotta i üretim merkezindeki üretim miktarı
$XPS2_{ayt}$	y yarımamulünün t . periyotta a eklemeli üretim merkezindeki üretim miktarı
$XLOG1_{jst}$	s depolama merkezinden k dağıtım merkezine t . periyotta nakliye edilen j bitmiş ürün miktarı
$XLOG2_{yait}$	a eklemeli üretim merkezinden i üretim merkezine t . periyotta nakliye edilen y yarımamul miktarı
$XLOG3_{yist}$	i üretim merkezinden s depolama merkezine t . periyotta nakliye edilen y yarımamul miktarı
$XLOG4_{jist}$	i üretim merkezinden s depolama merkezine t . periyotta nakliye edilen j bitmiş ürün miktarı
$XLOG5_{ysit}$	s depolama merkezinden i üretim merkezine t . periyotta nakliye edilen y yarımamul miktarı
OPM_i	Üretim merkezi i açıksa= 1, değilse=0
OPA_a	Eklemeli üretim merkezi a açıksa= 1, değilse=0
OPW_s	Depolama merkezi s açıksa= 1, değilse=0

4.3.2 Amaç Fonksiyonu

Modelde, üretim maliyeti, taşıma maliyeti, stok tutma maliyeti ve yatırım maliyetinin toplamının minimizasyonu içeren tek amaç fonksiyonu bulunmaktadır.

$$\sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \sum_{t=1}^T CP1_i TIMF_{ji} XPF_{ijt} + \sum_{i=1}^I \sum_{y=1}^Y \sum_{t=1}^T CP1_i TIM1_{yi} XPS1_{iyt} +$$

$$\sum_{a=1}^A \sum_{y=1}^Y \sum_{t=1}^T CP2_a TIM2_{ya} XPS2_{ayt}$$
(4.1)

Eklemeli üretim merkezinde ve üretim merkezinde üretimi yapılan parçaların, üretim adetlerinin birim üretim süreleriyle çarpılmasıyla toplam üretim süresi elde edilir ve toplam üretim süresi, birim işçilik maliyetiyle çarpılarak toplam işçilik maliyeti bulunur (4.1).

$$\sum_{i=1}^I \sum_{y=1}^Y \sum_{t=1}^T CM1_y XPS1_{iyt} + \sum_{a=1}^A \sum_{y=1}^Y \sum_{t=1}^T CM2_y XPS2_{ayt}$$
(4.2)

Birim malzeme maliyetleri ile üretim adetlerinin çarpımlarının toplamı, toplam malzeme maliyetini oluşturmaktadır (4.2).

$$\sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \sum_{t=1}^T CE1_i TIMF_{ji} XPF_{ijt} + \sum_{i=1}^I \sum_{y=1}^Y \sum_{t=1}^T CE1_i TIM1_{yi} XPS1_{iyt} +$$

$$\sum_{a=1}^A \sum_{y=1}^Y \sum_{t=1}^T CE2_a TIM2_{ya} XPS2_{ayt}$$
(4.3)

Tesislerdeki birim enerji maliyetleri ile üretim adetlerinin çarpımlarının toplamı, toplam enerji maliyetini oluşturmaktadır (4.3).

$$\sum_{j=1}^J CTRF_j \left(\sum_{i=1}^I \sum_{s=1}^S \sum_{t=1}^T DIS1_{is} XLOG4_{jist} + \sum_{s=1}^S \sum_{k=1}^K \sum_{t=1}^T DIS3_{sk} XLOG1_{jskt} \right) +$$

$$\sum_{y=1}^Y CTRS_y \left(\sum_{i=1}^I \sum_{s=1}^S \sum_{t=1}^T DIS1_{is} (XLOG3_{yist} + XLOG5_{ysit}) + \sum_{a=1}^A \sum_{i=1}^I \sum_{t=1}^T DIS2_{ai} XLOG2_{yait} \right)$$
(4.4)

Ürünlerin hacimleriyle, taşıma mesafelerinin ve taşınan miktarlarının çarpımlarının toplamıyla toplam nakliye maliyeti bulunur (4.4).

$$\begin{aligned}
& \sum_{i=1}^I CIH1_i \left(\sum_{j=1}^J \sum_{t=1}^T INV1_{jit} SPAF_j + \sum_{y=1}^Y \sum_{t=1}^T INV2_{yit} SPAS_y \right) + \sum_{a=1}^A \sum_{y=1}^Y \sum_{t=1}^T CIH2_a INV3_{yat} SPAS_y + \\
& \sum_{s=1}^S CIH3_s \left(\sum_{j=1}^J \sum_{t=1}^T INV4_{jst} SPAF_j + \sum_{y=1}^Y \sum_{t=1}^T INV5_{yst} SPAS_y \right) \quad (4.5)
\end{aligned}$$

Ürünlerin ilgili periyottaki miktarı, kapladıkları alanlar ve ilgili tesisteki birim elde bulundurma maliyetleri çarpımları toplanarak, toplam stok tutma maliyeti hesaplanır (4.5).

$$\sum_{i=1}^I CFXM_i OPM_i + \sum_{a=1}^A CFXP_a OPM_a + \sum_{s=1}^S CFXW_s OPW_s \quad (4.6)$$

Üretim merkezi, eklemeli üretim merkezi ve depolama merkezlerinde operasyonları yürütmek için yapılan yatırımların toplamı, tüm periyotlar için geçerli olan toplam yatırım maliyetini oluşturur (4.6).

Buna göre, amaç fonksiyonu tüm maliyetlerin toplamının minimizasyonunu sağlayacak şekilde, aşağıdaki gibi oluşturulmalıdır (4.7):

$$\begin{aligned}
min_z = & \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \sum_{t=1}^T CP1_i TIMF_{ji} XPF_{ijt} + \sum_{i=1}^I \sum_{y=1}^Y \sum_{t=1}^T CP1_i TIM1_{yi} XPS1_{iyt} + \\
& \sum_{a=1}^A \sum_{y=1}^Y \sum_{t=1}^T CP2_a TIM2_{ya} XPS2_{ayt} + \sum_{i=1}^I \sum_{y=1}^Y \sum_{t=1}^T CM1_y XPS1_{iyt} + \\
& \sum_{a=1}^A \sum_{y=1}^Y \sum_{t=1}^T CM2_y XPS2_{ayt} + \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \sum_{t=1}^T CE1_i TIMF_{ji} XPF_{ijt} + \\
& \sum_{i=1}^I \sum_{y=1}^Y \sum_{t=1}^T CE1_i TIM1_{yi} XPS1_{iyt} + \sum_{a=1}^A \sum_{y=1}^Y \sum_{t=1}^T CE2_a TIM2_{ya} XPS2_{ayt} + \\
& \sum_{j=1}^J CTRF_j \left(\sum_{i=1}^I \sum_{s=1}^S \sum_{t=1}^T DIS1_{is} XLOG4_{jist} \right) +
\end{aligned} \quad (4.7)$$

$$\begin{aligned}
& \sum_{j=1}^J CTRF_j \sum_{s=1}^S \sum_{k=1}^K \sum_{t=1}^T DIS3_{sk} XLOG1_{jskt} + \sum_{y=1}^Y CTRS_y \left(\sum_{i=1}^I \sum_{s=1}^S \sum_{t=1}^T DIS1_{is} (XLOG3_{yist} + XLOG5_{ysit}) \right) + \\
& \sum_{y=1}^Y CTRS_y \left(\sum_{a=1}^A \sum_{i=1}^I \sum_{t=1}^T DIS2_{ai} XLOG2_{yait} \right) + \sum_{i=1}^I CIH1_i \left(\sum_{j=1}^J \sum_{t=1}^T INV1_{jit} SPAF_j + \sum_{y=1}^Y \sum_{t=1}^T INV2_{yit} SPAS_y \right) + \\
& \sum_{a=1}^A \sum_{y=1}^Y \sum_{t=1}^T CIH2_a INV3_{yat} SPAS_y + \sum_{s=1}^S CIH3_s \left(\sum_{j=1}^J \sum_{t=1}^T INV4_{jst} SPAF_j + \sum_{y=1}^Y \sum_{t=1}^T INV5_{yst} SPAS_y \right) + \\
& \sum_{i=1}^I CFXM_i OPM_i + \sum_{a=1}^A CFXP_a OPM_a + \sum_{s=1}^S CFXW_s OPW_s
\end{aligned}$$

4.3.3 Modelin Kısıt Seti

Modelde, amaç fonksiyonuyla beraber bazı önemli kısıtlar da yer almaktadır, kısıtlar aşağıdaki denklemlerle tanımlanmaktadır.

Üretim merkezindeki bitmiş ürünlerin envanter eşitliği (4.8):

$$INV1_{jit} = INV1_{jit-1} + XPF_{ijt} - \sum_{s=1}^S XLOG4_{jist} \quad \forall j, i, t \quad (4.8)$$

Üretim merkezindeki yarımamul envanter eşitliği (4.9):

$$\begin{aligned}
INV2_{yit} &= INV2_{yit-1} + XPS1_{iyt} - \sum_{s=1}^S XLOG3_{yist} - \sum_{j=1}^J XPF_{ijt} BOM_{jy} + \\
& \sum_{s=1}^S XLOG5_{ysit-LT1_{is}} + \sum_{i=1}^I XLOG2_{yait-LT2_{ai}} \quad \forall y, i, t
\end{aligned} \quad (4.9)$$

Eklemeli üretim merkezindeki yarımamul envanter eşitliği (4.10):

$$INV3_{yat} = INV3_{yat-1} + XPS2_{ayt} - \sum_{i=1}^I XLOG2_{yait} \quad \forall y, a, t \quad (4.10)$$

Depolama merkezindeki bitmiş ürün envanter eşitliği (4.11):

$$INV4_{jst} = INV4_{jst-1} + \sum_{i=1}^I XLOG4_{jist-LT1_{is}} - \sum_{k=1}^K XLOG1_{jskt} \quad \forall j, s, t \quad (4.11)$$

Depolama merkezindeki yarımamul envanter eşitliği (4.12):

$$INV5_{yst} = INV5_{yst-1} + \sum_{i=1}^I XLOG3_{yist-LT1is} - \sum_{i=1}^I XLOG5_{ysit} \quad \forall y, s, t \quad (4.12)$$

Talebin karşılanması kısıtı (4.13):

$$DEM_{jkt} \leq \sum_{s=1}^S XLOG1_{jskt-LT3sk} \quad \forall j, k, t \quad (4.13)$$

Eklemeli üretim merkezi, üretim kapasitesi kısıtı (4.14):

$$CAPA_{at} OPA_a \geq \left(\sum_{y=1}^Y XPS2_{ayt} TIM2_{ya} \right) \quad \forall a, t \quad (4.14)$$

Üretim merkezi, üretim kapasitesi kısıtı (4.15):

$$CAPM_{it} OPM_i \geq \left(\sum_{j=1}^J TIMF_{ji} XPF_{ijt} + \sum_{y=1}^Y TIM1_{yi} XPS1_{iyt} \right) \quad \forall i, t \quad (4.15)$$

Depo alan kısıtı (4.16):

$$CAPW_{st} OPW_s \geq \left(\sum_{j=1}^J INV4_{jst} SPAF_j + \sum_{y=1}^Y INV5_{yst} SPAS_y \right) \quad \forall s, t \quad (4.16)$$

Yatırım yapma-yapmama kısıtı (4.17):

$$OPM_i, OPA_a, OPW_s \in \{0,1\} \quad (4.17)$$

Tamsayı kısıtı (4.18):

$$XPF_{ijt}, XPS1_{iyt}, XPS2_{ayt}, XLOG1_{jskt}, XLOG2_{yait}, XLOG3_{yist}, \\ XLOG4_{jist}, XLOG5_{ysit} \quad tamsayı \quad \forall a, i, y, j, k, s, t \quad (4.18)$$

Literatür araştırması sırasında tedarik zinciri üzerine gerçekleştirilen çalışmalar incelendiğinde birçok farklı çözüm yaklaşımının tek başına veya birlikte kullanıldığı görülmüştür. Çözüm yaklaşımları içerisinde deterministik ve sezgisel teknikler büyük çoğunluğu oluşturmaktadır. Deterministik çözüm yaklaşımları içerisinde, tamsayılı/karma tamsayılı programlama teknikleri sıkça kullanılmaktadır. Sezgisel teknikler içerisinde, meta-heuristic çözüm yaklaşımlarına sıkça rastlanılmaktadır. Bunlar içerisinde en çok kullanılan algoritmalar genetik algoritma, benzetilmiş tavlama algoritması, parçacık sürü algoritması ve birden fazla sezgisel yaklaşımın kullanıldığı hibrit algoritmalarlardır. Bu bölüm içerisinde otomotiv yedek parça tedarik zincirinde kullanılabilecek bu çözüm yaklaşımlarına yer verilecektir.

5.1 Karma Tamsayılı Programlama

Maksimizasyon veya minimizasyon ayırt etmeksizin, ölçülebilir herhangi bir amaç fonksiyonu bulunan, değişkenleri kesikli olan veya kesirli olmayan değerlerden oluşan matematiksel modellerin yer aldığı programlama teknikleri tamsayılı programlama olarak tanımlanabilir. Bu matematiksel modeller içerisinde, değişkenlerin bazılarının tamsayılı olması durumunda sınıflandırılması karma tamsayılı programlama şeklinde yapılabilir. Tamsayı kısıtı altındaki bu modeller, değişkenlerin kesikli olması sebebiyle, bu kısıtın gevşetilmediği durumlarda doğal olarak non-lineer düşünülebilir ancak aksi belirtilmediği sürece lineer olarak sınıflandırılmaktadır. Jenerik modelin matematiksel gösterimi aşağıdadır [205]:

Maksimizasyon veya Minimizasyon

$$z = g_0(x_1, x_2, \dots, x_n) \quad 5.1$$

$$g_i(x_1, x_2, \dots, x_n) \begin{cases} \leq \\ = \\ \geq \end{cases} b_i, \quad i \in M \equiv \{1, 2, \dots, m\} \quad 5.2$$

$$x_j \geq 0, \quad x_j \text{ tamsayı} \quad j \in I \subseteq N \equiv \{1, 2, \dots, n\} \quad 5.3$$

Amaç fonksiyonu (5.1)'de, model kısıtı (5.2)'de, pozitiflik ve tamsayı olma koşulu da (5.3)'de gösterilmektedir. Modeldeki tüm değişkenler tamsayı olması gerektiğinden bu tamsayılı programlama örneği olarak değerlendirilir. Karma tamsayılı programlama modelinin örnek matematiksel gösterimi:

Maksimizasyon veya Minimizasyon

$$z = g_0(x_1, x_2, \dots, x_n) + f_0(y_1, y_2, \dots, y_n) \quad 5.4$$

$$g_i(x_1, x_2, \dots, x_n) \begin{cases} \leq \\ = \\ \geq \end{cases} b_i, \quad i \in M \equiv \{1, 2, \dots, m\} \quad 5.5$$

$$f_i(x_1, x_2, \dots, x_n) \begin{cases} \leq \\ = \\ \geq \end{cases} c_i, \quad i \in M \equiv \{1, 2, \dots, m\} \quad 5.6$$

$$x_j, y_j, \geq 0, \quad j \in N \equiv \{1, 2, \dots, n\} \quad 5.7$$

$$x_j \text{ tamsayı} \quad j \in I \subseteq N \equiv \{1, 2, \dots, n\} \quad 5.8$$

Amaç fonksiyonu (5.4)'de, model kısıtı (5.5) ve (5.6)'da, pozitiflik kısıtı (5.7)'de ve tamsayı olma koşulu da (5.8)'de gösterilmektedir. Burada değişkenlerden biri tamsayı kısıtı altındayken diğerinin herhangi bir pozitif doğal sayı almasına izin verilmektedir.

Bu problemlerin için 1960'lı yılların başında Land, A. ve Doig, A. tarafından geliştirilen dal-sınır algoritması ve Gomory R. tarafından geliştirilen kesme düzlemi çözüm yaklaşımları geliştirilmiştir.

5.2 Meta-Sezgisel Yöntemler

Meta-Sezgiseller bir diğer deyişle Meta-Heuristikler klasik matematiksel çözüm yöntemleriyle çözümü zor veya imkânsız olan problemler için doğadan ilham alınarak geliştirilen algoritmaların kullanıldığı çözüm yaklaşımlarıdır. Literatürde Meta-Heuristic şeklinde yer alır. *Meta* ileri, gelişmiş, *heuristic* sezgisel anlamlarına gelmektedir. 1950'li yıllarla beraber model araştırmaları başlamış, 1965'de değerlendirme stratejileri ve rastgele arama metodları geliştirilmiş ve 1975 yılında ilk olarak Genetik Algoritma, sonrasında, Tavlama Benzetimi, Tabu Arama, Karınca

Kolonisi Optimizasyon Algoritması, Parçacık Sürü Optimizasyonu, Harmoni Arama Algoritması, Arı Kolonisi Algoritması geliştirilmiş ve benzerleri hâlâ geliştirilmeye devam etmektedir.

5.2.1 Genetik Algoritma

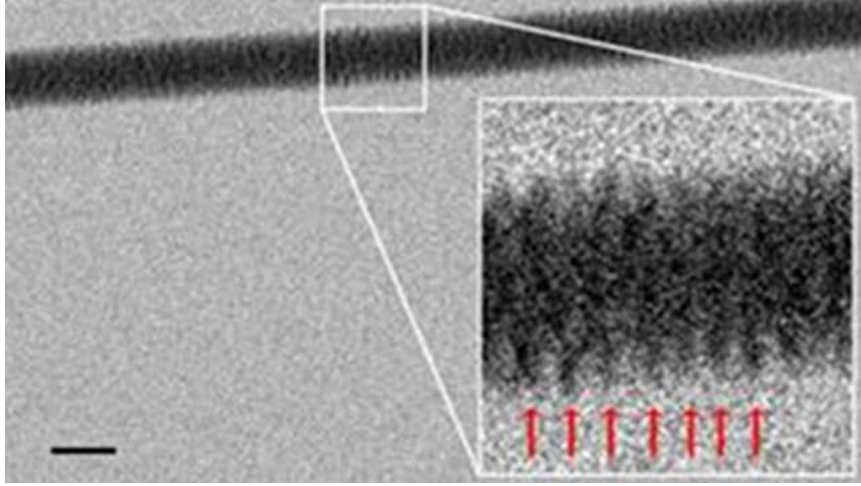
Genetik algoritma Michigan Üniversitesi'nden John Holland ve ekibi tarafından 1970'li yıllarda geliştirilmiştir. İngiliz biyolog ve doğa bilimcisi Charles Darwin'in evrim teorisinden esinlenilmiştir. Genetik algoritmalar çok geniş alanlarda uygulanabilen programlama modelleridir. Bu modellerde, problemler kromozom yapılarıyla temsil edilir, genelde başlangıçta rastgele oluşturulan bu kromozomların yapıları fonksiyonlar aracılığıyla çözülerek değerler elde edilir. Amaç fonksiyonuna göre değerlendirilen bu kromozomlar içerisinde önceden belirlenen kurallara göre seçimler (doğal seçim) yapılır, seçilen kromozomlar çaprazlanır (cross-over) ve mutasyona uğratılır. Yeni popülasyon oluşturulur ve süreç tasarlanan parametrelerle tekrar eder. Genel olarak genetik algoritmaların 5 temel bileşeni bulunmaktadır [206][207]:

- 1-Problem çözümünün genetik temsili.
- 2-Çözüm için başlangıç popülasyonu oluşturma yöntemi.
- 3-Çözümleri uygunlukları açısından sıralayan değerlendirme fonksiyonu.
- 4-Üreme sırasında çocuğun genetik yapısını değiştiren genetik operatörler.
- 5-Genetik algoritma parametrelerinin değerleri.

5.2.1.1 Genetik Bilimine Ait Kavramlar

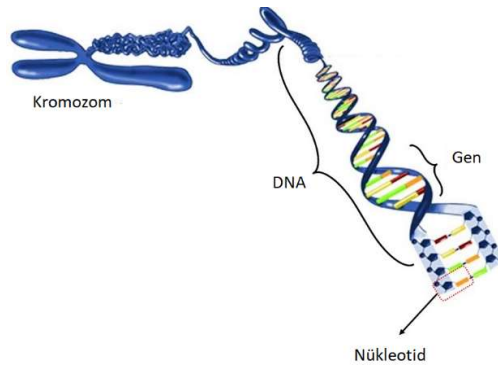
Genetik algoritmaların detaylı işleyişini kavrayabilmek için öncelikle genetik bilimine dair bazı temel kavramların açıklanması gerekmektedir. Canlıların hayatlarında genlerin büyük rol oynadığı bilinmektedir. Fiziksel görünüm, davranışlar, kişilikler, sağlık ve ömür gibi özellikler genlerin etkisi altındadır. Tarım ve sağlık sektörlerindeki birçok iyileştirme genetik biliminin anlaşılmasıyla ve genetik mühendisliğiyle mümkün hâle getirilmiştir. Genlerin, kontrol edilebileceği, değiştirilebileceği ve aktif/pasif hâle getirilebileceği artık bilinmektedir [208]. Bir canlının bütün genetik bilgisine Genom denilmektedir. Genom, kromozom

gruplarından oluşmaktadır. Genler ise, Deoxyribonucleic Acid (DNA) denilen, kromozom içerisinde sarmal bir şekilde bulunan, proteinleri ve biyolojik yapıların sentezinde kullanılan bu yapının belirli bölümlerini temsil ederler. Genler, DNA içerisinde, tek bir karakteri veya fenotipi (saç rengi vb.) belirlerler. Her bir genin farklı alternatiflerine ise alel denmektedir, fenotipinin belirlenmesinde rol oynarlar.



Şekil 5.1 DNA şeritleri [209]

2012 yılında görüntülenen DNA sarmalına dair görsel Şekil 5.1’de gösterilmektedir. DNA sarmalını oluşturan şerit bir nükleotid dizisidir, nükleotidlerde bir şeker grubu, bir fosfat grubu ve 2 şerit üzerinde karşılıklı eşleşen, canlı genetiğini oluşturan 4 temel baz bulunmaktadır. Adenin (A), Timin (T), Sitozin (C), Guanin (G) şeklinde isimlendirilmiş bu bazlar, Adenin karşısında Timin, Sitozin karşısında Guanin gelecek şekilde hidrojen bağlarıyla birbirlerine bağlanırlar (Şekil 5.2).

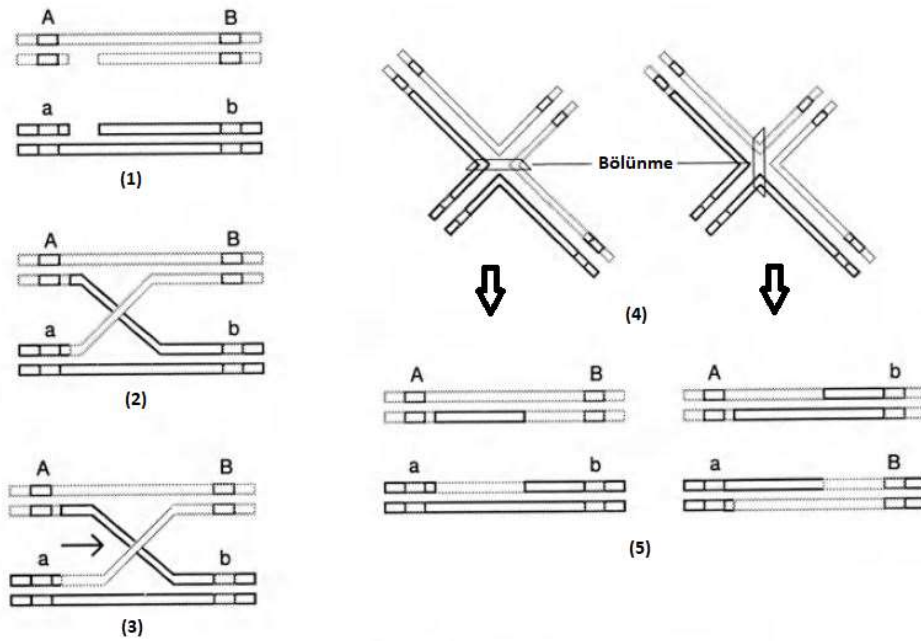


Şekil 5.2 Kromozomun yapısı

DNA şeridinde bulunan bu bazlar harflerle kod şeklinde tanımlanır, 3 harfli nükleotid dizisine ise kodon denilmektedir. Canlıların yapıtaşı olan proteinlerin

sentezinde kullanılan farklı tipteki amino-asitlerin oluşturulmasında bu kodonlar kullanılmış olur. Genetik bilginin değiş tokuşu kromozomal çaprazlama (cross-over) ile gerçekleşir. İki kromozom birbirine Holliday bağlantısıyla (Şekil 5.3) bağlanır [208] [210]:

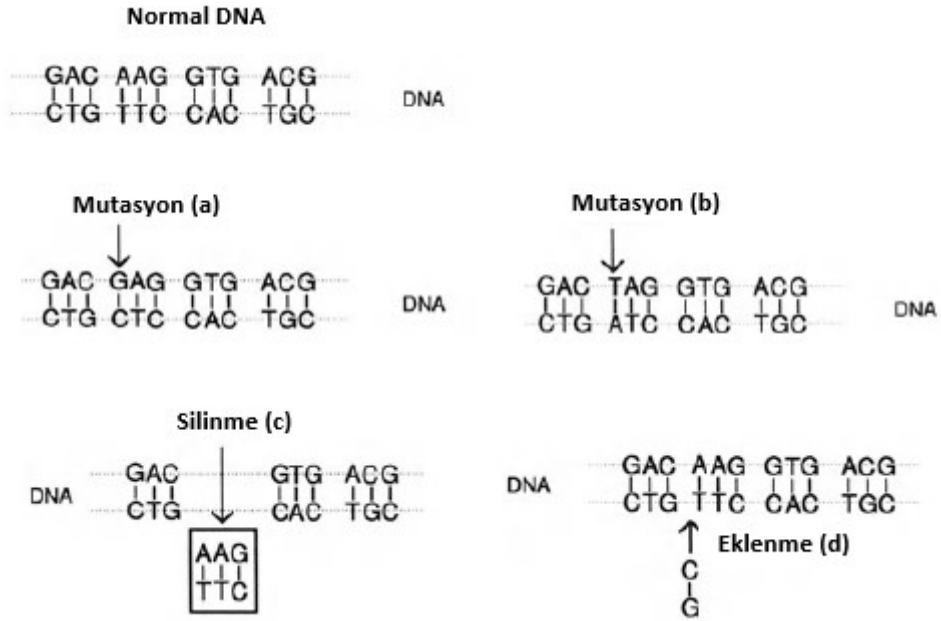
- 1-DNA bağı bir noktada kopar ve eş DNA ile hizalanır.
- 2-Karşılıklı duran DNA iplikleri Holliday ara formunu oluştururlar.
- 3-Kopan nokta tamir edilir ve çaprazlama noktası hareket eder.
- 4-Oluşan Holliday bağlantısı yatay veya dikey şekilde çözülebilir.
- 5-Dikey veya yatay bölünmeye göre yeni DNA'lar oluşur.



Şekil 5.3 Kromozomal Çaprazlama [208]

Böylelikle, kromozomal çaprazlama (alellerin yer değiştirmesi) ve dikey/yatay bölünme ile doğada eşeyli üreme ile üreyen canlıların genetik çeşitliliği artmaktadır. DNA göreceli olarak güçlü bir polimerdir ve nükleotidler genetik bilginin değiştirilmesine karşı düşük toleransa sahiptir. Bazlardan amino gruplarının ayrılması, şeker grubunun hidrolizi, radyasyon ve oksidatif hasarlar çok yavaş ve kendiliğinden gerçekleşebilmektedir. DNA dizilimindeki herhangi bir değişiklik, fenotipte veya moleküler biyoloji açısından meydana gelebilecek herhangi bir kalıtsal değişiklik mutasyon olarak adlandırılır. Mutasyonların büyük çoğunluğu

hücreler için zararlı olurken, bir kısmı canlılara çevreye uyum konusunda avantaj sağlayabilir. Böylelikle doğal seçim ve evrim sürecinde gerekli olan çeşitlilik farklı bir şekilde sağlanmış olur. Mutasyonlarda, belirli sıradaki bazlar iki taraflı değişebilir (a), bazlar karşılıklı yer değiştirebilir (b), DNA sarmalında herhangi bir baz çifti silinebilir (c) veya DNA sarmalında olmayan yeni bir baz çifti eklenebilir (d) (Şekil 5.4) [208].



Şekil 5.4 Mutasyon[208]

5.2.1.2 Problemin Genetik Temsili

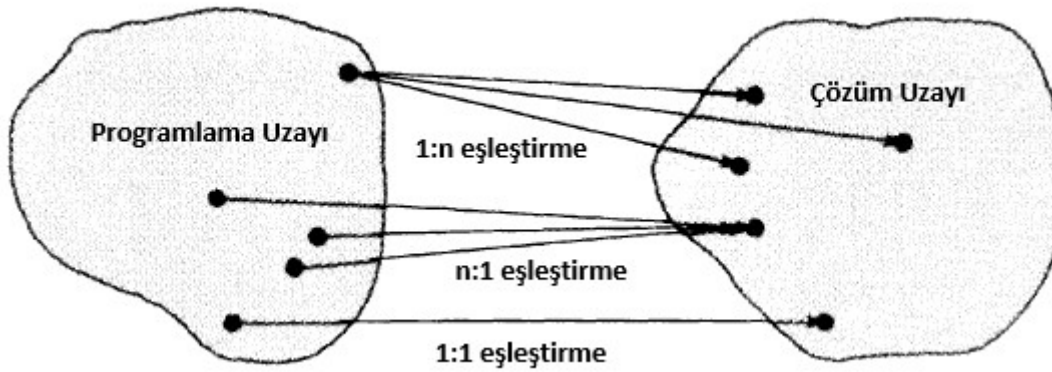
Problem çözme yöntemi olarak genetik algoritma seçildiğinde, problem çözümünün kromozom yapısına nasıl dönüştürüleceğinin belirlenmesi önemlidir ve belirlenen yöntem çözüm kalitesine etki eder. Kodlama yöntemleri aşağıdaki gibi sınıflandırılabilir [206]:

- İkili (binary) kodlama: Holland tarafından geliştirilmiştir [211]. İkili kodlamalar Hamming mesafelerinden dolayı bazı zorluklar çıkartabilmektedir. Örneğin, 0111111111 ve 1000000000, 1023 ve 1024 değerleriyle fenotip uzayında komşuyken, genotip uzayında maksimum Hamming mesafesinde olabilmektedir. Kullanımı diğer yöntemlere göre kısıtlıdır.

- Gerçek sayılarla kodlama: Fonksiyon optimizasyon problemlerinin kodlanmasında ikili kodlamadan veya gri kodlamadan daha iyi performans gösterdiği kanıtlanmıştır.
- Tamsayılı veya tam permutasyonlu kodlama: Kombinasyonel optimizasyon problemleri için en uygun kodlama sistemidir. Atama problemlerinde kullanılabilir.
- Genel veri yapısıyla kodlama: Kompleks gerçek dünya problemleri için uygun kodlama sistemidir. Burada matrissel bir yapıda veriler kullanılabilir. Karmaşık yapıdaki problemlerin çözümünde tek veya çok boyutlu veritabanlarından yararlanılması gerektiğinde kullanılabilir.

Problemin yapısına uygun bir kodlamanın yapılıp yapılmadığının incelenmesi gerekmektedir. Bunun için önerilen birkaç prensip bulunmaktadır [206]:

- Tekrarlamama: Programlama ile çözüm kümesi arasında birebir haritalama olmalıdır, bunun dışındaki durumlarda genetik algoritma çözüm bulma yolunda vakit kaybı yaşatabilir. İdeal durum 1:1 eşleşme, en kötü tasarım ise, 1:n eşleşme ile yapılacaktır (Şekil 5.5). Bu durumda birden fazla olası çözüm için başka bir çözüm sistematigi geliştirilmesi gerekecektir.



Şekil 5.5 Kromozomların programlaması ve çözüm haritalaması [206]

- Geçerlilik: Kodlamadaki herhangi bir dizilimin bir çözüm karşılığının olması gerekmektedir. Böylelikle tüm genetik operatörlerin kodlamada uygulanabilme özelliği garanti altına alınabilir.

- Bütünlük: Her çözümün genetik kodlamada bir karşılığının olması ve genetik aramada bu noktaların ulaşılabilir olmasının garanti altına alınması bu prensiple sağlanır.
- Lamarckian özelliği: Bu özellik bir gendeki alellerin duruma bağlı olmamasını belirtir. Rassallığın fazla olduğu veya hiçbir ebeveyn özelliği taşımayan yapıda Lamarckian yoktur denilebilir.
- Nedensellik: Mutasyondan kaynaklanabilecek genotip uzayındaki küçük değişikliklerin, fenotip uzayında da küçük değişiklik yaratması prensibidir.

Bilgiler ışığında, aşağıda amaç fonksiyonu (5.9) ve kısıtları (5.10)'da gösterilen maksimizasyon probleminde x değerlerini bulmak için kodlama aşağıdaki gibi yapılabilir:

Maksimizasyon

$$z = x_1^3 + x_2^2 + x_3 - x_4 \quad 5.9$$

$$x_1, x_2, x_3, x_4 \in [0, +3] \subset \mathbb{Z} \quad 5.10$$

Amaç fonksiyonu aynı zamanda uygunluk fonksiyonudur (fitness function). Burada olası değerlerin 0, +1, +2, +3 olduğu bilinmektedir, durumu kolaylaştırmak ve 1:1 eşleşme yapabilmek adına, bu probleme özgü, tamsayı değerleri (aleller) kromozom kodlanmasında kullanılabilir (Tablo 5.1). x_1, x_2, x_3, x_4 genlerine ait kromozomun gösterimi $[x_1 \ x_2 \ x_3 \ x_4]$ şeklinde yapılabilir. Burada rastgele atamayla ortaya çıkan örnek başlangıç kod $[1 \ 0 \ 2 \ 3]$ şeklinde olacaktır:

Tablo 5.1 Genlerin belirlenmesine dair rastgele atama örneği

Değişkenler	x_1	x_2	x_3	x_4
Değerler	0	0	0	0
	1	1	1	1
	2	2	2	2
	3	3	3	3

Problemin boyutu ve çözüm parametrelerine göre başlangıç popülasyonu belirli bir kurala göre veya rastgele bir şekilde istenilen sayıda oluşturulabilir. Yukarıdaki örnek için başlangıç popülasyonu 10 olarak belirlenirse, diğer 9 kod: $[2 \ 1 \ 3 \ 3]$, $[0 \ 0 \ 2 \ 1]$, $[3 \ 2 \ 1 \ 1]$, $[0 \ 3 \ 1 \ 1]$, $[3 \ 2 \ 0 \ 1]$, $[2 \ 0 \ 0 \ 2]$, $[2 \ 0 \ 2 \ 2]$, $[3 \ 1 \ 0 \ 0]$, $[1 \ 2 \ 3 \ 0]$ şeklinde rastgele oluşturulabilir. Fenotipleri sırasıyla, 0, 9, 1, 31, 9, 30, 6, 8, 28, 8 olacaktır.

5.2.1.3 Seçilim ve Yeniden Üreme Yöntemleri

İyi bir neslin oluşturulması için iyi bir ebevenyn seçme mekanizması gereklidir [208]. Genetik biliminde doğal seleksiyon olarak da bilinen bu mekanizma, genetik algoritmada her iterasyonda daha iyi çözümler elde etmek için kullanılmaktadır. En çok kullanılan seçilim yöntemleri aşağıda açıklanmaktadır [206]:

- Rulet çarkı seçilimi: En çok bilinen bu seçilim yöntemi Holland tarafından önerilmiştir [211]. Buradaki temel fikir seçilim veya hayatta kalma olasılığının, uygunluk değeriyle orantılı bir şekilde belirlenmesidir. Rulet çarkı modeli burada ihtimallerin görselleştirilmesi için kullanılır, metodun isimlendirilmesi buradan gelmektedir. İstenen popülasyon sayısı kadar rulet çarkının döndürülmesiyle yeni popülasyon için bir kromozom seçilmiş olur.
- Turnuva seçilimi: Bu methodda rastgele kromozom kümesi seçilir ve bu küme içerisinde en iyi kromozomun yeniden üreme için ayrılması sağlanır. Bu küme içerisindeki kromozom sayısı turnuva boyutunu belirler. En yaygın turnuva boyutu ikidir. Binary (ikili) turnuva olarak adlandırılan, içerisinde 2 kromozom bulunan kümelerden oluşmaktadır. Turnuva seçilimi için literatürde birden fazla alt yöntem önerilmiştir. Temelde, eşleşmede daha yüksek uygunluk değerine sahip kromozom yeni popülasyona aktarılır ve bu işlemler oluşturulması istenen popülasyonun tamamlanana kadar devam eder.
- Sıralı seçilim: Popülasyonda kromozom uygunluk değerlerinin hesaplanıp, bunların en iyiden en kötüye göre sıralanmasına dayanır. Sıralama değerleri seçilme ihtimalini belirler. Bu yöntemin hedefi ve rulet çarkı seçiliminden farkı, kromozomlar arasında sıralamadan gelen makul farklılığı korumak ve süper-kromozomların popülasyondaki üstünlüğünü başlangıç iterasyonlarında azaltarak çeşitliliği artırmaya çalışmaktır.
- Rastgele seçilim: Popülasyon hacmine göre rassal bir şekilde kromozomların seçilmesi yöntemidir. İyi ve kötü ayrımının yapılmıyor oluşu, iterasyon sayısı arttıkça, optimum çözüme yaklaşma hızını azaltır.

- Durağan seçim: Belirli sayıdaki en kötü ebevyınların çıkarılıp yerlerine yeni bireylerin konulmasıdır. Bunların dışındaki kromozomlar nesiller boyu korunur.
- Elitizm: Herhangi bir seçim yönteminde, mevcut popülasyon içerisinde en iyi değere sahip olan kromozomu bir sonraki nesile taşımak için kullanır. Belirli oranlarda uygulanabilir.

Buna göre, önceki bölümde verilen örnek popülasyon üzerinden bir sonraki jenerasyon için kromozomlar turnuva yöntemine göre seçilmek istenirse, öncelikle uygunluk (fitness) değerleri hesaplanır (Tablo 5.2):

Tablo 5.2 Örnek popülasyon kromozomlarının değerleri

No.	Aralık	Kromozom	Değer	Oran
1	0-9	[1 0 2 3]	0	0%
2	10-19	[2 1 3 3]	9	7%
3	20-29	[0 0 2 1]	1	1%
4	30-39	[3 2 1 1]	31	24%
5	40-49	[0 3 1 1]	9	7%
6	50-59	[3 2 0 1]	30	23%
7	60-69	[2 0 0 2]	6	5%
8	70-79	[2 0 2 2]	8	6%
9	80-89	[3 1 0 0]	28	22%
10	90-99	[1 2 3 0]	8	6%
Toplam			130	1

Numaralarına göre aralıkları oluşturulmuş olan kromozomların ikili (binary) turnuvada ile yarışabilmesi için rassal sayılarla belirlenmeleri gerekmektedir. Sonrasında, uygunluk değeri daha iyi olan kromozom çaprazlama işlemleri için seçilir (Tablo 5.3):

Tablo 5.3 Turnuva seçilimi örneği

Rassal sayı	66	84	1	32	95	5	44	48	7	53	7	63	12	57	28	74	25	35	49	25
Kromozom	7	9	1	4	10	1	5	5	1	6	1	7	2	6	3	8	3	4	5	3
Seçim	9		4		10		5		6		7		6		8		4		5	

Seçilen kromozomlar karşılıklı olarak pozisyon alırlar ve çaprazlanırlar. Genetik algoritma modellerinde, çözüm uzayında yeni noktaların aranmasına yardımcı olan

operatörlerden biri çaprazlama operatörüdür. Literatürde çeşitli çaprazlama yöntemleri açıklanmaktadır, bunlardan en çok kullanılanları:

- Tek noktalı çaprazlama: Kromozom üzerindeki tek bir çaprazlama noktası belirlenir ve karşılıklı olarak iki kromozom çaprazlanır (Şekil 5.6).

I.Ebeveyn	0	1	0	0	1	0	1	1	1	0
II.Ebeveyn	0	1	0	0	0	0	0	0	1	1
Çocuk	0	1	0	0	0	0	0	0	1	1

Şekil 5.6 Tek noktalı çaprazlama örneği

- Çok noktalı çaprazlama: Önceden belirlenmiş birden fazla çaprazlama noktasından yararlanılarak genler karşılıklı yer değiştirir (Şekil 5.7).

I.Ebeveyn	0	1	0	0	1	0	1	1	1	0
II.Ebeveyn	0	1	0	0	0	0	0	0	1	1
Çocuk	0	1	0	0	0	0	0	1	1	0

Şekil 5.7 Çok noktalı çaprazlama örneği

- Uniform çaprazlama: Çok noktalı çaprazlamanın özelleşmiş halidir. Burada bir maskeden yararlanılır. Maske üzerindeki 0 değeri 1. ebeveyni, 1 değeri 2. ebeveyni temsil eder. Maske üzerindeki değere göre yeni kromozom üzerinde genlerin dizilimi gerçekleştirilir (Şekil 5.8).

I.Ebeveyn	0	1	0	0	1	0	1	1	1	0
II.Ebeveyn	0	1	0	0	0	0	0	0	1	1
Maske	1	1	0	1	1	0	1	0	1	0
Çocuk	0	1	0	0	0	0	0	1	1	0

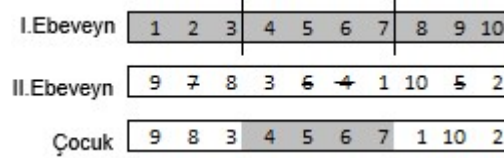
Şekil 5.8 Uniform çaprazlama örneği

- Aritmetik çaprazlama: Karşılıklı konumlandırılmış genlerin ortalamasının alınarak yeni bir gen değeri üretilmesine dayanır (Şekil 5.9).

I.Ebeveyn	0,25	0,39	0,65	0,86	0,54	0,27	0,93	1,00	0,42	0,94
II.Ebeveyn	0,17	0,19	0,32	0,27	0,56	0,84	0,15	0,34	0,82	0,74
Çocuk	0,21	0,29	0,49	0,57	0,55	0,56	0,54	0,67	0,62	0,84

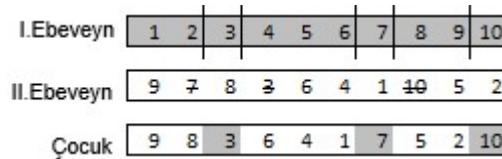
Şekil 5.9 Aritmetik çaprazlama örneği

- Sıralı çaprazlama: 1. Ebeveyne ait kromozom üzerinde iki nokta arasındaki genler seçilir, bunlar aynı sırada çocuğa aktarılır. Seçilen bu genler 2. ebeveynin kromozom diziliminden kaldırılır ve kalan genler aynı 2.ebeveyndeki sıralamayla çocuğa aktarılır (Şekil 5.10).



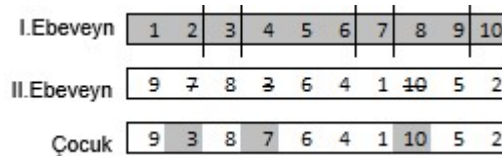
Şekil 5.10 Sıralı çaprazlama örneği

- Pozisyon temelli çaprazlama: Sıralı çaprazlamada 1.ebeveyne ait kromozom üzerinde belirli iki nokta arasında seçili genler aktarılırken, pozisyon temelli çaprazlamada bu genler rastgele belirlenmiştir. Seçilen genler aktarıldıktan sonra, sıralı çaprazlamada olduğu gibi seçilen bu genler 2. ebeveynin kromozom diziliminden kaldırılır, kalan genler aynı 2.ebeveyndeki sıralamayla çocuğa aktarılır (Şekil 5.11).



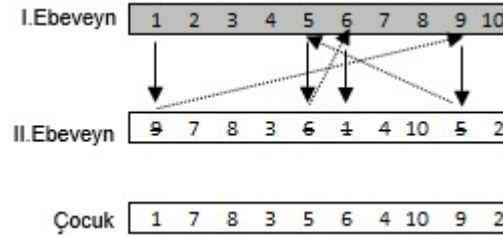
Şekil 5.11 Pozisyon temelli çaprazlama örneği

- Sıra temelli çaprazlama: Pozisyon temelli çaprazlamada olduğu gibi 1.ebeveynden rastgele genler seçilerek çocuğa aktarılır, pozisyon temelli çaprazlamadan farkı, çocuğa aktarılan bu genlerin pozisyonlarıdır. Aktarılmak istenen genler 2.ebeveynde hangi pozisyonlarsa, çocuğa aktarılırken bu pozisyonlar üzerinde sıralanırlar, sonrasında kalan boşluklara 2.ebeveyn kromozomundan gelen genler sıralanır (Şekil 5.12).



Şekil 5.12 Sıra temelli çaprazlama örneği

- Dairesel çaprazlama: 1.ebeveyn üzerindeki ilk genin, 2.ebeveyn kromozomundaki karşılık değeri bulunur, döngü karşılıklı devam ettirilir. 2.ebeveyn üzerindeki seçili genler silinir, kalan genler 1.ebeveyn kromozomundan gelen genlerle beraber çocuğa aktarılır (Şekil 5.13).



Şekil 5.13 Dairesel çaprazlama örneği

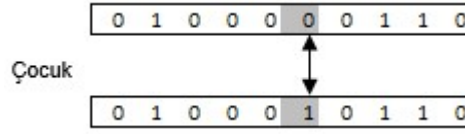
Çaprazlama yönteminin seçiminde, genlerin tekrarlı kullanılıp, kullanılamayacağı önemlidir. Turnuva seçilimi yöntemiyle örnek popülasyonda seçilmiş olan kromozomlar, orta-tek noktalı çaprazlama ile yeniden üremeleri sağlanabilir, modelin yapısına göre çaprazlama tekniği seçilmelidir (Şekil 5.14).

I.Ebeveyn	II.Ebeveyn	I. Çocuk	II. Çocuk
9	4	1	2
[3 1 0 0]	[3 2 1 1]	: [3 1 1 1]	[3 2 0 0]
10	5	3	4
[1 2 3 0]	[0 3 1 1]	: [1 2 1 1]	[0 3 3 0]
6	7	5	6
[3 2 0 1]	[2 0 0 2]	: [3 2 0 2]	[2 0 0 1]
6	8	7	8
[3 2 0 1]	[2 0 2 2]	: [3 2 2 2]	[2 0 0 1]
4	5	9	10
[3 2 1 1]	[0 3 1 1]	: [3 2 1 1]	[0 3 1 1]

Şekil 5.14 Örnek popülasyonda tek noktalı çaprazlama

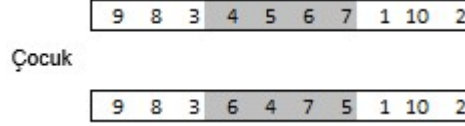
Bir diğer dönüştürme operatörü mutasyondur. Doğada genetik çeşitliliği sağlayan mutasyon, genetik algortmada çözüm uzayında optimum çözüme yakınsamada gereklidir. Sıklıkla kullanılan bazı mutasyon yöntemleri aşağıdadır:

- Bit dönüştürme: İkili (binary) kodla oluşturulmuş gen diziliminde kullanışlıdır. 0 değeri (alel) 1 ile, 1 değeri 0 değeri ile seçilen gende değiştirilir [212] (Şekil 5.15). Rastgele veya önceden belirlenmiş bir gen veya gen dizisi üzerinde gerçekleştirilebilir.



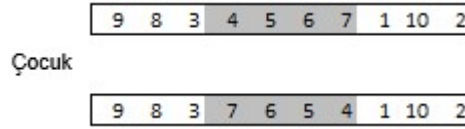
Şekil 5.15 Bit dönüştürme mutasyonu örneği

- Karıştırma (permütasyon): Kromozom üzerinde belirlenmiş gen dizisinin karıştırılması ve sıralamasının değiştirilmesine dayanır (Şekil 5.16).

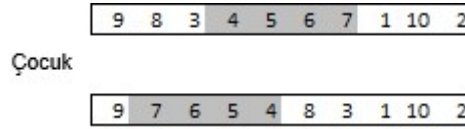


Şekil 5.16 Karıştırma mutasyonu örneği

- Tersinir dönüştürme: Kromozom üzerinde belirlenmiş gen dizisinin tersyüz edilmesi işlemine dayanır (Şekil 5.17). Özelleştirilip, seçilen gen dizisinin pozisyonu da değiştirilebilir (Şekil 5.18).

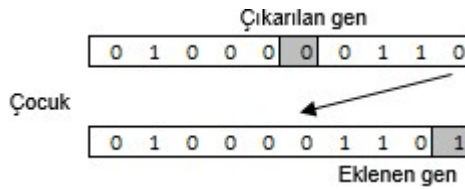


Şekil 5.17 Tersinir mutasyon örneği-I



Şekil 5.18 Tersinir mutasyon örneği-II

- Ekleme-çıkarma: Kromozom üzerindeki bir gen çıkartılıp, yerine başka bir alele sahip gen eklenebilir (Şekil 5.19). Bu işlem aynı pozisyonda da gerçekleştirilebilir.



Şekil 5.19 Ekleme-çıkarma mutasyonu örneği

Seçilim ve çaprazlama işlemleri yapılmış, örnek popülasyonda, tüm kromozomlar içerisinde tek gende rastgele nokta mutasyon yapılabilir (Şekil 5.20). Böylelikle seçilim ve yeniden üreme tamamlanmış olur.

I.Rassal				II.Rassal				Değer	Oran
No.	Aralık	Sayı	Kromozom	Aralık	Sayı	Alel	Kromozom		
1	1-4	7	[3 1 1 1]	0-9	89	0	[3 1 1 1]	28	15%
2	5-8		[3 2 0 0]	10-19		1	[3 2 3 0]	34	18%
3	9-12		[1 2 1 1]	50-74		2	[1 2 1 1]	5	3%
4	13-16		[0 3 3 0]	75-99		3	[0 3 3 0]	12	6%
5	17-20		[3 2 0 2]				[3 2 0 2]	29	15%
6	21-24		[2 0 0 1]				[2 0 0 1]	7	4%
7	25-28		[3 2 2 2]				[3 2 2 2]	31	16%
8	29-32	[2 0 0 1]			[2 0 0 1]	7	4%		
9	33-36	[3 2 1 1]			[3 2 1 1]	31	16%		
10	37-40	[0 3 1 1]			[0 3 1 1]	9	5%		
Toplam								193	1

Şekil 5.20 I.Iterasyon sonunda örnek popülasyon

Başlangıç popülasyonunda seçilim ve yeniden üreme işlemleriyle popülasyondaki ortalama uygunluk değeri, 13'den 19,3'e çıkmıştır. Örnek problem, basit matematiksel yöntemlerle çözüldüğünde maksimum değer 39 elde edilir. Başlangıç popülasyonunda maksimum değer 31, ilk iterasyon sonunda ise 34 bulunmuştur. Problem çözümünün tamamlanması için iterasyonların devam etmesi gerektiği bilinmektedir, ancak ne zaman ve hangi koşullarda işlemlerin durması gerektiği genetik algoritma parametreleriyle belirlenir.

5.2.1.3 Genetik Algoritma Parametreleri ve Diğer Tekniklerden Farkları

Seçilim, çaprazlama ve mutasyon genetik operatörlerinin uygun sonucu vermesi için bunlara ve problemin çözümüne etki edecek parametrelerin belirlenmesi gerekmektedir. Parametre seçimi, genetik algoritmanın çözüm kalitesine direkt etki etmektedir ve her problemin parametresi kendine özgüdür. Deneme-yanılma yöntemiyle veya diğer optimizasyon teknikleriyle belirlenebilirler. Bu parametreler aşağıda tanımlanmaktadır:

- **Popülasyon:** Bir topluluktaki canlı varlığın sayısal yoğunluğudur. Genetik algoritmalarda kromozom sayısı ile ifade edilebilir. Popülasyonun az olması, genetik çeşitliliğin az olmasına, çok olması ise, problemin çözüm süresinin uzamasına sebep vermektedir.

- Çaprazlama sayısı: Çaprazlama ile olası iyi gen dizilimlerinin bir araya gelmesi sağlanarak global optimum noktaya yaklaştırmaya çalışılır. Çaprazlamanın çok olması düzensizliği artırır ve anlamlı yapının bozulmasına sebep olabilir.
- Mutasyon oranı: Kromozom üzerindeki gen sayısında meydana gelebilecek değişiklik sayısına etki eder. Değiştirilen gen sayısının toplam gen sayısına oranı şeklinde ifade edilebilir. Mutasyon ile optimum sonuca küçük adımlarla yaklaşılması hedeflendiğinden, mutasyon oranının büyük olması optimum çözümden uzaklaşılabilir olduğu anlamına gelir.
- Sağ kalma politikası: Bir sonraki jenerasyonda hangi kromozomların kalıp hangilerinin kalmayacağıyla ilgili kararların verilmesi gerekmektedir. Çeşitliliğin sağlanmasıyla beraber en iyi sonucu veren kromozomların bir sonraki jenerasyona aktarılması önemlidir. Elitizm politikasıyla en iyi kromozomlar bir sonraki jenerasyona değiştirilmeden, direkt aktarılırlar. Yaşa dayalı seçim politikasıyla, uygunluk değeri ne olursa olsun belirli bir iterasyon sayısına ulaşmış kromozomlar elenirler. Uygunluk değerine dayalı seçim politikasıyla, en kötü uygunluk değerine sahip ebeveynler elenir, yerlerine en iyi sonucu veren çocuklar getirilir [213].
- Iterasyon sayısı: Kaç tekrardan sonra problem çözüm işlemlerinin bitirilmesiyle ilgilidir. Optimum sonucun belirli tekrarda sürekli ortaya çıkması, çözümün iyileşme oranının sabit kalması veya önceden belirlenmiş sabit bir değer ile ifade edilebilir.

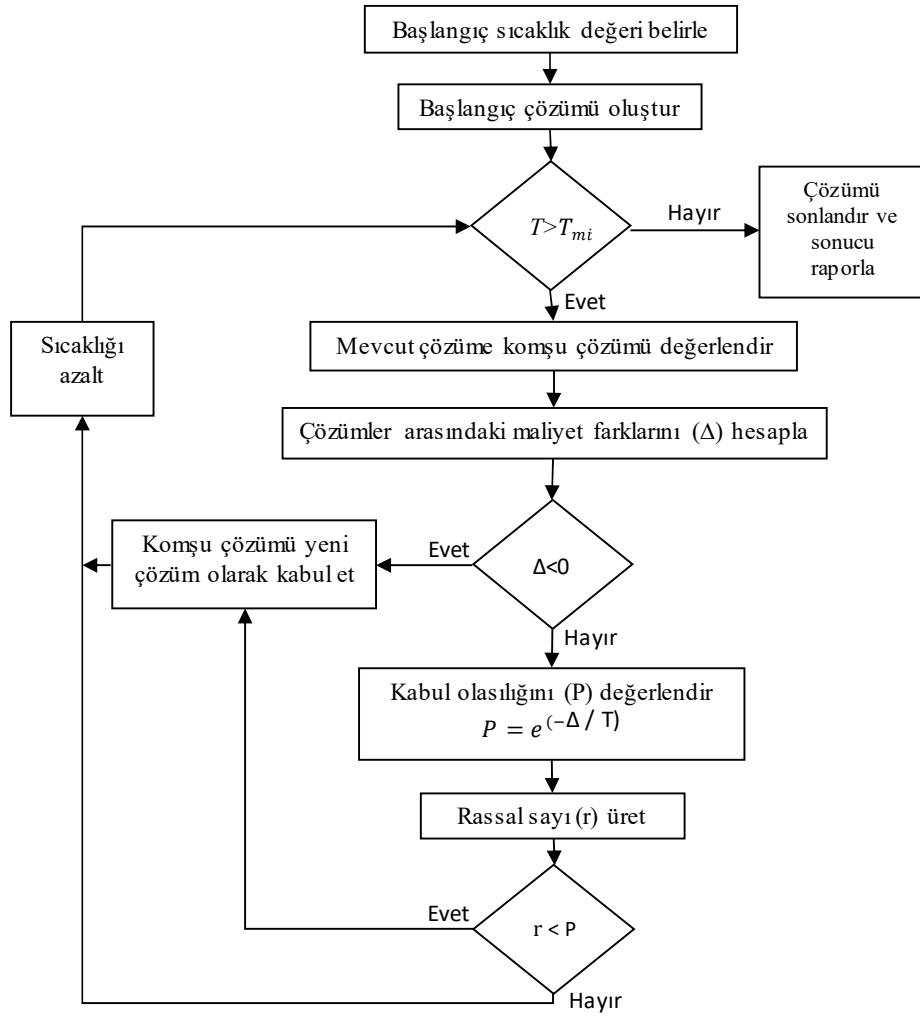
Genetik algoritmaların özellikleri veya diğer optimizasyon, arama tekniklerinden farkları aşağıdadır [214]:

- 1.Genetik algoritmalar, kodlanan parametre setleriyle birlikte çalışırlar, parametrelerin kendileri bu algoritmaları oluşturmaz.
- 2.Popülasyon içerisinde arama yapar, tek bir nokta aranmaz.
- 3.Amaç fonksiyonuna dair bilgiler kullanılır, ikincil veya türetilmiş bilgiler kullanılmaz.
- 4.Deterministik kurallar yerine, probabilistik geçiş kuralları kullanılır.

5.2.2 Fizik Temelli Algoritmalar

Tavlama benzetimi, harmoni arama algoritması, ekstremli optimizasyon, kültürel algoritma, su döngüsü algoritması, yer çekimi arama algoritması, optik temelli algoritma bunlardan bazılarıdır. Tedarik zinciri alanında en yaygın kullanılanlarından biri tavlama benzetimidir.

Tavlama bir metalurji terimidir, katıların ısıtılması ve sonra yavaş yavaş soğutulup şekillendirilmesi işlemidir. Tavlama benzetiminde de sıcaklık değeri T maksimum seviyeden minimum seviyeye gelirken amaç fonksiyonuna en uygun değer aranır. Algoritma adımları Şekil 5.21’de gösterilmektedir.

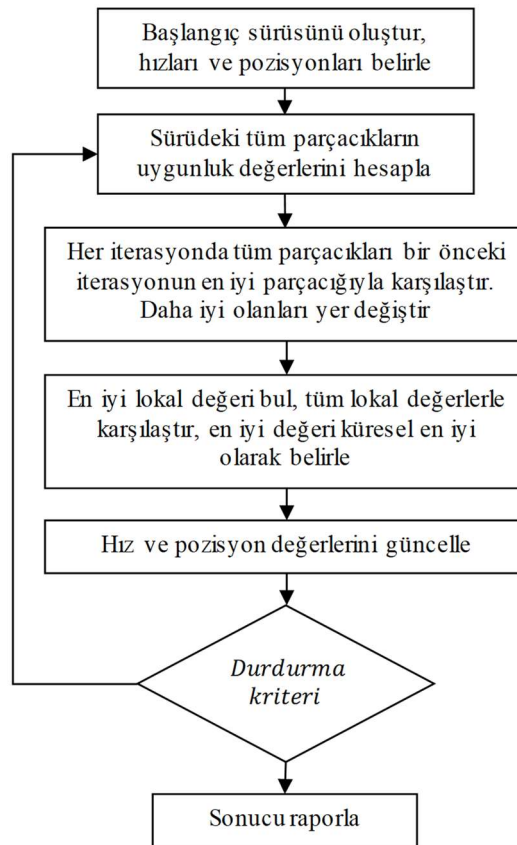


Şekil 5.21 Tavlama Benzetimi algoritmasının genel adımları [215]

5.2.3 Sürü Zekası Algoritmaları

Karınca Kolonisi Optimizasyon Algoritması, Parçacık Sürü Optimizasyonu, Arı Kolonisi, Bakteriyel besin arama algoritması, Ateş böceği algoritması, Guguk kuşu araştırması, resif optimizasyonu bunlardan bazılarıdır. Parçacık sürü optimizasyonu tedarik zinciri alanındaki çalışmalarda sıklıkla kullanılmaktadır.

Parçacık sürü optimizasyonu, besin arayan canlılardan esinlenilerek geliştirilmiştir. Sürüyü oluşturan canlıların, bireysel ve toplu hedeflere ulaşmasını sağlayan içgüdüleri, algoritmayı oluşturur. Özetle, her iterasyonda parçacıkların(canlıların) hız vektörleri hesaplanarak yeni konumları oluşturulur. Böylelikle lokal en iyi hedef ve global en iyi hedefe yaklaşma yoluyla çözüm uzayı taranmış olur. Parçacıkların optimum noktada buluşmasıyla işlemler sonlandırılabilir. Algoritma adımları Şekil 5.22’de gösterilmektedir.

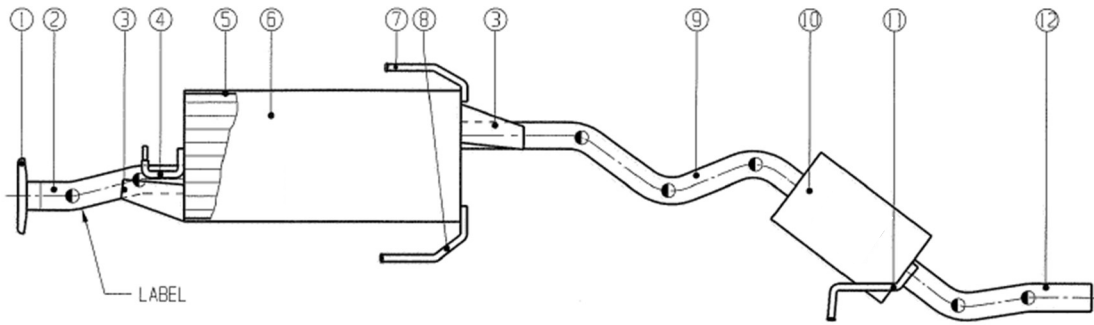


Şekil 5.22 Parçacık sürü optimizasyonunun genel adımları [216]

Tez çalışmasında, Bölüm 4'te sunulan model, otomotiv yan sanayinde faaliyet gösteren uluslararası bir şirketten sağlanan gerçeğe yakın veriler kullanılarak farklı çözüm teknikleriyle uygulanacaktır.

6.1 Problemin Tanıtılması

Otomotiv yan sanayinde, emisyon kontrol sistemleri üretimi alanında faaliyet gösteren uluslararası bir şirket, Avrupa'daki yedek parça operasyonları için tedarik zincirindeki seçenekleri gözden geçirmek istemektedir. Üretimi yapılan ürünlerden birinin örnek teknik resmi Şekil 6.1'de gösterilmektedir.



Şekil 6.1 Ürün teknik resmi

Şekil 6.1'de numaralarla tanımlanmış parçalar sırasıyla: 1-Flanş, 2-Boru, 3-Braket ve tutucu, 4-Braket ve tutucu, 5-Isı kalkanı, 6-Susturucu, 7-Braket ve tutucu, 8-Braket ve tutucu, 9-Boru, 10-Susturucu, 11-Braket ve tutucu, 12-Boru.

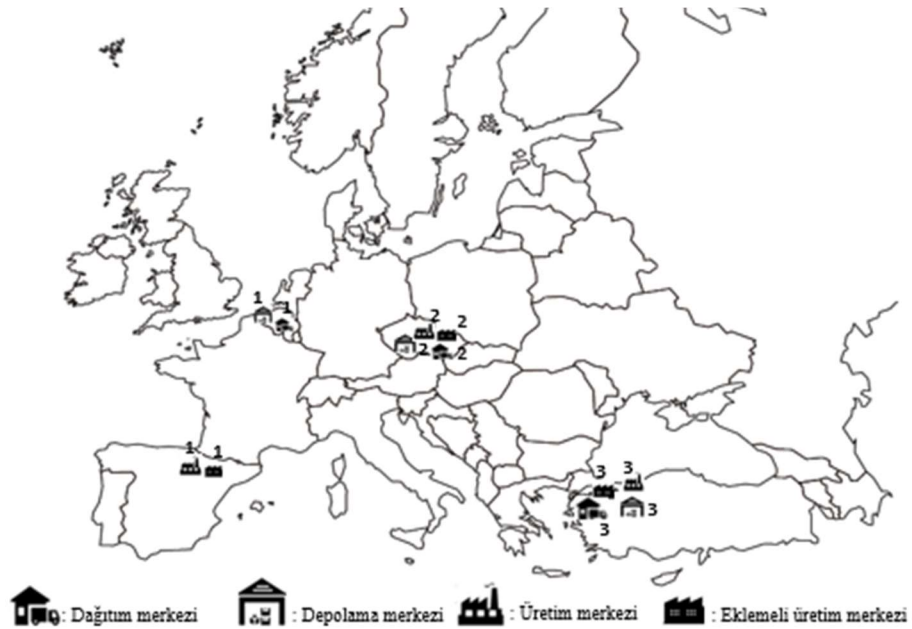
Şirket makine parkurunu ve kapasitesini yüksek hacimli ürünler için ayırmıştır ve düşük hacimli ürünlerin talebini karşılamak için ekstra makine, kalıp ve malzeme tedariki yapmak durumundadır. Yatırım yapılsa dâhi, çeşitlilik yüksek olduğundan, fazla sayıda kalıba ihtiyaç duyulacağı, düşük hacimli üretimlerle ve çok sayıdaki kalıp değişimleriyle operasyonun verimsiz bir şekilde gerçekleştirileceği bilinmektedir. Şirket, Şekil 6.2'de gösterilen vidalanabilen braket ve tutucular için plastik malzemeye geçilmesini ve eklemeli üretim merkezlerinin tedarik zincirine

entegrasyonunu araştırmaktadır. Elektrikli araçların üretim adetlerinin artmaya başlayacağı hesaba katıldığında emisyon kontrol sistemlerine olan ihtiyaç azalacak, ancak yedek parça çeşitliliği kümülatif olarak artmış olacağından gelecekte daha da düşük hacimlerle ve yüksek çeşitlilikle üretim yapılacaktır.



şekil 6.2 Braket (sol) ve tutucu (sağ)

şirket bu araştırma kapsamında, Avrupa'daki tedarik zincirini gözden geçirmektedir. Üretim tesislerine yakın olan eklemeli üretim merkezlerinin de yer aldėı harita şekil 6.3'de gösterilmektedir.



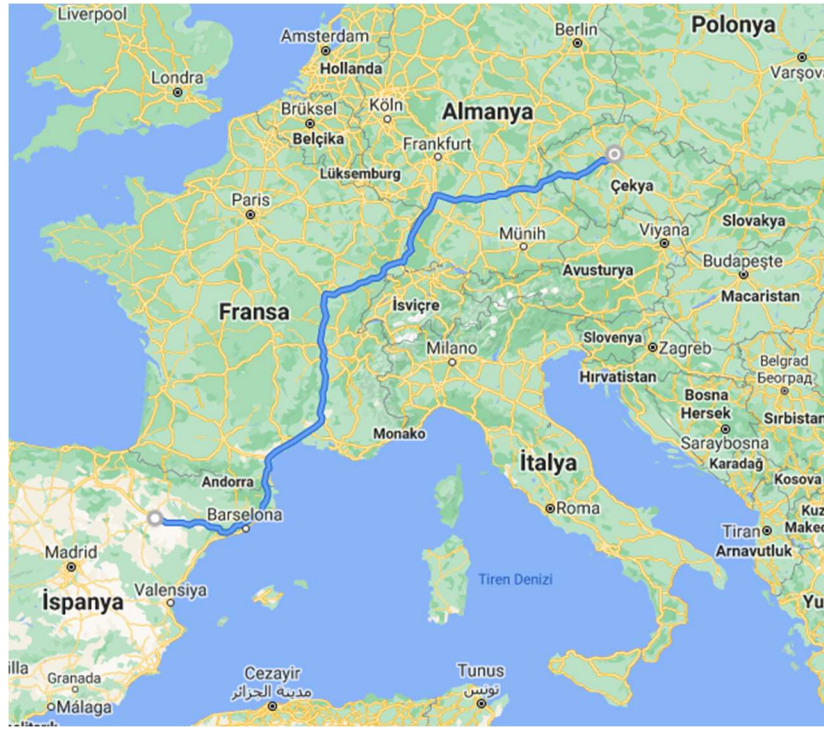
şekil 6.3 Tesislerin haritada gösterimi

6.2 Verilerin Toplanması

Model için gerekli olan parametreler Bölüm 4.3.1’de tanımlanmıştı. Buna göre emisyon kontrol sistemi yedek parça tedarik zinciriyle alakalı veriler işletmenin gerçek verilerinden ve numune ürünlerden esinlenerek oluşturulmuştur. Uygulamada kullanılacak diğer veriler ise yapılan araştırmalar sonucunda gerçeğe yakın olacak şekilde toplanmıştır.

İşletmenin çalışmaya konu olan operasyon merkezleri, Zaragoza/İspanya, Brandys Nad Labem/ Çekya, Lummen/Belçika, Gebze/Türkiye ve Jirny/Çekya’dadır.

Tesisler arasındaki mesafeler Tablo 6.1’de gösterilmektedir. Operasyon merkezleri arasındaki mesafeler Google Maps’ten yararlanılarak elde edilmiştir (Şekil 6.4).



Şekil 6.4 Tesislerin arasındaki mesafelerin hesaplanması

Tablo 6.1 Tesisler arasındaki mesafeler (km)

DIS _{IS}	S1	S2	S3	DIS _{AI}	I1	I2	I3	DIS _{SK}	K1	K2	K3
I1	1409	2033	3294	A1	10	2035	3294	S1	0	860	2660
I2	863	9	1925	A2	2003	30	1911	S2	860	0	1923
I3	2660	1908	0	A3	3248	1887	39	S3	2660	1923	0

Bitmiş ürünler ile braket ve tutucu tüketimi arasındaki ilişki matrisi (BOM) Tablo 6.2’de gösterilmektedir. İlişki matrisi teknik resimlerden elde edilmiştir.

Tablo 6.2 BOM (adet)

BOM _{JY}	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	2	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	2

Üretim merkezleri, depolama merkezleri ve eklemeli üretim merkezlerinin kapasiteleri Tablo 6.3’de gösterilmektedir. Üretim kapasiteleri dakika, depolama kapasitesi metreküp cinsindendir. Üretim kapasitelerinin hesaplanmasında ülkelerdeki haftalık çalışma saatleri baz alınmıştır, yatırım yapılacak makine sayısı aynı kabul edilmiştir. Eklemeli üretim merkezi kapasitesi anlaşma yapılabilecek işletmelerdeki makine sayısı üzerinden 24 saat/gün üzerinden hesaplanmıştır.

Tablo 6.3 Tesis kapasiteleri

CAPM _{IT}	4560	4800	5400
CAPW _{ST}	120	600	240
CAPA _{AT}	43200	51840	116640

Her bir bitmiş ürünün, dağıtım merkezlerindeki talep bilgisi Tablo 6.4’de gösterilmektedir. Çalışmada incelenen düşük talep grubunda yer alan üç türüne ait, altı haftalık yarımamul talebi 576 adet, bitmiş ürün talebi 72 adettir.

Tablo 6.4 Ürünlerin haftalık talepleri (Adet)

DEM _{JKT}	T1	T2	T3	T4	T5	T6
K:1 J:1	3	2	1	2	2	5
K:1 J:2	3	3	3	3	3	2
K:1 J:3	1	1	1	1	1	0
K:2 J:1	1	1	0	1	1	2
K:2 J:2	0	0	0	0	0	0
K:2 J:3	1	2	3	2	2	0
K:3 J:1	1	0	0	0	1	1
K:3 J:2	2	2	2	2	2	1
K:3 J:3	1	1	1	1	1	0

Kurulu depolama merkezi, üretim merkezi (bitmiş ürün) ve eklemeli üretim merkezleri için arazi, bina vb. yatırım maliyeti söz konusu değildir, yarımamullerin şirket bünyesinde üretilmesi için enjeksiyon ve mekanik pres makinelerine ihtiyaç duyulacaktır. Makineler Çin'deki bir tedarikçiden tedarik edilecek, kalıplar şirket bünyesinde üretilmektedir. Üretim merkezi için alınması gereken makineler ve kalıpların altı haftalık periyottaki maliyetleri Tablo 6.5'de gösterilmektedir.

Tablo 6.5 Yatırım maliyetleri (TL)

CFXM _I	17871	16759	16355
CFXP _A	0	0	0
CFXW _S	0	0	0

Tesislerde stok tutma maliyetleri Tablo 6.6'da gösterilmektedir. Stok tutma maliyeti, malzemelerin birden fazla periyotta işletme içerisinde tutulması durumunda kapladıkları hacim üzerinden hesaplamaktadır.

Tablo 6.6 Haftalık stok tutma maliyetleri (TL/m³)

CIH1 _I	170
CIH2 _A	240
CIH3 _S	20

Bitmiş ürün ve yarımamul üretimleri için harcanan süreler Tablo 6.7'de belirtilmektedir.

Tablo 6.7 Üretim süreleri (adet/dakika)

TIM1 _{YI}	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,2	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
TIM2 _{YA}	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	60	45	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20
TIM3 _{JI}	2	3	3																					

Bitmiş ürün ve yarımamullerin eklemeli üretim merkezi ve üretim merkezlerindeki birim üretim maliyetleri Tablo 6.8'de gösterilmektedir. Hammadde ve enerji maliyetleri arasındaki fark önemsiz kabul edilmiştir.

Tablo 6.8 Birim üretim maliyetleri (TL/dakika)

CP1 _I	1,91	1,09	0,64
CP2 _A	0,11	0,07	0,04

Ürünlerin ve yarımamullerin hacim bilgileri Tablo 6.9’da gösterilmektedir.

Tablo 6.9 Yarımamul ve bitmiş ürünlerin hacim bilgileri (cm³)

SPAS _Y	23	23	23	23	23	23	23	23	23	23	23	23	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13
SPAF _J	90B	14B	53B																				

Bitmiş ürün ve yarımamullerin birim taşıma maliyetleri Tablo 6.10’da gösterilmektedir. Malzemelerin birim taşıma maliyetleri karayoluyla ton başına 0,12\$/mil kabulüyle hesaplanmıştır.

Tablo 6.10 Birim taşıma maliyetleri (TL x10000 km)

CTRS _Y	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
CTRF _J	27	41	50																			

Bunlara ek olarak, tüm taşıma işlemlerinin ilgili periyot içerisinde gerçekleştirileceği varsayılmaktadır.

6.3 Modelin Tamsayılı Programlama ile Çözülmesi

Matematiksel model Bölüm 4’te oluşturulmuştu, uygulama için gerekli veriler de sağlandıktan sonra programlama yardımıyla çözüm elde edilebilir. Buna göre öncelikle ilk 5 yarımamulün yer aldığı, ilk 3 periyot için küçük bir modelin çözümü sağlanacaktır. Sonrasında, tüm veri seti kullanılarak uygulamada belirtilen problem çözülecek ve sonrasında daha büyük modeller için çözüm aranacaktır. Problemlerin çözümünde Windows 10 işletim sistemi yüklü, 3GB RAM, Core Duo 2.53 GHz işletim sistemine sahip bilgisayar ve Lingo 9.0 yazılımı kullanılacaktır.

6.3.1 Çözüm Tekniğinin Küçük Veri Setiyle Sınanması

Küçük modelde, 3 bitmiş ürün, 5 yarımamul, 3 eklemeli üretim merkezi, 3 üretim merkezi, 3 depolama merkezi, 3 dağıtım merkezi ve 3 periyot için toplam 1736 değişken, 468 kısıt bulunmaktadır. 379 Iterasyonla global optimum çözüm elde

edilmiştir, toplam maliyet 222.85TL bulunmuştur. Buna göre karar değişkenlerine ait sonuçlar aşağıdaki tablolarda gösterilmektedir. Tablo 6.11’de 36 adetlik bitmiş ürün talebinin tamamının karşılandığı, 1 nolu üretim merkezinin kullanılmadığı görülmektedir.

Tablo 6.11 Üretim merkezinde bitmiş ürün üretimi

Üretim merkezi	Bitmiş ürün	Periyot		
		$t=1$	$t=2$	$t=3$
$i = 1$	$j = 1$	0	0	0
$i = 1$	$j = 2$	0	0	0
$i = 1$	$j = 3$	0	0	0
$i = 2$	$j = 1$	4	3	1
$i = 2$	$j = 2$	3	3	3
$i = 2$	$j = 3$	2	3	4
$i = 3$	$j = 1$	1	0	0
$i = 3$	$j = 2$	2	2	2
$i = 3$	$j = 3$	1	1	1
Toplam		13	12	11

Tablo 6.12’deki sonuçlara göre, üretim merkezlerinde hiçbir yarımamul üretilmemiştir.

Tablo 6.12 Üretim merkezinde yarımamul üretimi

Üretim merkezi	Yarımamul	Periyot		
		$t = 1$	$t = 2$	$t = 3$
$i = 1$	$y = 1$	0	0	0
$i = 1$	$y = 2$	0	0	0
$i = 1$	$y = 3$	0	0	0
$i = 1$	$y = 4$	0	0	0
$i = 1$	$y = 5$	0	0	0
$i = 2$	$y = 1$	0	0	0
$i = 2$	$y = 2$	0	0	0
$i = 2$	$y = 3$	0	0	0
$i = 2$	$y = 4$	0	0	0
$i = 2$	$y = 5$	0	0	0
$i = 3$	$y = 1$	0	0	0
$i = 3$	$y = 2$	0	0	0
$i = 3$	$y = 3$	0	0	0
$i = 3$	$y = 4$	0	0	0
$i = 3$	$y = 5$	0	0	0
Toplam		0	0	0

Tablo 6.13'deki sonuçlara göre, 57 adetlik yarımamul, sadece 3 nolu eklemeli üretim merkezinden sağlanmıştır.

Tablo 6.13 Eklemeli üretim merkezinde yarımamul üretimi

Eklemeli üretim merkezi	Yarımamul	Periyot		
		$t = 1$	$t = 2$	$t = 3$
$a = 1$	$y = 1$	0	0	0
$a = 1$	$y = 2$	0	0	0
$a = 1$	$y = 3$	0	0	0
$a = 1$	$y = 4$	0	0	0
$a = 1$	$y = 5$	0	0	0
$a = 2$	$y = 1$	0	0	0
$a = 2$	$y = 2$	0	0	0
$a = 2$	$y = 3$	0	0	0
$a = 2$	$y = 4$	0	0	0
$a = 2$	$y = 5$	0	0	0
$a = 3$	$y = 1$	5	3	1
$a = 3$	$y = 2$	5	3	1
$a = 3$	$y = 3$	5	3	1
$a = 3$	$y = 4$	5	5	5
$a = 3$	$y = 5$	5	5	5
Toplam		25	19	13

Tablo 6.14'deki sonuçlara göre, tüm bitmiş ürünler en yakın depolama merkezinden dağıtım merkezine taşınmıştır.

Tablo 6.14 Depolama-dağıtım merkezleri arasındaki taşıma miktarları

Depolama Merkezi	Dağıtım merkezi	$j = 1$			$j = 2$			$j = 3$		
		$t = 1$	$t = 2$	$t = 3$	$t = 1$	$t = 2$	$t = 3$	$t = 1$	$t = 2$	$t = 3$
$s = 1$	$k = 1$	3	2	1	3	3	3	1	1	1
$s = 1$	$k = 2$	0	0	0	0	0	0	0	0	0
$s = 1$	$k = 3$	0	0	0	0	0	0	0	0	0
$s = 2$	$k = 1$	0	0	0	0	0	0	0	0	0
$s = 2$	$k = 2$	1	1	0	0	0	0	1	2	3
$s = 2$	$k = 3$	0	0	0	0	0	0	0	0	0
$s = 3$	$k = 1$	0	0	0	0	0	0	0	0	0
$s = 3$	$k = 2$	0	0	0	0	0	0	0	0	0
$s = 3$	$k = 3$	1	0	0	2	2	2	1	1	1
Toplam		9			15			12		

Tablo 6.15'deki sonuçlara göre, 3 nolu üretim merkezinde üretilen 57 adet yarımamul 2 ve 3 nolu üretim merkezlerine taşınmıştır.

Tablo 6.15 Eklemeli üretim merkezi-üretim merkezleri arasındaki taşıma miktarları

Eklemeli üretim merkezi	Üretim merkezi	Yarımamuller				
		$y = 1$	$y = 2$	$y = 3$	$y = 4$	$y = 5$
$a = 1$	$i = 1$	0	0	0	0	0
$a = 1$	$i = 2$	0	0	0	0	0
$a = 1$	$i = 3$	0	0	0	0	0
$a = 2$	$i = 1$	0	0	0	0	0
$a = 2$	$i = 2$	0	0	0	0	0
$a = 2$	$i = 3$	0	0	0	0	0
$a = 3$	$i = 1$	0	0	0	0	0
$a = 3$	$i = 2$	8	8	8	9	9
$a = 3$	$i = 3$	1	1	1	6	6
Toplam		9	9	9	15	15

Tablo 6.16'daki sonuçlar depolama merkezlerine yakın olan üretim tesislerinden taşıma işlemlerinin yapıldığını doğrulamaktadır.

Tablo 6.16 Üretim merkezi-depolama merkezleri arasındaki taşıma miktarları

Üretim merkezi	Depolama merkezi	$j = 1$			$j = 2$			$j = 3$		
		$t = 1$	$t = 2$	$t = 3$	$t = 1$	$t = 2$	$t = 3$	$t = 1$	$t = 2$	$t = 3$
$i = 1$	$s = 1$	0	0	0	0	0	0	0	0	0
$i = 2$	$s = 1$	3	2	1	3	3	3	1	1	1
$i = 3$	$s = 1$	0	0	0	0	0	0	0	0	0
$i = 1$	$s = 2$	0	0	0	0	0	0	0	0	0
$i = 2$	$s = 2$	1	1	0	0	0	0	1	2	3
$i = 3$	$s = 2$	0	0	0	0	0	0	0	0	0
$i = 1$	$s = 3$	0	0	0	0	0	0	0	0	0
$i = 2$	$s = 3$	0	0	0	0	0	0	0	0	0
$i = 3$	$s = 3$	1	0	0	2	2	2	1	1	1
Toplam		9			15			12		

Tüm çıktılar incelendiğinde tüm üretim miktarlarının, depolama miktarlarının ve taşıma miktarlarının tutarlı ve doğru olduğu görülmüştür.

6.3.2 Problemin Çözümü

Modelde, 3 bitmiş ürün, 24 yarımamul, 3 eklemeli üretim merkezi, 3 üretim merkezi, 3 depolama merkezi, 3 dağıtım merkezi ve 6 periyot için toplam 9734 değişken, 2193 kısıt bulunmaktadır. 167940 Iterasyonla global optimum çözüm elde edilmiştir, toplam maliyet 963.7 TL bulunmuştur. Buna göre karar değişkenlerine ait sonuçlar aşağıdaki tablolarda gösterilmektedir. Tablo 6.17’de gösterilen verilere göre, bitmiş ürün üretimlerinin tamamı gerçekleşmiştir.

Tablo 6.17 Üretim merkezinde bitmiş ürün üretimi

Üretim merkezi	Bitmiş ürün	Periyot					
		$t=1$	$t=2$	$t=3$	$t=4$	$t=5$	$t=6$
$i = 1$	$j = 1$	0	0	0	0	0	0
$i = 1$	$j = 2$	0	0	0	0	0	0
$i = 1$	$j = 3$	0	0	0	0	0	0
$i = 2$	$j = 1$	4	3	1	3	3	7
$i = 2$	$j = 2$	3	3	3	3	3	2
$i = 2$	$j = 3$	2	3	4	3	3	0
$i = 3$	$j = 1$	1	0	0	0	1	1
$i = 3$	$j = 2$	2	2	2	2	2	1
$i = 3$	$j = 3$	1	1	1	1	1	0
Toplam		13	12	11	12	13	11

1 nolu üretim merkezinin kullanılmadığı görülmüştür. Üretimi yapılan ürünler stokta tutulmadan direkt depolama merkezlerine gönderilmiştir (Tablo 6.18).

Tablo 6.18 Üretim merkezi-depolama merkezleri arasındaki taşıma miktarları

Üretim merkezi	Depolama merkezi	Tüm bitmiş ürünler					
		$t = 1$	$t = 2$	$t = 3$	$t = 4$	$t = 5$	$t = 6$
$i = 1$	$s = 1$	0	0	0	0	0	0
$i = 2$	$s = 1$	7	6	5	6	6	7
$i = 3$	$s = 1$	0	0	0	0	0	0
$i = 1$	$s = 2$	0	0	0	0	0	0
$i = 2$	$s = 2$	2	3	3	3	3	2
$i = 3$	$s = 2$	0	0	0	0	0	0
$i = 1$	$s = 3$	0	0	0	0	0	0
$i = 2$	$s = 3$	0	0	0	0	0	0
$i = 3$	$s = 3$	4	3	3	3	4	2
Toplam		13	12	11	12	13	11

Depolama merkezlerinden dağıtım merkezlerine taşınan ürün miktarları Tablo 6.19'da gösterilmektedir. Herhangi bir karşılanmayan sipariş bulunmamaktadır.

Tablo 6.19 Depolama-dağıtım merkezleri arasındaki taşıma miktarları

Depolama Merkezi	Dağıtım merkezi	Periyot					
		$t=1$	$t=2$	$t=3$	$t=4$	$t=5$	$t=6$
$s = 1$	$k = 1$	7	6	5	6	6	7
$s = 1$	$k = 2$	0	0	0	0	0	0
$s = 1$	$k = 3$	0	0	0	0	0	0
$s = 2$	$k = 1$	0	0	0	0	0	0
$s = 2$	$k = 2$	2	3	3	3	3	2
$s = 2$	$k = 3$	0	0	0	0	0	0
$s = 3$	$k = 1$	0	0	0	0	0	0
$s = 3$	$k = 2$	0	0	0	0	0	0
$s = 3$	$k = 3$	4	3	3	3	4	2
Toplam		13	12	11	12	13	11

Üretim merkezlerinin hiçbirinde yarımamul üretimi tercih edilmemiştir. Eklemeli üretim merkezlerinde sadece 3 nolu eklemeli üretim merkezi tercih edilmiştir. Gerçekleştirilen üretim adetleri aşağıda gösterilmektedir (Tablo 6.20).

Tablo 6.20 Eklemeli üretim merkezinde yarımamul üretimi

Eklemeli üretim merkezi	Yarımamul	Periyot					
		$t = 1$	$t = 2$	$t = 3$	$t = 4$	$t = 5$	$t = 6$
$a = 3$	$y = 1$	5	3	1	3	4	8
$a = 3$	$y = 2$	5	3	1	3	4	8
$a = 3$	$y = 3$	5	3	1	3	4	8
$a = 3$	$y = 4$	5	5	5	5	5	3
$a = 3$	$y = 5$	5	5	5	5	5	3
$a = 3$	$y = 6$	5	5	5	5	5	3
$a = 3$	$y = 7$	5	5	5	5	5	3
$a = 3$	$y = 8$	3	4	5	4	4	0
$a = 3$	$y = 9$	3	4	5	4	4	0
$a = 3$	$y = 10$	3	4	5	4	4	0
$a = 3$	$y = 11$	3	4	5	4	4	0
$a = 3$	$y = 12$	6	8	10	8	8	0
$a = 3$	$y = 13$	5	3	1	3	4	8
$a = 3$	$y = 14$	5	3	1	3	4	8
$a = 3$	$y = 15$	5	3	1	3	4	8
$a = 3$	$y = 16$	5	5	5	5	5	3

Tablo 6.20 Eklemeli üretim merkezinde yarımamul üretimi (Devamı)

Eklemeli üretim merkezi	Yarımamul	Periyot					
		$t = 1$	$t = 2$	$t = 3$	$t = 4$	$t = 5$	$t = 6$
$a = 3$	$y = 17$	5	5	5	5	5	3
$a = 3$	$y = 18$	5	5	5	5	5	3
$a = 3$	$y = 19$	5	5	5	5	5	3
$a = 3$	$y = 20$	3	4	5	4	4	0
$a = 3$	$y = 21$	3	4	5	4	4	0
$a = 3$	$y = 22$	3	4	5	4	4	0
$a = 3$	$y = 23$	3	4	5	4	4	0
$a = 3$	$y = 24$	6	8	10	8	8	0
Toplam		106	106	106	106	112	72

3 nolu eklemeli üretim merkezinden, üretim merkezlerine yapılan taşıma miktarları Tablo 6.21’de gösterilmektedir.

Tablo 6.21 Eklemeli üretim merkezi-üretim merkezleri arasındaki taşıma miktarları

Eklemeli üretim merkezi	Üretim merkezi	Tüm yarımamuller					
		$t = 1$	$t = 2$	$t = 3$	$t = 4$	$t = 5$	$t = 6$
$a = 1$	$i = 1$	0	0	0	0	0	0
$a = 1$	$i = 2$	0	0	0	0	0	0
$a = 1$	$i = 3$	0	0	0	0	0	0
$a = 2$	$i = 1$	0	0	0	0	0	0
$a = 2$	$i = 2$	0	0	0	0	0	0
$a = 2$	$i = 3$	0	0	0	0	0	0
$a = 3$	$i = 1$	0	0	0	0	0	0
$a = 3$	$i = 2$	72	78	78	78	78	58
$a = 3$	$i = 3$	34	28	28	28	34	14
Toplam		106	106	106	106	112	72

Bulgulara göre, şirket yarımamul üretimi için herhangi bir yatırım kararı almamalıdır ve yarımamul üretimini eklemeli üretim merkezlerinde yapmalıdır.

6.3.3 Modelin Hacminin Genişletilmesi Durumu

Tamsayılı programlama ile küçük boyutlu problemin çözülebildiği bir önceki bölümde gösterildi. Gerçek hayat problemleri daha kapsamlı olabilir örneğin, ortaya

konulan model dünya çapında yapılabilecek tedarik zinciri optimizasyonları için kullanılabilir. Bu durumda da tamsayılı programlamanın geçerli çözüm yöntemi olup olmayacağı araştırılmalıdır. Modelde yer alan değişken sayısı ve çözüm süreleri Tablo 6.22’de gösterilmektedir.

Tablo 6.22 Tamsayılı programlamanın limitleri

Problemin Boyutu	Değişkenler							Lingo
	A	I	S	K	J	Y	T	
Küçük	3	3	3	3	3	5	1	00:00:01
	3	3	3	3	3	5	3	00:00:02
	3	3	3	3	3	5	6	00:00:02
Orta	3	3	3	3	6	12	6	00:00:22
	3	3	3	3	12	12	6	00:00:36
	3	3	3	3	3	24	6	00:00:53
	3	3	3	3	20	24	6	----
	3	3	3	3	40	24	6	----
Büyük	3	3	3	6	40	24	6	----

Tablo 6.22’deki bilgiler, tamsayılı programlamanın problemin boyutu büyüdüğünde geçerli çözüm yöntemi olamayacağını göstermektedir. Buna göre, büyük modellerin çözülebilmesi için alternatif çözüm metodolojisinin tanımlanması gerekmektedir.

6.4 Modelin Genetik Algoritma ile Çözülmesi

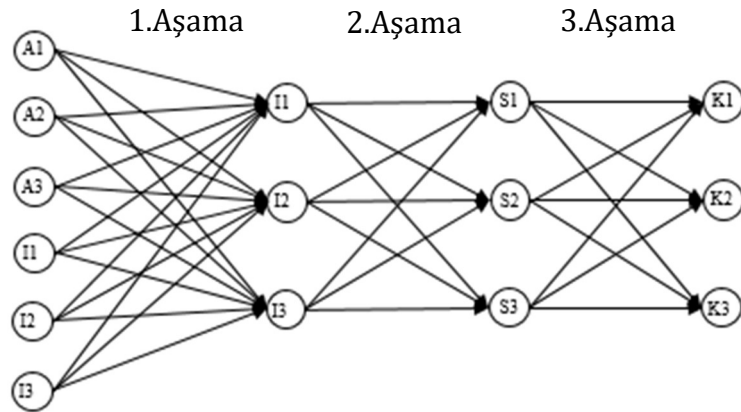
Tedarik zinciri için matematiksel gösterimi yapılan model küçük boyutlarda karma tamsayılı programlamayla çözülebilmektedir. Ancak boyut büyüdükçe kabul edilebilir zamanda ve maliyetlerle, tam sonuç veren algoritmalarla çözmek zorlayıcı olmaktadır. Bu bölümde yedek parça tedarik zinciri tasarımında önerilen modelin çözümünde optimuma yaklaşık sonuç veren, tez çalışmasındaki model için geliştirilen genetik algoritma çözüm yöntemi tanıtılacaktır.

Doğrusal taşıma problemleri için geliştirilmiş en basit genetik algoritma gösterimi ilk olarak G.A Vignaux ve Z.Michalewicz tarafından yapılmıştır. Çalışmada, taşıma matrisi kullanılmış, atamalar çaprazlama(crossover) ve mutasyonlarla değiştirilerek toplam taşıma maliyetinin minimizasyonu hedeflenmiştir [27]. Devamında yapılan çalışmalarda, tedarik zinciri ele alınmış ve farklı metodolojiler geliştirilmeye başlanmıştır.

Tedarik zinciri modellerinin genetik algoritma ile çözülebilmesi için öncelikle problemin yapısını uygun olacak şekilde taşıma ağının belirlenmesi gerekmektedir. Sonrasında taşıma ağındaki aşamalara göre kromozom yapısı tanımlanmalı ve belirlenmiş çözüm prosedürüne göre başlangıç popülasyonu, uygunluk fonksiyonu, seleksiyon, çaprazlama ve mutasyon operatörleri kullanılarak genetik algoritma çalıştırılmalıdır. Bu aşamalar, gösterimde kolaylık sağlamak amacıyla, bir önceki bölümde tamsayı programlamayla çözülen küçük hacimli model üzerinden tanıtılacaktır.

6.4.1 Taşıma Ağının Belirlenmesi

Tedarik zincirini oluşturan 4 operasyon merkezi ve bunlar arasında 3 aşama bulunmaktadır. Birincisi, yarımamul üretimi yapabilen tesisler, ikincisi bitmiş ürün üretimi yapabilen tesisler, üçüncüsü depolama merkezleri ve dördüncüsü dağıtım merkezleridir. Buna göre, taşıma işlemleri sadece ileri yönlü yapılmakta ve farklı aşamada bulunan merkezler arasında taşıma işlemleri açısından herhangi bir kısıt bulunmamaktadır. Bir başka deyişle, bir önceki aşamada yer alan operasyon merkezlerinin hepsi, bir sonraki aşamada yer alan operasyon merkezlerinin tümüne servis sağlayabilmektedir. Taşıma ağının gösterimi Şekil 6.5'te yapılmaktadır.



Şekil 6.5 Taşıma ağı

6.4.2 Kromozom Yapısının Oluşturulması

Kromozomun uzunluğu içindeki gen sayısı ile tanımlanabilir (6.1). Buna göre toplam kromozom 243 genden oluşmalıdır. Tek bir periyot için 1. aşamanın

kromozom yapısı Şekil 6.6, 2.aşamanın kromozom yapısı Şekil 6.7’de ve 3.aşamanın kromozom yapısı Şekil 6.8’de gösterildiği gibidir, genler(R) 5.satırda yer almaktadır.

$$|T| \times (|Y| \times (|A| + |I|)) + |J| \times (|I| + |S|) + |J| \times (|S| + |K|) \quad (6.1)$$

1.Aşama																													
y = 1						y = 2						y = 3						y = 4						y = 5					
a & i			i			a & i			i			a & i			i			a & i			i			a & i			i		
1	2	3	4	5	6	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	4	5	6	1	2	3	1	2	3
30	29	28	27	26	25	45	44	43	24	23	22	21	20	19	42	41	40	18	17	16	15	14	13	39	38	37	12	11	10

Şekil 6.6 1.aşamanın kromozom yapısı

2.Aşama														
j = 1					j = 2					j = 3				
i			s		i			s		i			s	
1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
9	8	7	18	17	16	6	5	4	15	14	13	3	2	1

Şekil 6.7 2.aşamanın kromozom yapısı

3.Aşama														
j = 1					j = 2					j = 3				
s			k		s			k		s			k	
1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
9	8	7	18	17	16	6	5	4	15	14	13	3	2	1

Şekil 6.8 3.aşamanın kromozom yapısı

Buna göre toplam kromozomun içinde yer alan genler aşağıdaki gibi dizilmektedir:

1.periyot 1.aşama, 1.periyot 2.aşama, 1.periyot 3.aşama, 2.periyot 1.aşama, 2.periyot 2.aşama, 2.periyot 3.aşama, 3.periyot 1.aşama, 3.periyot 2.aşama, 3.periyot 3.aşama

6.4.3 Çözüm Algoritmasının Oluşturulması

Tez çalışmasındaki model için geliştirilen çok ürünlü ve çok periyotlu tedarik zinciri için çözüm algoritması (tek taraflı ve önceliğe dayalı algoritma) toplamda 4 çözüm prosedüründen oluşmaktadır. Bunlar: Genel çözüm prosedürü; 3.aşamanın çözüm prosedürü; 2.aşamanın çözüm prosedürü; 1. aşamanın çözüm prosedürü. Çözüm işlemleri son periyottan ve son aşamadan ilk periyodun ilk aşamasına doğrudur. Genel çözüm prosedürü için pseudo-kod Şekil 6.9’da gösterilmektedir.

Genel Çözüm Prosedürü: Her iterasyon için

- 1: Popülasyon oluştur
- 2: İterasyon 1'den 50'ye kadar
- 3: Kromozom 1'den 100'e kadar
- 4: Son periyottan ilk periyoda kadar
- 5: 3.aşamanın çözüm prosedürünü uygula, 3.aşama değerini hesapla
- 6: 2.aşamanın çözüm prosedürünü uygula, 2.aşama değerini hesapla
- 7: 1.aşamanın çözüm prosedürünü uygula, 3.aşama değerini hesapla
- 8: Toplam uygunluk fonksiyonu değerini hesapla
- 9: Kromozomları uygunluk değerlerine göre sırala
- 10: Bir sonraki popülasyon için yeni kromozomları oluştur
- 11: Kromozom seleksiyonunu yap
- 12: Kromozomda çaprazlama işlemini yap
- 13: Kromozomda mutasyon işlemini yap
- 14: Sonraki iterasyona geç
- 15: Bitir

Şekil 6.9 Genel çözüm prosedürü

Genel çözüm prosedürü içerisinde yer alan, 3.aşama çözüm prosedürü için pseudo-kod Şekil 6.10'da, 2.aşama çözüm prosedürü için pseudo-kod Şekil 6.11'de, 1.aşama çözüm prosedürü için pseudo-kod Şekil 6.12'de gösterilmektedir. Seleksiyon, çaprazlama ve mutasyon operatörleri takip eden bölümlerde anlatılmaktadır.

- 3.Aşama Çözüm Prosedürü:** 3.aşamada yer alan genlerin çözümlenmesi
Girdiler: Talep, bekleyen sipariş, kapasite, genler, M (büyük sayı)
Çıktılar: Gönderimi yapılan bitmiş ürünler
- 1: Dağıtım merkezleri için maksimum gen değerini (R) bul
 - 2: Maliyet matrisini kullanarak en düşük maliyetli depolama merkezini bul
 - 3: $XLOG_{IJKT}$ değişkeni için atama yap: $\min(CAPW_{ST}, DEM_{JKT})$
 - 4: $CAPW_{ST}$, DEM_{JKT} değişkenlerini yapılan atama miktarına göre güncelle
 - 5: Talep karşılandıysa, R değeri=0
 - 6: Eğer depolama merkezinin kapasitesi kalmadıysa, maliyet matrisindeki karşılığına M değerini ekle
 - 7: Eğer $\sum DEM_{JKT} > \sum CAPW_{ST}$, bekleyen sipariş oluştur
 - 8: Bekleyen siparişi DEM_{JKT-1} değişkenine ekle
 - 9: Aşamada yer alan tüm operasyon maliyetlerini topla
 - 10: Bitir

Şekil 6.10 3.aşama çözüm prosedürü

2.Aşama Çözüm Prosedürü: 2.aşamada yer alan genlerin çözümlenmesi
Girdiler: Talep, kapasite
Çıktılar: Üretilen ve gönderimi yapılan bitmiş ürünler
1: Depolama merkezleri için maksimum gen değerini (R) bul
2: Maliyet matrisini kullanarak en düşük maliyetli üretim merkezini bul
3: $XLOG4_{JST}$ değişkeni için atama yap: $\min(CAPM_{IT}, DEM_{JST})$
4: $CAPM_{IT}$, DEM_{JST} değişkenlerini atama yapılan miktara göre güncelle
5: Talep karşılandıysa, R değeri=0
6: Eğer üretim merkezinin kapasitesi kalmadıysa, maliyet matrisindeki karşılığına M değerini ekle
7: Eğer $\sum DEM_{JST} > \sum CAPM_{IT}$ ise bekleyen sipariş oluştur
8: Bekleyen siparişi DEM_{JST-1} değişkenine ekle
9: Aşamada yer alan tüm operasyon maliyetlerini topla
10: Bitir

Şekil 6.11 2.aşama çözüm prosedürü

1.Aşama Çözüm Prosedürü: 1.aşamada yer alan genlerin çözümlenmesi
Girdiler: Talep, kapasite
Çıktılar: Üretilen ve gönderimi yapılan yarımamuller
1: Üretim merkezleri için maksimum gen değerini (R) bul
2: Maliyet matrisini kullanarak en düşük maliyetli eklemeli üretim merkezini üretim merkezini bul
3: $XLOG3_{VIT}$ değişkeni için atama yap: $\min. (\sum DEM_{VIT}, \sum (CAPM_{IT} + CAPA_{AT}))$
4: $CAPM_{IT}$, $CAPA_{AT}$, DEM_{VIT} değişkenlerini atama miktarına göre güncelle
5: Talep karşılandıysa, R değeri=0
6: Eğer eklemeli üretim merkezi veya üretim merkezinin kapasitesi kalmadıysa, maliyet matrisindeki karşılığına M değerini ekle
7: $\sum DEM_{VIT} > \sum (CAPM_{IT} + CAPA_{AT})$ ise bekleyen sipariş oluştur
8: Bekleyen siparişi DEM_{VIT-1} değişkenine ekle
9: Aşamada yer alan tüm operasyon maliyetlerini topla
10: Bitir

Şekil 6.12 1.aşama çözüm prosedürü

6.4.4 Maliyet Matrisi

Maliyet matrisi çözüm için kritik öneme sahiptir. İki düğüm arasındaki bağıntının birim maliyeti şeklinde düşünülebilir. Bu durumda, tek bir düğüm seçildiğinde, karşılığında hangi düğüm olması gerektiği maliyet matrisi sayesinde bulunur. 3 aşama için 3 ayrı maliyet matrisi vardır. Temel olarak, iki düğüm arasında 1 birimlik ürün taşınması durumunda katlanılması gereken maliyetlerin toplamı burada yansıtılır. Depolama merkezi ve dağıtım merkezi arasındaki bağıntıda; depolama merkezi için yapılan yatırımın talebe bölünmesiyle elde edilen birim yatırım

maliyeti ve iki tesis arasındaki mesafeden yola çıkılarak hesaplanan birim taşıma maliyetinin toplamı yer alır. Depolama merkezi ve dağıtım merkezi için maliyet matrisi Tablo 6.23’de gösterilmektedir.

Tablo 6.23 Depolama merkezi ve dağıtım merkezi için maliyet matrisi

Costm SK	1	2	3
1	0	860	2660
2	860	0	1923
3	2660	1923	0

Depolama merkezi ve üretim merkezi arasındaki maliyet kalemleri yatırım ve taşıma maliyetleridir. O dönem için öngörülen yatırım maliyetinin yine o dönemdeki talebe bölünmesiyle birim yatırım maliyeti bulunur ve buna iki tesis arasındaki mesafeden yola çıkılarak hesaplanan birim taşıma maliyeti eklenerek toplam maliyet iki düğüm arasında yansıtılır. Üretim merkezi ve depolama merkezi için maliyet matrisi Tablo 6.24’de gösterilmektedir.

Tablo 6.24 Üretim merkezi ve depolama merkezi için maliyet matrisi

Costm2 IS	1	2	3
1	19281,91	19905,91	21166,91
2	17623,09	16769,09	18685,09
3	18995,64	18243,64	16335,64

Eklemeli üretim merkezi ve üretim merkezi arasındaki mesafe dikkate alınarak birim taşıma maliyeti hesaplanır ve eklemeli üretim merkezleri için yapılacak toplam yatırım miktarı, üretimi yapılacak toplam yarımamule bölünerek birim yatırım maliyeti bulunur. Bu iki maliyetin toplamı maliyet matrisine yansıtılır. üretim merkezleri için maliyet matrisi Tablo 6.25’te gösterilmektedir.

Tablo 6.25 Eklemeli üretim merkezi ve üretim merkezleri için maliyet matrisi

Costm1 IA	1	2	3	4	5	6
1	17882,91	18763,09	19583,64	10,118	2003,068	3248,04
2	19907,91	16790,09	18222,64	2035,118	30,068	1887,04
3	21166,91	18671,09	16374,64	3294,118	1911,068	39,04

6.4.5 Uygunluk Fonksiyonu

Uygunluk fonksiyonu olarak, Bölüm 4’de anlatılan amaç fonksiyonu kullanılmıştır. Her iterasyonda, her kromozom için uygunluk fonksiyonu, toplam maliyetler ayrı ayrı hesaplanmıştır. Kromozomlar düşük maliyetliden, yüksek maliyetli sonuç verene göre sıralanmaktadır.

6.4.6 Seleksiyon

Kromozomların uygunluk fonksiyonuna göre sıralanmasından sonra, popülasyondaki en iyi sonucu veren 4 kromozom bir sonraki jenerasyona direkt aktarılır. Sonrasında, popülasyonun yarısına tamamlanacak şekilde kromozom seçimi yapılmış olur.

6.4.7 Çaprazlama

Çaprazlamada ranking tekniği kullanılarak, popülasyondaki en iyi sonucu veren, %20’lik dilimde yer alan kromozomların yeni popülasyon için diğer kromozomlarla çaprazlanmasıyla daha yüksek oranda gen aktarılması hedeflenmiştir. Temelde iki çeşit çaprazlama tekniği geliştirilmiştir: Global çaprazlama ve lokal çaprazlama.

Global çaprazlama ile, en iyi sonucu veren kromozomun tüm periyotlar için, her periyottaki gen dizilimiyle çaprazlanması hedeflenmiştir. Böylelikle, bir periyotta yakalanan iyi bir çözüm seçeneği, tüm periyotlarda denenerek kromozom toplamındaki etkisi araştırılmış olur.

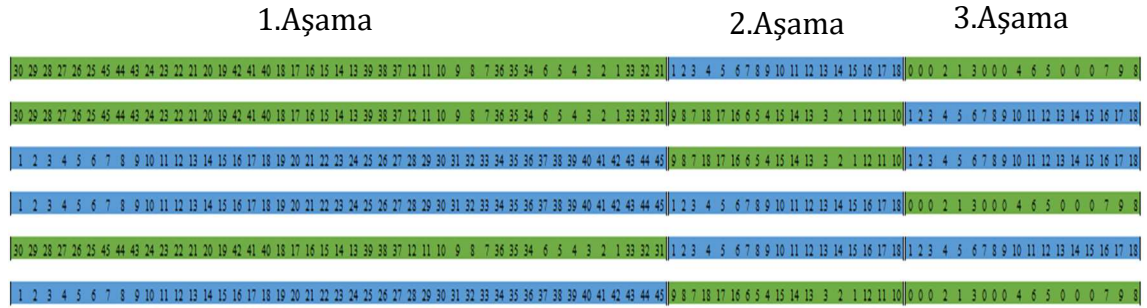
Lokal çaprazlama ile, periyot içerisinde, aşamalar arasında çaprazlama yapılır. Şekil 6.13’de iki ebeveyn kromozomun bir periyot içindeki gen dizilimi gösterilmektedir.

1.Aşama	2.Aşama	3.Aşama
30 29 28 27 26 25 45 44 43 24 23 22 21 20 19 42 41 40 18 17 16 15 14 13 39 38 37 12 11 10 9 8 7 36 35 34 6 5 4 3 2 1 33 32 31	9 8 7 18 17 16 6 5 4 15 14 13 3 2 1 12 11 10	9 8 7 18 17 16 6 5 4 15 14 13 3 2 1 12 11 10
1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23 24 25 26 27 28 29 30 31 32 33 34 35 36 37 38 39 40 41 42 43 44 45	1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18	1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18

Şekil 6.13 1.Ebeveyn(yeşil) ve 2. Ebeveyn(mavi) gösterimi

Tüm periyotlar içerisinde, farklı gen dizilimine sahip kromozomların her periyot özelindeki aşamalarında çaprazlama yapılır. Çaprazlama sonunda 6 yeni çocuk

oluşturulur. Yeşil renk genler 1.ebeveyne, mavi renk genler 2.ebeveyne aittir. Çocukların kromozomları Şekil 6.14’de gösterilmektedir.



Şekil 6.14 Çaprazlama işlemi sonrası gen dizilimleri

6.4.8 Mutasyon

Genetik algoritmada mutasyon operatörü kromozom içerisindeki çeşitliliği artırmak amacıyla kullanılır. Kromozom üzerinde, aynı aşamadaki iki genin pozisyonları karşılıklı olarak değiştirilir. Mutasyon işlemi örneği Şekil 6.15’te gösterilmektedir.



Şekil 6.15 Mutasyon işlemi sonrası gen dizilimleri

Mutasyon oranının yüksek olması, kromozomdaki genlerin daha çok değiştirilmesine sebep olacağından iyi bir çözüm yakalandığında, çözümün iyileştirilmesini engelleyebilir. Öte yandan, mutasyon oranının düşük olması, çeşitliliği azaltacağından, lokal optimum değerlere takılmak olasıdır. Çalışmada mutasyon oranı %20 alınmıştır.

6.4.9 Çözüm Tekniğinin Küçük Veri Setiyle Sınanması

3 bitmiş ürün, 5 yarımamul, 3 eklemeli üretim merkezi, 3 depolama merkezi ve 3 dağıtım merkezi içeren küçük model önerilen genetik algoritma ile çözülmüştür. Çözüm sonunda toplam maliyet 224,66TL bulunmuştur. Karar değişkenlerine ait sonuçlar aşağıdaki tablolarda gösterilmektedir.

Tablo 6.26 Depolama-dağıtım merkezleri arasındaki taşıma miktarları

Depolama Merkezi	Dağıtım merkezi	$j = 1$			$j = 2$			$j = 3$		
		$t = 1$	$t = 2$	$t = 3$	$t = 1$	$t = 2$	$t = 3$	$t = 1$	$t = 2$	$t = 3$
$s = 1$	$k = 1$	0	0	0	3	3	3	0	0	0
$s = 1$	$k = 2$	0	0	0	0	0	0	0	0	0
$s = 1$	$k = 3$	0	0	0	0	0	0	0	0	0
$s = 2$	$k = 1$	3	2	1	0	0	0	1	1	1
$s = 2$	$k = 2$	1	1	0	0	0	0	1	2	3
$s = 2$	$k = 3$	0	0	0	0	0	0	0	0	0
$s = 3$	$k = 1$	0	0	0	0	0	0	0	0	0
$s = 3$	$k = 2$	0	0	0	0	0	0	0	0	0
$s = 3$	$k = 3$	1	0	0	2	2	2	1	1	1
Toplam		9			15			12		

Tablo 6.26'daki veriler incelendiğinde, tüm talebin, 3 depolama merkezi de kullanılarak zamanında karşılandığı görülmüştür.

Tablo 6.27 Üretim merkezi-depolama merkezleri arasındaki taşıma miktarları

Üretim merkezi	Depolama merkezi	$j = 1$			$j = 2$			$j = 3$		
		$t = 1$	$t = 2$	$t = 3$	$t = 1$	$t = 2$	$t = 3$	$t = 1$	$t = 2$	$t = 3$
$i = 1$	$s = 1$	0	0	0	0	0	0	0	0	0
$i = 1$	$s = 2$	0	0	0	0	0	0	0	0	0
$i = 1$	$s = 3$	0	0	0	0	0	0	0	0	0
$i = 2$	$s = 1$	0	0	0	3	3	3	0	0	0
$i = 2$	$s = 2$	4	3	1	0	0	0	2	3	4
$i = 2$	$s = 3$	0	0	0	0	0	0	1	1	1
$i = 3$	$s = 1$	0	0	0	0	0	0	0	0	0
$i = 3$	$s = 2$	0	0	0	0	0	0	0	0	0
$i = 3$	$s = 3$	1	0	0	2	2	2	0	0	0
Toplam		9			15			12		

Tablo 6.27'deki verilerden 1 nolu üretim merkezinin kullanılmadığı görülmektedir. Depolama merkezinin bitmiş ürün talebi ilgili periyotta karşılanmıştır.

Tablo 6.28'de, üretim merkezlerinin yarımamul ihtiyaçlarının tamamının 2 ve 3 nolu eklemeli üretim merkezlerinden karşılandığı görülmüştür.

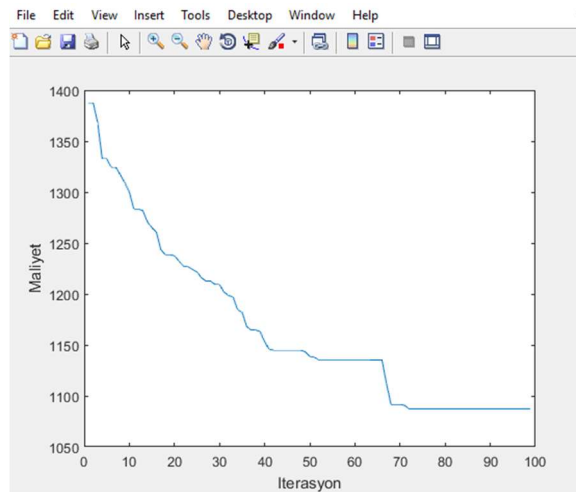
Tablo 6.28 Eklemeli üretim merkezi-üretim merkezleri arasındaki taşıma miktarları

Eklemeli üretim merkezi	Üretim merkezi	Yarımamuller				
		$y = 1$	$y = 2$	$y = 3$	$y = 4$	$y = 5$
$a = 1$	$i = 1$	0	0	0	0	0
$a = 1$	$i = 2$	0	0	0	0	0
$a = 1$	$i = 3$	0	0	0	0	0
$a = 2$	$i = 1$	0	0	0	0	0
$a = 2$	$i = 2$	7	7	7	6	6
$a = 2$	$i = 3$	1	1	1	0	4
$a = 3$	$i = 1$	0	0	0	0	0
$a = 3$	$i = 2$	1	1	1	3	3
$a = 3$	$i = 3$	0	0	0	6	2
Toplam		9	9	9	15	15

Tüm çıktılar incelendiğinde tüm üretim miktarlarının, depolama miktarlarının ve taşıma miktarlarının tutarlı ve doğru olduğu görülmüştür.

6.4.10 Problemin Çözümü

Genetik algoritma ile çözüm sonucunda toplam maliyet 1070 TL bulunmuştur. Matlab'de yazılan kodlar ile çözüm süresi yaklaşık 20 dakika sürmektedir. İterasyonlarla maliyetin değişimi Şekil 6.16'da gösterilmektedir. Tüm talep zamanında karşılanmıştır, depolama merkezi ile dağıtım merkezleri arasındaki toplam taşıma miktarları Tablo 6.29'da gösterilmektedir.



Şekil 6.16 İterasyonlarla toplam maliyetin değişimi

Tablo 6.29 Depolama merkezi-dağıtım merkezi arasındaki taşıma miktarları

Depolama Merkezi	Dağıtım Merkezi		
	1	2	3
1	18	0	0
2	20	16	2
3	0	0	16
Toplam	38	16	18

Üretim tesisleri içerisinde en çok 2 nolu üretim merkezi kullanılmıştır, depolama merkezlerinde oluşan talep karşılanmıştır (Tablo 6.30).

Tablo 6.30 Üretim merkezi-depolama merkezi arasındaki taşıma miktarları

Üretim Merkezi	Depolama Merkezi		
	1	2	3
1	0	0	0
2	18	38	0
3	0	0	16
Toplam	18	38	16

Eklemeli üretim merkezlerinden sadece 3 nolu eklemeli üretim merkezinde üretim yapılmıştır ve buradan 2 ve 3 nolu üretim merkezlerine yarımamul tedarik edilmiştir (Tablo 6.31).

Tablo 6.31 Eklemeli üretim merkezi-üretim merkezi arasındaki taşıma miktarları

Eklemeli Üretim Merkezi	Üretim Merkezi		
	1	2	3
1	0	0	0
2	0	0	0
3	0	0	0
4	0	0	0
5	0	0	0
6	0	472	148
Toplam	0	472	148

6.5 Çözüm Tekniklerinin Karşılaştırılması

Tamsayılı programlama ile büyük modellerin çözümünde zorluk yaşanabileceği bir önceki bölümde belirtilmişti. Problem yaşanabilen büyük modeller önerilen genetik

algoritma çözüm tekniğiyle ile çözülmüş ve karşılaştırma Tablo 6.32’de gösterilmiştir.

Tablo 6.32 Çözüm tekniklerinin performanslarının karşılaştırılması

Boyut	Değişkenler							Lingo	GA	Performans
	A	I	S	K	J	Y	T			
Küçük	3	3	3	3	3	5	1	00:00:01	00:01:08	100,00%
	3	3	3	3	3	5	3	00:00:02	00:04:32	99,00%
	3	3	3	3	3	5	6	00:00:02	00:04:48	98,00%
Orta	3	3	3	3	3	24	6	00:00:53	00:20:33	91,00%
	3	3	3	3	20	24	6	----	00:25:54	----
	3	3	3	3	40	48	6	----	00:43:45	----
Büyük	3	3	3	6	40	48	6	----	00:49:21	----

Bitmiş ürün ve yarımamul miktarının artması problemin karmaşıklığını artırmaktadır ve tam sayılı programlama tekniğiyle çözümü imkansız hâle getirmektedir. Aynı zamanda, global crossover işlemlerinin yapılmadığı durumlarda periyot sayısının artması da genetik algoritmayla çözümü zorlaştırmaktadır, ancak hem ilk atamanın yapıldığı sırada kodların tek taraflı şekilde dağıtılması hem de iyi bir çözümün tüm periyotlar için denenmesiyle büyük ölçekli modellerin çözümü genetik algoritma çözüm tekniğiyle mümkün hâle gelmiştir.

6.6 Senaryo Analizleri

Uygulamadaki veriler eklemeli üretim merkezlerinin kullanımının verimli olacağını göstermiştir. Alınabilecek farklı kararları görebilmek ve hangi seviyede modelin nasıl reaksiyon verebileceğini görebilmek açısından 4 farklı senaryo tasarlanmıştır.

6.6.1 Senaryo 1: Talebin azalması veya artması durumu

Talepteki değişiklikler tedarik zinciri tasarımına etki eden faktörlerden biridir. Hangi talep karşısında, nasıl bir planlama yapılması gerektiği araştırılmalıdır. Buna göre, örnek problem üzerinden talepteki değişikliğe göre hangi tesislerin ne ölçüde kullanılacağı ve birim maliyetlerin nasıl değiştiği Tablo 6.33’de gösterilmektedir. Haftalık 533 adetlik bitmiş ürün talebine kadar, yarımamul üretimi için 3 nolu eklemeli üretim merkezinde üretim yapılması tercih edilmiştir. Talebin burayı

geçmesi durumunda eklemeli üretim merkezi yerine 2 nolu üretim merkezi tercih edilmiş, makine/kalıp yatırımı yapılmaya başlanmış ve bununla beraber birim maliyetler azalmaya başlamıştır. Haftalık talep 17067 adet olduğu durumda, üretim merkezlerinin tamamına yatırım yapılmış ve talebi karşılamak adına, kapasitenin olduğu haftalarda stok oluşturulmaya başlanmıştır.

Tablo 6.33 Talebin azalması veya artması durumu

Haftalık talep	Parça başı maliyet (TL)	Eklemeli üretim merkezi (yarımamul üretimi)			Üretim merkezi (yarımamul üretimi)			Envanter
		1	2	3	1	2	3	
2	1,26	Kapalı	Kapalı	Açık	Kapalı	Kapalı	Kapalı	Yok
3	1,37	Kapalı	Kapalı	Açık	Kapalı	Kapalı	Kapalı	Yok
5	1,42	Kapalı	Kapalı	Açık	Kapalı	Kapalı	Kapalı	Yok
7	1,38	Kapalı	Kapalı	Açık	Kapalı	Kapalı	Kapalı	Yok
8	1,38	Kapalı	Kapalı	Açık	Kapalı	Kapalı	Kapalı	Yok
10	1,38	Kapalı	Kapalı	Açık	Kapalı	Kapalı	Kapalı	Yok
12	1,38	Kapalı	Kapalı	Açık	Kapalı	Kapalı	Kapalı	Yok
13	1,37	Kapalı	Kapalı	Açık	Kapalı	Kapalı	Kapalı	Yok
15	1,37	Kapalı	Kapalı	Açık	Kapalı	Kapalı	Kapalı	Yok
17	1,36	Kapalı	Kapalı	Açık	Kapalı	Kapalı	Kapalı	Yok
33	1,36	Kapalı	Kapalı	Açık	Kapalı	Kapalı	Kapalı	Yok
67	1,36	Kapalı	Kapalı	Açık	Kapalı	Kapalı	Kapalı	Yok
133	1,36	Kapalı	Kapalı	Açık	Kapalı	Kapalı	Kapalı	Yok
267	1,36	Kapalı	Kapalı	Açık	Kapalı	Kapalı	Kapalı	Yok
533	1,27	Kapalı	Kapalı	Açık	Kapalı	Açık	Kapalı	Yok
1067	0,98	Kapalı	Kapalı	Kapalı	Kapalı	Açık	Açık	Yok
2133	0,71	Kapalı	Kapalı	Kapalı	Kapalı	Açık	Açık	Yok
4267	0,58	Kapalı	Kapalı	Kapalı	Kapalı	Açık	Açık	Yok
8533	0,52	Kapalı	Kapalı	Kapalı	Kapalı	Açık	Açık	Yok
17067	0,55	Kapalı	Kapalı	Kapalı	Açık	Açık	Açık	Var
21333	0,60	Kapalı	Kapalı	Kapalı	Açık	Açık	Açık	Var

6.6.2 Senaryo 2: Tedarik zincirinden 3D yazıcıların çıkartılması durumu

Yarımamul üretimi aşamasında eklemeli üretim merkezlerinde 3D yazıcılardan faydanılmaması durumunda tedarik zincirinde mevcut opsiyonların nasıl değerlendirileceği araştırılmak istenmektedir. Bu durumda, yarımamuller 3 nolu tesiste üretilmiş, devamında bitmiş ürün üretimleri de yine 3 nolu üretim merkezinde tamamlanmıştır. Sonrasında üretilen ürünler 37 adetle 1 nolu

depolama merkezine, 16 adetle 2 nolu depolama merkezine, 19 adetle 3 nolu depolama merkezine taşınmıştır. Özet durum Tablo 6.34’de gösterilmektedir.

Tablo 6.34 Tedarik zincirinde eklemeli üretim merkezlerinin olmadığı durum

Haftalık talep	Parça başı maliyet (TL)	Eklemeli üretim tesisleri (yarımamul üretimi)			Üretim tesisleri (yarımamul üretimi)			Üretim tesisleri (bitmiş ürün üretimi)		
		1	2	3	1	2	3	1	2	3
12	24,99	Kapalı	Kapalı	Kapalı	Kapalı	Kapalı	Açık	Kapalı	Kapalı	Açık
12	1,41	Kapalı	Kapalı	Açık	Kapalı	Kapalı	Kapalı	Kapalı	Açık	Açık

6.6.3 Senaryo 3: Üretim merkezlerine 3D yazıcı satın alınması durumu

Örnek problemde, anlaşma yapılmış eklemeli üretim merkezlerindeki 3D yazıcılardan yararlanılarak yarımamul üretimi yapılabilmekteydi. Şirket bu durumda kendi tesislerinde 3D boyutlu yazıcı yatırımı yapmadan, parça başı ödeme yaparak ihtiyacı olan yarımamulu eklemeli üretim merkezlerinden temin edebiliyordu. Eklemeli üretim merkezleri yerine şirketin üretim merkezlerinde 3D yazıcı yatırımı yaparak istenilen parçaların üretilmesinin toplam maliyetlere ve tedarik zincirine olan etkisi araştırılmak istenmektedir. Mesafe, makine yatırım, işçilik, kapasite verileri güncellenmiştir. Buna göre, 3D yazıcılar üretim merkezleri bünyesinde olacağından mesafeleri üretim merkezlerinin mesafelerine göre ayarlanmıştır. Braket ve tutucu üretimi için gerekli olan SLS 3D yazıcı yatırım maliyeti 6 hafta için 6500 TL/makine, işçilik bulunduğu tesisteki işçilik maliyetiyle aynı ve makine kapasitesi 24 saat/gün kabul edilmiştir. Bu durumda, oluşan maliyetlerin mevcut durumla kıyaslaması Tablo 6.35’de gösterilmektedir.

Tablo 6.35 Üretim merkezlerine 3D yatırımı yapılması durumu

Haftalık talep	Parça başı maliyet (TL)	Üretim tesislerinde 3D yazıcı yatırımı durumu (yarımamul üretimi)			Üretim tesisleri (yarımamul üretimi)			Üretim tesisleri (bitmiş ürün üretimi)		
		1	2	3	1	2	3	1	2	3
12	24,99	Kapalı	Kapalı	Kapalı	Kapalı	Kapalı	Açık	Kapalı	Kapalı	Açık
12	25,40	Kapalı	Kapalı	Açık	Kapalı	Kapalı	Kapalı	Kapalı	Açık	Açık

Ölçek ekonomisi avantajından yararlanılamadığı için maliyetlerin arttığı gözlemlenmiştir. Eklemeli üretim merkezlerinde birden fazla makineyle ilgilenen çalışanlar ve 3D yazıcıların uygun fiyatlara temin edilmesi veya 3D yazıcı imalatının

işletmenin kendi kaynakları kullanılarak çok daha ucuza sağlanması en büyük faktörlerdendir.

6.6.4 Senaryo 4: Farklı filament çeşitleriyle üretim yapılması durumu

Yarımamul üretimi sırasında farklı malzemenin kullanılması birim maliyeti etkileyecektir. Buna göre, 5 farklı tipteki malzemenin farklı taleplerde, maliyetler ve yatırım kararları üzerinde nasıl bir etki yaratacağı araştırılmak istenmiştir. Buna göre, sonuçlar Tablo 6.36'da gösterilmektedir.

Tablo 6.36 Farklı filamentlerin kullanılması durumu

Haftalık talep	Filament Türü	Maliyet (TL/g)	Parça başı maliyet (TL)	Eklemeli üretim tesisleri (yarımamul üretimi)			Üretim tesisleri (yarımamul üretimi)		
				1	2	3	1	2	3
12	PLA	0,20	26,53	Kapalı	Kapalı	Açık	Kapalı	Kapalı	Kapalı
12	PETG	0,28	31,79	Kapalı	Kapalı	Açık	Kapalı	Kapalı	Kapalı
12	ASA	0,30	33,11	Kapalı	Kapalı	Açık	Kapalı	Kapalı	Kapalı
12	Nylon	0,76	63,36	Kapalı	Kapalı	Açık	Kapalı	Kapalı	Kapalı
12	Polycarbonate	0,76	63,36	Kapalı	Kapalı	Açık	Kapalı	Kapalı	Kapalı
12	Metal	1,24	94,93	Kapalı	Kapalı	Açık	Kapalı	Kapalı	Kapalı
24	PLA	0,20	26,53	Kapalı	Kapalı	Açık	Kapalı	Kapalı	Kapalı
24	PETG	0,28	31,79	Kapalı	Kapalı	Açık	Kapalı	Kapalı	Kapalı
24	ASA	0,30	33,11	Kapalı	Kapalı	Açık	Kapalı	Kapalı	Kapalı
24	Nylon	0,76	63,36	Kapalı	Kapalı	Açık	Kapalı	Kapalı	Kapalı
24	Polycarbonate	0,76	63,36	Kapalı	Kapalı	Açık	Kapalı	Kapalı	Kapalı
24	Metal	1,24	94,93	Kapalı	Kapalı	Açık	Kapalı	Kapalı	Kapalı
36	PLA	0,20	26,54	Kapalı	Kapalı	Açık	Kapalı	Kapalı	Kapalı
36	PETG	0,28	31,80	Kapalı	Kapalı	Açık	Kapalı	Kapalı	Kapalı
36	ASA	0,30	33,11	Kapalı	Kapalı	Açık	Kapalı	Kapalı	Kapalı
36	Nylon	0,76	63,37	Kapalı	Kapalı	Açık	Kapalı	Kapalı	Kapalı
36	Polycarbonate	0,76	63,37	Kapalı	Kapalı	Açık	Kapalı	Kapalı	Kapalı
36	Metal	1,24	85,17	Kapalı	Kapalı	Kapalı	Kapalı	Kapalı	Açık

Verilere göre, plastik türü malzemeler için sonuçta herhangi bir değişiklik olmazken, metal malzemelerin haftalık talebi 36 adede ulaştığında 3D yazıcılarda üretimi yerine geleneksel imalat teknikleriyle üretilmesinin daha uygun olabileceği görülmektedir.

Tez çalışması kapsamında, otomotiv yedek parça tedarik zincirinin kompleksitesinin zamana bağlı olarak değişimi, yeni nesil mobilite anlayışları incelenerek tahmin edilmeye çalışılmıştır. Araçlar motor türlerine göre 3 alt başlıkta, kullanım türlerine göre 5 alt başlıkta, bağlantı türlerine 5 alt başlıkta ve iş modellerine göre 4 alt başlıkta değerlendirildiğinde toplamda 300 farklı mobilite çeşidinin ortaya çıkacağı öngörülmektedir. Bu çeşitlilik içerisinde her marka ve modelin de farklı tasarımlara sahip olacağı göz önünde bulundurulmalıdır. Müşterilerin de artık kendi isteklerine göre araçlarını özelleştirmeye başlamalarından dolayı bu çeşitlilik çok daha büyük boyutlara ulaşacaktır.

Artan araç çeşitliliği beraberinde parça-yedek parça çeşitliliğinin de artmasına sebep olacaktır. Toplam talep artsa dâhi artan çeşitlilikle ters orantılı bir şekilde parça başına talebin azalması öngörülmektedir. Düşük hacimli talebi karşılamak adına, bu yapıya uygun üretim teknikleri araştırılmıştır. Prototip aşamasında kullanılan eklemeli üretim tekniği, yedek parça üretiminde ve tedarik zinciri entegrasyonunda da bir seçenek olarak düşünülmelidir. Buna göre, tez çalışmasında, eklemeli üretim tekniklerine değinilmiş ve bu yöntemlerle üretilen otomotiv parçaları araştırılmıştır. Endüstriyel 3D yazıcıların teknik olarak pres, plastik enjeksiyon gibi geleneksel üretim tekniklerini ikame edebilecek kapasiteye sahip olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Bununla beraber, endüstriyel 3D yazıcıların maliyetleri, malzeme (filament) maliyetleri ve yetişmiş işgücünün kısa vadede bulunamaması gibi dezavantajları da olabilmektedir. Üretimi yapılması planlanan parçalar, geleneksel üretim teknikleriyle üretilirken yoğun miktarda malzeme firesi çıkabilir, işçilik gereksinimi yüksek olabilir, ağırlıkları nedeniyle tasarım zorluklarına yol açabilirler ve iş kazası riski yükselebilir. Eklemeli üretim tekniğiyle, uygun bir tasarımla, hammadde kullanımı azaltılabilir, birden fazla makineyle ilgilenen çalışanlar sayesinde işgücü verimliliği artırılabilir. Ürünün tasarımı elektronik ortamda paylaşıldığı takdirde, dünyanın her yerinde istenilen

parça üretilebilir ve taşıma maliyetleri büyük oranda düşürülebilir. Otomobillerin geliştirilmesi ve proje planlaması sırasında parçaların eklemeli üretim tekniğiyle üretilebilir olması için de bir plan ortaya konulması, yedek parça üretimine geçildiğinde büyük kolaylık sağlayacaktır.

Yedek parça tedarik zinciri model çalışmasında; yüksek çeşitlilik ve düşük talep yapısına uygun; eklemeli üretim merkezleri, geleneksel üretim merkezleri, depolama merkezleri ve dağıtım merkezlerinin bulunduğu bir ağ yapısı önerilmiştir. Matematiksel modelleme ile üretim, taşıma, depolama ve yatırım maliyetlerinin toplamının minimize edilmesi amaçlanmıştır.

Model tamsayılı programlama ile Lingo 9.0'da kodlanmıştır, kodlama işlemine paralel bir şekilde sahadan elde edilen verilerle sayısal uygulama gerçekleştirilmiştir. Fiziksel olarak küçük boyutlarda ve plastik yapıdaki parçalarla yapılan analizler sonucunda elde edilen verilere göre, tedarik zincirinde düşük hacimli üretimlerde 3 boyutlu yazıcıların kullanımının geleneksel üretim tekniklerinin kullanımına göre daha etkin olduğu, daha düşük maliyetlerle operasyonların yürütülebileceği sonucuna ulaşılmıştır.

Tedarik zinciri ve model büyüdükçe, ürün çeşidi ve talep arttıkça tamsayılı programlama ile çözümün mümkün olmadığı tespit edilmiştir. Heuristik çözüm tekniklerinden genetik algoritma, arz ve talebin birbirine eşit olmadığı, birden fazla periyotlu, bitmiş ürünlü, yarımamullü, çok aşamalı ve yatırım kararı da içeren tedarik zinciri modeline uygun bir şekilde Matlab üzerinde kodlanarak geliştirilmiştir. Geliştirme sırasında optimum sonuca yakın sonuç veren, özgün crossover ve mutasyon seçeneklerine sahip çözüm algoritması elde edilmiştir ve problemlerin çözümünde bu algoritma kullanılmıştır. Bu sayede, tam sayılı programlama ile çözülemeyen boyuttaki tedarik zinciri problemleri için de çözüm metodu tanımlanmıştır.

Senaryo analizleriyle, modelde yer alan parametrelerde meydana gelen değişikliklerin sonuca etkisi araştırılmıştır. Bitmiş ürünün talebinin belli bir seviyeyi geçmesi durumunda 3 boyutlu yazıcıların maliyet avantajını yitirdiği görülmüştür. Eklemeli üretim tesislerinin tamamıyla tedarik zincirinden çıkartılması ise maliyetleri artırmıştır. Eklemeli üretim merkezlerinden parça

sipariş etmek yerine parçaların üretimi için 3 boyutlu yazıcı yatırımı yapmak ölçek ekonomisinden uzaklaştırdığından, tedarik zinciri içerisinde avantaj oluşturmamıştır. Kullanılan malzeme türleri ve talep birlikte değerlendirildiğinde, pahalı malzemelerin, yüksek miktarlarda, geleneksel imalat teknikleriyle üretiminin toplamda daha az maliyet oluşturacağı tespit edilmiştir. Buna göre, üretilmesi istenen parçanın boyutu ve tasarımı, kullanılan malzeme tipi ve talep bilgisi, eklemeli üretim merkezlerinin tedarik zincirine olan entegrasyonundaki en büyük belirleyicilerdir.

İlerleyen yıllarda eklemeli üretim tekniklerinin gelişmesi ve ucuzlamasıyla, ihtiyaç duyulan endüstriyel yazıcılar araç bakım ve onarımlarının yapıldığı servislere entegre edilebilir ve yedek parça üretimi ihtiyacın olduğu yerde ve zamanda gerçekleştirilebilir. Buna ek olarak, araçlardan sağlanacak olan performans bilgileri sayesinde hangi parçanın ne zaman değiştirilmesi gerektiği bilgisi yedek parça tedarik zinciri için katma değer yaratacaktır.

Bundan sonraki çalışmalarda, matematiksel modele birden fazla amaç fonksiyonu eklenebilir. Daha çevreci, daha yüksek müşteri memnuniyeti ve daha yüksek performans hedefleriyle beraber daha düşük operasyon maliyetini sağlayacak bir tedarik zinciri için yeniden tasarım yapılabilir.

Tamsayılı programlama, genetik algoritma gibi çözüm yöntemlerine ek olarak, tez çalışmasında değinilen, fizik temelli algoritmalar ve sürü zekâsı algoritmaları birlikte veya tek başlarına kullanılarak alternatif çözüm teknikleri geliştirmek ve tüm bunların performanslarını karşılaştırmak mümkün olabilir.

Otomotiv parçalarının hangilerinin, hangi endüstriyel yazıcılarla, hangi filamentlerle ve hangi üretim koşullarında üretilbileceğini tanımlamak, parça muayene yöntemlerini belirlemek için yapılacak çalışmalar da oldukça değerli olacaktır. Bununla beraber, eklemeli üretim merkezlerinde üretilen parçaların uygunluğunu garanti altına alabilecek bir kalite sistemi tasarımı yapılabilir ve anasanayi ile parça üreticileri için spesifikasyonlar tanımlanabilir.

Otomotiv sektöründeki gelişmelere bağlı olarak, elektrikli araçların sayısındaki artışla beraber, mekanik sistemlere olan ihtiyaç sayısı göreceli olarak azalabilir.

Elektronik sistemlerin, yazılımların ve batarya teknolojilerinin önplana çıkmasıyla, endüstriyel yazıcılarla üretilebilecek parça sayısı azalabilir. Değişime uyum sağlamak ve performansı artırmak alternatif çözümleri sağlayacak endüstriyel yazıcıların geliştirilmesi tedarik zincirinde esnekliği artıracaktır.

Endüstriyel yazıcılarla parça üretimde tasarım, kullanılan malzeme, kalite ve beklenen performans oldukça önemlidir. Kodlama sisteminde optimizasyon çalışmalarıyla tüm bu bileşenlerde sağlanacak iyileştirmeler katma değeri artışı sağlayacaktır.

Tüm bunlara ek olarak, sadece otomotiv sektörü için değil, uzay ve havacılıkta, savunma sanayinde, kimya endüstrisinde ve diğer alanlarda faaliyet gösteren işletmelerin proseslerinde yer alan makine yedek parçalarının üretiminde veya bitmiş ürün üretimlerinde endüstriyel yazıcıların kullanımı araştırılabilir, üretim ve dağıtım sistemleri tasarlanabilir.

- [1] S. Yilmaz, K. Taştan, N. Ecek, and E. Çınar, "Otomotiv Sektörünün Dünyadaki ve Türkiye'deki Değişimi - Change of the Automotiv Sector in the World and in Turkey" *Ordu Üniversitesi Sos. Bilim. Araştırmaları Derg.*, vol. 7, pp. 685–695, 2017.
- [2] "2017 Statistics | OICA." [Online]. Available: <http://www.oica.net/category/production-statistics/2017-statistics/>. [Accessed: 15-Sep-2018].
- [3] "Number of vehicles in use worldwide 2015 | Statistic." [Online]. Available: <https://www.statista.com/statistics/281134/number-of-vehicles-in-use-worldwide/>. [Accessed: 15-Sep-2018].
- [4] T. Otomotiv, S. Rekabet, and T. Dinamikleri, "Otomotiv Sektör Raporu Sercan Pişkin" 2017.
- [5] "Automotive Revolution & Perspective Towards 2030" *Auto Tech Rev.*, vol. 5, no. 4, pp. 20–25, 2016.
- [6] Strategy&, "The 2019 Strategy& Digital Auto Report Time to get real: opportunities in a transforming market" *PwC*, p. 36, 2019.
- [7] Y. Furuncu, "Küresel otomotiv sektörünün değişimi ve yerli otomobil projesinin geleceği" 2019.
- [8] "CAAT." [Online]. Available: http://autocaat.org/Technologies/Automated_and_Connected_Vehicles/. [Accessed: 14-Oct-2020].
- [9] M. A. Cohen and N. Agrawal, "Winning in the Aftermarket," *Harv. Bus. Rev.*, vol. 84, pp. 129–138, 2006.
- [10] B. Gangula, P. Illinda, and C. A. Giffi, "3D opportunity in the automotive industry" *Deloitte Univ. Press*, 2014.
- [11] T. Wahlström and J. Sahlström, "Additive Manufacturing in Production: For the Automotive Industry" pp. 20–40, 2016.
- [12] "FDM çalışma tezgahı örneği." [Online]. Available: <https://www.3dnatives.com/en/best-large-fdm-3dprinters-2019-100120194/#!> [Accessed: 17-Oct-2020].
- [13] "SLA 3D yazıcı." [Online]. Available: <https://filament2print.com/gb/3d-printers/867-form-2-formlabs-3d-printer.html>. [Accessed: 17-Oct-2020].
- [14] "SLA yazıcı ile üretilmiş parça örneği." [Online]. Available: <https://www.tctmagazine.com/blogs/guest-column/lets-be-clear-this-isnt-just-sla-3D-printing/>. [Accessed: 17-Oct-2020].
- [15] "SLS printers." [Online]. Available: <https://geomiiq.com/selective-laser-sintering-sls/>. [Accessed: 17-Oct-2020].

- [16] “Hidrolik blok.” [Online]. Available: <https://www.gknpm.com/en/our-businesses/gkn-additive/am-in-action/redesigning-hydraulic-blocks-in-additive-manufacturing/>. [Accessed: 17-Oct-2020].
- [17] “EBM teknolojisi.” [Online]. Available: <https://www.formadditive.com/urun/24/q20-plus>. [Accessed: 17-Oct-2020].
- [18] “EBM teknolojisiyle üretilmiş jant.” [Online]. Available: <https://www.cnet.com/roadshow/news/hre-3d-printed-titanium-wheels-concepts/>. [Accessed: 17-Oct-2020].
- [19] “SLM prosesi.” [Online]. Available: <https://infotron.com.tr/slm-solutions/>. [Accessed: 17-Oct-2020].
- [20] “SLM teknolojisiyle üretilmiş fren kaliperi.” [Online]. Available: <https://additivenews.com/slm-solutions-bugatti-avant-garde-3d-printing-automotive/>. [Accessed: 17-Oct-2020].
- [21] D. G. Schniederjans, C. Curado, and M. Khalajhedayati, “International Journal of Production Economics Supply chain digitisation trends : An integration of knowledge management” *Intern. J. Prod. Econ.*, no. June, p. 107439, 2019.
- [22] B. Berman, F. G. Zarb, and W. Hall, “3-D printing: The new industrial revolution” *Bus. Horiz.*, vol. 55, no. 2, pp. 155–162, 2012.
- [23] S. H. Khajavi, J. Partanen, and J. Holmstro, “Computers in Industry Additive manufacturing in the spare parts supply chain” vol. 65, pp. 50–63, 2014.
- [24] A. Barz, T. Buer, and H. Haasis, “Study on the Effects of Additive Manufacturing on the Structure of Supply” *IFAC-PapersOnLine*, vol. 49, no. 2, pp. 72–77, 2016.
- [25] B. Fahimnia, H. Davarzani, and A. Eshragh, “Computers and Operations Research Planning of complex supply chains : A performance comparison of three meta-heuristic algorithms” *Comput. Oper. Res.*, vol. 89, pp. 241–252, 2018.
- [26] W. C. Yeh, “An efficient memetic algorithm for the multi-stage supply chain network problem” *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 29, no. 7–8, pp. 803–813, 2006.
- [27] G. A. Vignaux and Z. Michalewicz, “A Genetic Algorithm for the Linear Transportation Problem” *IEEE Trans. Syst. Man Cybern.*, vol. 21, no. 2, pp. 445–452, 1991.
- [28] F. Altiparmak, M. Gen, L. Lin, and T. Paksoy, “A genetic algorithm approach for multi-objective optimization of supply chain networks” *Comput. Ind. Eng.*, vol. 51, no. 1, pp. 196–215, 2006.
- [29] F. Altiparmak, M. Gen, L. Lin, and I. Karaoglan, “A steady-state genetic algorithm for multi-product supply chain network design” *Comput. Ind. Eng.*, vol. 56, no. 2, pp. 521–537, 2009.
- [30] M. M. Lotfi and R. Tavakkoli-Moghaddam, “A genetic algorithm using priority-based encoding with new operators for fixed charge transportation problems” *Appl. Soft Comput. J.*, vol. 13, no. 5, pp. 2711–2726, 2013.

- [31] K. Devika, A. Jafarian, and V. Nourbakhsh, "Designing a sustainable closed-loop supply chain network based on triple bottom line approach: A comparison of metaheuristics hybridization techniques" *Eur. J. Oper. Res.*, vol. 235, no. 3, pp. 594–615, 2014.
- [32] S. A. Ghasimi, R. Ramli, and N. Saibani, "A genetic algorithm for optimizing defective goods supply chain costs using JIT logistics and each-cycle lengths" *Appl. Math. Model.*, vol. 38, no. 4, pp. 1534–1547, 2014.
- [33] M. H. Gorji, M. Setak, and H. Karimi, "Optimizing inventory decisions in a two-level supply chain with order quantity constraints" *Appl. Math. Model.*, vol. 38, no. 3, pp. 814–827, 2014.
- [34] A. Diabat, "Hybrid algorithm for a vendor managed inventory system in a two-echelon supply chain" *Eur. J. Oper. Res.*, vol. 238, no. 1, pp. 114–121, 2014.
- [35] G. R. Nasiri, R. Zolfaghari, and H. Davoudpour, "An integrated supply chain production-distribution planning with stochastic demands" *Comput. Ind. Eng.*, vol. 77, pp. 35–45, 2014.
- [36] H. Erbiyik and M. Saru, "Six Sigma Implementations in Supply Chain: An Application for an Automotive Subsidiary Industry in Bursa in Turkey" *Procedia - Soc. Behav. Sci.*, vol. 195, pp. 2556–2565, 2015.
- [37] A. J. Abraham, K. R. Kumar, R. Sridharan, and D. Singh, "A Genetic Algorithm Approach for Integrated Production and Distribution Problem" *Procedia - Soc. Behav. Sci.*, vol. 189, pp. 184–192, 2015.
- [38] M. Eskandarpour, P. Dejax, J. Miemczyk, and O. Péton, "Sustainable supply chain network design: An optimization-oriented review" *Omega (United Kingdom)*, vol. 54, pp. 11–32, 2015.
- [39] S. Khalifehzadeh, M. Seifbarghy, and B. Naderi, "A four-echelon supply chain network design with shortage: Mathematical modeling and solution methods" *J. Manuf. Syst.*, vol. 35, pp. 164–175, 2015.
- [40] D. Çelebi, "Inventory control in a centralized distribution network using genetic algorithms: A case study" *Comput. Ind. Eng.*, vol. 87, pp. 532–539, 2015.
- [41] A. Roozbeh Nia, M. Hemmati Far, and S. T. A. Niaki, "A hybrid genetic and imperialist competitive algorithm for green vendor managed inventory of multi-item multi-constraint EOQ model under shortage" *Appl. Soft Comput. J.*, vol. 30, pp. 353–364, 2015.
- [42] D. Li and A. Nagurney, "Int. J. Production Economics A general multitiered supply chain network model of quality competition with suppliers" *Intern. J. F. Prod. Econ.*, vol. 170, pp. 336–356, 2015.
- [43] Z. Alizadeh Afrouzy, S. H. Nasser, and I. Mahdavi, "A genetic algorithm for supply chain configuration with new product development" *Comput. Ind. Eng.*, vol. 101, pp. 440–454, 2016.
- [44] M. C. Pires and E. M. Frazzon, "On the research of linear programming solving methods for non-hierarchical spare parts supply chain planning" *IFAC-*

- PapersOnLine*, vol. 49, no. 30, pp. 198–203, 2016.
- [45] M. Huang, P. Yi, L. Guo, and T. Shi, “A Modal Interval Based Genetic Algorithm for Closed-loop Supply Chain Network Design under Uncertainty” *IFAC-PapersOnLine*, vol. 49, no. 12, pp. 616–621, 2016.
 - [46] S. A. Masoud and S. J. Mason, “Integrated cost optimization in a two-stage, automotive supply chain” *Comput. Oper. Res.*, vol. 67, pp. 1–11, 2016.
 - [47] J. O. Robles, S. D. L. Almaraz, and C. Azzaro-Pantel, “*Optimization of a HydrogenF Supply Chain Network Design by Multi-Objective Genetic Algorithms*” vol. 38. Elsevier Masson SAS, 2016.
 - [48] A. Diabat and R. Deskoors, “A hybrid genetic algorithm based heuristic for an integrated supply chain problem” *J. Manuf. Syst.*, vol. 38, pp. 172–180, 2016.
 - [49] E. Ardjmand, W. A. Young, G. R. Weckman, O. S. Bajgiran, B. Aminipour, and N. Park, “Applying genetic algorithm to a new bi-objective stochastic model for transportation, location, and allocation of hazardous materials” *Expert Syst.F Appl.*, vol. 51, pp. 49–58, 2016.
 - [50] L. L. Zhang, C. Lee, and S. Zhang, “An integrated model for strategic supply chain design: Formulation and ABC-based solution approach” *Expert Syst.F Appl.*, vol. 52, pp. 39–49, 2016.
 - [51] A. Hiassat, A. Diabat, and I. Rahwan, “A genetic algorithm approach for location-inventory-routing problem with perishable products” *J. Manuf. Syst.*, vol. 42, pp. 93–103, 2017.
 - [52] Ö. F. Yilmaz and P. M. Pardalos, “Minimizing average lead time for the coordinated scheduling problem in a two-stage supply chain with multiple customers and multiple manufacturers” *Comput. Ind. Eng.*, vol. 114, no. February, pp. 244–257, 2017.
 - [53] Y. Y. Cui, Z. Guan, U. Saif, L. Zhang, F. Zhang, and J. Mirza, “Close loop supply chain network problem with uncertainty in demand and returned products: Genetic artificial bee colony algorithm approach” *J. Clean. Prod.*, vol. 162, pp. 717–742, 2017.
 - [54] A. Dolgui, D. Ivanov, S. Sethi, and B. Sokolov, “Control Theory Applications To Operations Systems, Supply Chain Management and Industry 4.0 Networks” *IFAC-PapersOnLine*, vol. 51, no. 11, pp. 1536–1541, 2018.
 - [55] J. Monostori, “Supply chains robustness: Challenges and opportunities” *Procedia CIRP*, vol. 67, pp. 110–115, 2018.
 - [56] A. Saghaeian and R. Ramezani, “An efficient hybrid genetic algorithm for multi-product competitive supply chain network design with price-dependent demand” *Appl. Soft Comput. J.*, vol. 71, pp. 872–893, 2018.
 - [57] Z. Dai, F. Aqlan, X. Zheng, and K. Gao, “A location-inventory supply chain network model using two heuristic algorithms for perishable products with fuzzy constraints” *Comput. Ind. Eng.*, vol. 119, no. May 2017, pp. 338–352, 2018.
 - [58] I. S. Doolun, S. G. Ponnambalam, N. Subramanian, and G. Kanagaraj, “Data

- driven hybrid evolutionary analytical approach for multi objective location allocation decisions: Automotive green supply chain empirical evidence” *Comput. Oper. Res.*, vol. 98, pp. 265–283, 2018.
- [59] K. Jagan Mohan Reddy, A. Neelakanteswara Rao, and L. Krishnanand, “A review on supply chain performance measurement systems” *Procedia Manuf.*, vol. 30, pp. 40–47, 2019.
 - [60] A. S. Saif-Eddine, M. M. El-Beheiry, and A. K. El-Kharbotly, “An improved genetic algorithm for optimizing total supply chain cost in inventory location routing problem” *Ain Shams Eng. J.*, vol. 10, no. 1, pp. 63–76, 2019.
 - [61] M. Tamannaie and M. Rasti-Barzoki, “Mathematical programming and solution approaches for minimizing tardiness and transportation costs in the supply chain scheduling problem” *Comput. Ind. Eng.*, vol. 127, no. June 2017, pp. 643–656, 2019.
 - [62] N. I. Saragih, S. N. Bahagia, Suprayogi, and I. Syabri, “A heuristic method for location-inventory-routing problem in a three-echelon supply chain system” *Comput. Ind. Eng.*, vol. 127, no. November 2017, pp. 875–886, 2019.
 - [63] M. Setak, F. Feizizadeh, H. Tikani, and E. S. Ardakani, “A bi-level stochastic optimization model for reliable supply chain in competitive environments: Hybridizing exact method and genetic algorithm” *Appl. Math. Model.*, vol. 75, pp. 310–332, 2019.
 - [64] K. Govindan, A. Jafarian, and V. Nourbakhsh, “Designing a sustainable supply chain network integrated with vehicle routing: A comparison of hybrid swarm intelligence metaheuristics” *Comput. Oper. Res.*, vol. 110, pp. 220–235, 2019.
 - [65] S. Khalifehzadeh, M. B. Fakhrazad, Y. Zare Mehrjerdi, and H. Hosseini_Nasab, “Two effective metaheuristic algorithms for solving a stochastic optimization model of a multi-echelon supply chain” *Appl. Soft Comput. J.*, vol. 76, pp. 545–563, 2019.
 - [66] A. Abdi, A. Abdi, N. Akbarpour, A. Salehi, and M. Hajiaghahi-keshteli, “Innovative approaches to design and address green supply chain network with simultaneous pick-up and split delivery” *J. Clean. Prod.*, p. 119437, 2019.
 - [67] S. Rajendran and A. Ravi Ravindran, “Inventory management of platelets along blood supply chain to minimize wastage and shortage” *Comput. Ind. Eng.*, vol. 130, no. March, pp. 714–730, 2019.
 - [68] S. M. Mousavi, P. M. Pardalos, S. T. A. Niaki, A. Fügenschuh, and M. Fathi, “Solving a continuous periodic review inventory-location allocation problem in vendor-buyer supply chain under uncertainty” *Comput. Ind. Eng.*, vol. 128, no. December 2018, pp. 541–552, 2019.
 - [69] A. Shoja, S. Molla-Alizadeh-Zavardehi, and S. Niroomand, “Adaptive meta-heuristic algorithms for flexible supply chain network design problem with different delivery modes” *Comput. Ind. Eng.*, vol. 138, no. December 2018, p. 106107, 2019.

- [70] S. Bag, L. C. Wood, L. Xu, P. Dhamija, and Y. Kayikci, "Resources , Conservation & Recycling Big data analytics as an operational excellence approach to enhance sustainable supply chain performance" *Resour. Conserv. Recycl.*, vol. 153, no. November 2019, p. 104559, 2020.
- [71] N. Syam and A. Sharma, "Waiting for a sales renaissance in the fourth industrial revolution : Machine learning and artificial intelligence in sales research and practice" *Ind. Mark. Manag.*, vol. 69, no. November 2017, pp. 135–146, 2018.
- [72] G. Baryannis, S. Dani, and G. Antoniou, "Predicting supply chain risks using machine learning : The trade-off between performance and interpretability" *Futur. Gener. Comput. Syst.*, vol. 101, pp. 993–1004, 2019.
- [73] A. A. C. Vieira, L. M. S. Dias, M. Y. Santos, G. A. B. Pereira, and J. A. Oliveira, "Computers & Industrial Engineering Simulation of an automotive supply chain using big data" *Comput. Ind. Eng.*, vol. 137, no. August, p. 106033, 2019.
- [74] S. Piramuthu, "Machine learning for dynamic multi-product supply chain formation" vol. 29, pp. 985–990, 2005.
- [75] R. Carbonneau, K. Laframboise, and R. Vahidov, "Application of machine learning techniques for supply chain demand forecasting" vol. 184, pp. 1140–1154, 2008.
- [76] L. Turrini and J. Meissner, "PT US CR" *Eur. J. Oper. Res.*, 2017.
- [77] D. Lengu, A. A. Syntetos, and M. Z. Babai, "Spare parts management : Linking distributional assumptions to demand classification" *Eur. J. Oper. Res.*, vol. 235, no. 3, pp. 624–635, 2014.
- [78] A. Diabat, T. Abdallah, and A. Henschel, "Computers & Operations Research A closed-loop location-inventory problem with spare parts consideration" *Comput. Oper. Res.*, vol. 54, pp. 245–256, 2015.
- [79] H. Zhijie, Z. Qian, L. Shenyang, and Z. Chen, "Research on Forecast Model of Spare Parts Consumption" *Procedia Eng.*, vol. 174, pp. 700–705, 2017.
- [80] C. Feldmann and A. Pumpe, "A holistic decision framework for 3D printing investments in framework global supply chains" *Transp. Res. Procedia*, vol. 25, pp. 677–694, 2017.
- [81] J. Holmström, J. Partanen, J. Tuomi, and M. Walter, "Rapid manufacturing in the spare parts supply chain: Alternative approaches to capacity deployment" *J. Manuf. Technol. Manag.*, vol. 21, no. 6, pp. 687–697, 2010.
- [82] L. Zhikang, "Research on Development Strategy of Automobile Reverse Logistics Based on SWOT Analysis" *Procedia Eng.*, vol. 174, pp. 324–330, 2017.
- [83] S. Chekurov, "Additive manufacturing in offsite repair of consumer electronics" vol. 89, pp. 23–30, 2017.
- [84] R. J. I. Basten and G. J. Van Houtum, "Surveys in Operations Research and Management Science System-oriented inventory models for spare parts" *Surv. Oper. Res. Manag. Sci.*, vol. 19, no. 1, pp. 34–55, 2014.

- [85] A. Molenaers, H. Baets, L. Pintelon, and G. Waeyenbergh, "Int . J . Production Economics Criticality classification of spare parts : A case study" *Intern. J.F Prod. Econ.*, vol. 140, no. 2, pp. 570–578, 2012.
- [86] D. Zahurul, J. F. Meier, P. T. Aditjandra, T. H. Zunder, and G. Pace, "Research in Transportation Economics Logistics and supply chain management" *Res.F Transp. Econ.*, vol. 41, no. 1, pp. 3–16, 2013.
- [87] J. Kurilova-palisaitiene, E. Sundin, and B. Poksinska, "Remanufacturing challenges and possible lean improvements" *J. Clean. Prod.*, vol. 172, pp. 3225–3236, 2018.
- [88] U. Dombrowski and S. Fochler, "Impact of Service Transition on After Sales Service structures of manufacturing companies" *Procedia CIRP*, vol. 64, pp. 133–138, 2017.
- [89] O. Lavastre, A. Gunasekaran, and A. Spalanzani, "Supply chain risk management in French companies" *Decis. Support Syst.*, vol. 52, no. 4, pp. 828–838, 2012.
- [90] D. Espíndola, E. M. Frazzon, B. Hellingrath, and C. E. Pereira, "Integrating Intelligent Maintenance Systems and Spare Parts Supply Chains" pp. 1017–1022, 2012.
- [91] A. Sleptchenko, A. Al, and H. Zijm, "Joint planning of service engineers and spare parts" *Eur. J. Oper. Res.*, vol. 271, no. 1, pp. 97–108, 2018.
- [92] M. Wu, Y. Hsu, and L. Huang, "Expert Systems with Applications An integrated approach to the design and operation for spare parts logistic systems" *Expert Syst. Appl.*, vol. 38, no. 4, pp. 2990–2997, 2011.
- [93] M. Grieger, "Electronic marketplaces : A literature review and a call for supply chain management research" vol. 144, pp. 280–294, 2003.
- [94] J. Q. F. Neto, "A methodology for assessing eco-efficiency in logistics networks" *Eur. J. Oper. Res.*, vol. 193, no. 3, pp. 670–682, 2009.
- [95] Y. Tang, Y. Hu, Y. Liu, and J. Wen, "Research on the spare parts inventory control for agriculture inter-district A new methodology to analyze the operation functional and physical architecture of field existing products for an assembly oriented product family ide" *Procedia CIRP*, vol. 73, pp. 278–283, 2018.
- [96] J. Zhang, B. Yang, and M. Chen, "Challenges of the development for automotive parts remanufacturing in China" *J. Clean. Prod.*, vol. 140, no. 800, pp. 1087–1094, 2017.
- [97] M. Wu and Y. Hsu, "Design of BOM configuration for reducing spare parts logistic costs" vol. 34, pp. 2417–2423, 2008.
- [98] B. Hellingrath and A. Cordes, "Approach for Integrating Condition Monitoring Information and Forecasting Methods to Enhance Spare Parts Supply Chain Planning" vol. 46, no. 7. *IFAC*, 2013.

- [99] R. Subramoniam, D. Huisingh, and R. Babu, "Aftermarket remanufacturing strategic planning decision-making framework : theory & practice" *J. Clean.F Prod.*, vol. 18, no. 16–17, pp. 1575–1586, 2010.
- [100] C. Forster, M. Zapp, J. Aelker, E. Westkämper, and T. Bauernhansl, "Collaborative value chain management between automotive and semiconductor industry: an analysis of differences and improvement measures" *Procedia CIRP*, vol. 12, pp. 312–317, 2013.
- [101] K. Hedvall, A. Dubois, and F. Lind, "Industrial Marketing Management Analysing an activity in context : A case study of the conditions for vehicle maintenance" *Ind. Mark. Manag.*, vol. 58, pp. 69–82, 2016.
- [102] J. Ferreira, "Parts Life Cycle Activities on Automotive Industry" pp. 471–474, 2007.
- [103] A. Bacchetti and N. Sacconi, "Spare parts classification and demand forecasting for stock control : Investigating the gap between research and practice" *Omega*, vol. 40, no. 6, pp. 722–737, 2012.
- [104] B. Michel *et al.*, "Int . J . Production Economics The green bullwhip effect , the diffusion of green supply chain practices , and institutional pressures : Evidence from the automotive sector" *Intern. J. Prod. Econ.*, vol. 182, pp. 342–355, 2016.
- [105] J. Rudolph and C. Emmelmann, "The 50th CIRP Conference on Manufacturing Systems A Cloud-based Platform for Automated Order Processing in Additive Manufacturing" *Procedia CIRP*, vol. 63, pp. 412–417, 2017.
- [106] M. A. Pour and S. Zanoni, "Impact of Merging Components by Additive Manufacturing in Spare Parts Management" *Procedia Manuf.*, vol. 11, no. June, pp. 610–618, 2017.
- [107] A. Márcio, T. Thomé, L. Felipe, S. R. I. Pires, and P. Ceryno, "Int . J . Production Economics A multi-tier study on supply chain flexibility in the automotive industry" *Intern. J. Prod. Econ.*, vol. 158, pp. 91–105, 2014.
- [108] H. G. H. Tiemessen, M. Fleischmann, G. J. Van Houtum, J. A. E. E. Van Nunen, and E. Pratsini, "Dynamic demand fulfillment in spare parts networks with multiple customer classes" *Eur. J. Oper. Res.*, vol. 228, no. 2, pp. 367–380, 2013.
- [109] D. Strong, M. Kay, B. Conner, T. Wake, and G. Manogharan, "Hybrid manufacturing – integrating traditional manufacturers with additive manufacturing (AM) supply chain" vol. 21, no. March, pp. 159–173, 2018.
- [110] E. Topan, Z. P. Bayındır, and T. Tan, "Heuristics for multi-item two-echelon spare parts inventory control subject to aggregate and individual service measures" *Eur. J. Oper. Res.*, vol. 256, no. 1, pp. 126–138, 2017.
- [111] Q. Hu, S. Chakhar, S. Siraj, and A. Labib, "Spare parts classification in industrial manufacturing using the dominance-based rough set approach" vol. 262, pp. 1136–1163, 2017.

- [112] E. Levner, Y. Perlman, T. C. E. Cheng, and I. Levner, "Int . J . Production Economics A network approach to modeling the multi-echelon spare-part inventory system with backorders and interval-valued demand" *Intern. J.F Prod. Econ.*, vol. 132, no. 1, pp. 43–51, 2011.
- [113] A. Grassi, A. Ferrara, A. Grassi, R. Emilia, R. Emilia, and V. Amendola, "Stochastic Methodology for the Optimal Optimal Management of Infrequent Demand Spare Management" *IFAC-PapersOnLine*, vol. 48, no. 3, pp. 1405–1410, 2015.
- [114] S. S. Padhi, R. K. Pati, and A. Rajeev, "Framework for selecting sustainable supply chain processes and industries using an integrated approach" *J. Clean.F Prod.*, vol. 184, pp. 969–984, 2018.
- [115] R. Al-aomar and M. Hussain, "An assessment of adopting lean techniques in the construct of hotel supply chain" *Tour. Manag.*, vol. 69, no. December 2015, pp. 553–565, 2018.
- [116] M. Eskandarpour, P. Dejax, and O. Péton, "Computers and Operations Research A large neighborhood search heuristic for supply chain network design" *Comput. Oper. Res.*, vol. 80, pp. 23–37, 2017.
- [117] M. Abdel-basset, G. Manogaran, and M. Mohamed, "Internet of Things (IoT) and its impact on supply chain : A framework for building smart , secure and efficient systems" *Futur. Gener. Comput. Syst.*, vol. 86, pp. 614–628, 2018.
- [118] F. Israel, F. Israel, and S. Catarina, "Spare Parts Supply Operational Supply Chain Planning Method for Spare Chains and Intelligent Maintenance Sys" *IFAC-PapersOnLine*, vol. 50, no. 1, pp. 12428–12433, 2017.
- [119] C. Bilir, S. Onsel, and F. Ulengin, "Computers & Industrial Engineering An integrated multi-objective supply chain network and competitive facility location model" *Comput. Ind. Eng.*, vol. 108, pp. 136–148, 2017.
- [120] J. Gao, Z. Xiao, B. Cao, and Q. Chai, "Green supply chain planning considering consumer ' s transportation process" *Transp. Res. Part E*, vol. 109, no. October 2017, pp. 311–330, 2018.
- [121] A. I. Pettersson and A. Segerstedt, "Int . J . Production Economics Measuring supply chain cost" *Intern. J. Prod. Econ.*, vol. 143, no. 2, pp. 357–363, 2013.
- [122] E. Özceylan, "Simultaneous optimization of closed- and open-loop supply chain networks with common components" *J. Manuf. Syst.*, vol. 41, pp. 143–156, 2016.
- [123] J. Blackhurst, M. J. Rungtusanatham, K. Scheibe, and S. Ambulkar, "Journal of Purchasing and Supply Management Supply chain vulnerability assessment : A network based visualization and clustering analysis approach" *J. Purch.F Supply Manag.*, vol. 24, no. 1, pp. 21–30, 2018.
- [124] M. Manzini *et al.*, "An integrated framework for design , management and operation of reconfigurable assembly systems" *Omega*, vol. 78, pp. 69–84, 2018.

- [125] J. Hong, A. Diabat, V. V Panicker, and S. Rajagopalan, "A two-stage supply chain problem with fixed costs: An ant colony optimization approach" *Int. J. Prod.F Econ.*, 2018.
- [126] C. Alzaman, Z. Zhang, and A. Diabat, "Supply chain network design with direct and indirect production costs : Hybrid gradient and local search based heuristics" *Intern. J. Prod. Econ.*, vol. 203, no. June, pp. 203–215, 2018.
- [127] A. A. Taleizadeh and R. Sadeghi, "Pricing strategies in the competitive reverse supply chains with traditional and e-channels : A game theoretic approach" *Intern. J. Prod. Econ.*, no. June 2016, pp. 1–13, 2018.
- [128] I. Giannoccaro, "Centralized vs . decentralized supply chains : The importance of decision maker ' s cognitive ability and resistance to change" *Ind. Mark.F Manag.*, no. December 2017, pp. 0–1, 2018.
- [129] B. Fahimnia, H. Davarzani, and A. Eshragh, "Planning of complex supply chains: A performance comparison of three meta-heuristic algorithms" *Comput. Oper. Res.*, vol. 89, pp. 241–252, 2018.
- [130] G. Karuna, M. Srinivasarao, and V. V. S. Kesavarao, "Supplier Selection and Order Allocation in Supply Chain" vol. 5, pp. 12161–12173, 2018.
- [131] S. Luthra and S. Kumar, "Evaluating challenges to Industry 4 . 0 initiatives for supply chain sustainability in emerging economies" *Process Saf. Environ.F Prot.*, vol. 117, pp. 168–179, 2018.
- [132] F. Jia, L. Zuluaga-cardona, A. Bailey, and X. Rueda, "Sustainable supply chain management in developing countries : An analysis of the literature" *J. Clean.F Prod.*, vol. 189, pp. 263–278, 2018.
- [133] B. Stefansdottir and M. Grunow, "Selecting new product designs and processing technologies under uncertainty : Two-stage stochastic model and application to a food supply chain" *Int. J. Prod. Econ.*, vol. 201, no. November 2016, pp. 89–101, 2018.
- [134] M. Sinayi and M. Rasti-barzoki, "A game theoretic approach for pricing , greening , and social welfare policies in a supply chain with government intervention" *J. Clean. Prod.*, vol. 196, pp. 1443–1458, 2018.
- [135] K. Pant, A. R. Singh, U. Pandey, and R. Purohit, "A Multi Echelon Mixed Integer Linear Programming Model of a Close Loop Supply Chain Network Design" *Mater. Today Proc.*, vol. 5, no. 2, pp. 4838–4846, 2018.
- [136] G. Büyüközkan and F. Göçer, "Computers in Industry Digital Supply Chain : Literature review and a proposed framework for future research" *Comput.F Ind.*, vol. 97, pp. 157–177, 2018.
- [137] T. Badiezadeh, R. Farzipoor, and T. Samavati, "Assessing sustainability of supply chains by double frontier network DEA : A big data approach" *Comput.F Oper. Res.*, vol. 98, pp. 284–290, 2018.
- [138] S. Rezapour, R. Zanjirani, and M. Pourakbar, "Resilient supply chain network design under competition : A case study" vol. 259, pp. 1017–1035, 2017.

- [139] I. J. P. Economics, B. Zeng, and B. P. Yen, "Rethinking the role of partnerships in global supply chains : A risk-based perspective" *Intern. J. Prod. Econ.*, vol. 185, no. December 2016, pp. 52–62, 2017.
- [140] T. Liebetruht, "Sustainability in performance measurement and management systems for supply chains" *Procedia Eng.*, vol. 192, pp. 539–544, 2017.
- [141] J. Kembro, N. Dag, and J. Olhager, "International Journal of Production Economics Information sharing across multiple supply chain tiers : A Delphi study on antecedents" vol. 193, no. June 2016, pp. 77–86, 2017.
- [142] Z. Basiri and J. Heydari, "A mathematical model for green supply chain coordination with substitutable products" *J. Clean. Prod.*, vol. 145, pp. 232–249, 2017.
- [143] T. Qu, D. X. Nie, C. D. Li, M. Thüerer, and G. Q. Huang, "Optimal configuration of assembly supply chains based on Hybrid augmented Lagrangian coordination in an industrial cluster" vol. 112, pp. 511–525, 2017.
- [144] Y. Fan, F. Schwartz, and S. Voß, "Flexible supply chain planning based on variable transportation modes" *Intern. J. Prod. Econ.*, vol. 183, pp. 654–666, 2017.
- [145] H. Carvalho, K. Govindan, S. G. Azevedo, and V. Cruz-machado, "Resources , Conservation and Recycling Modelling green and lean supply chains : An eco-efficiency perspective" *Resources, Conserv. Recycl.*, vol. 120, pp. 75–87, 2017.
- [146] L. Chen, X. Zhao, O. Tang, L. Price, S. Zhang, and W. Zhu, "Supply chain collaboration for sustainability: A literature review and future research agenda" *Int. J. Prod. Econ.*, vol. 194, no. March, pp. 73–87, 2017.
- [147] K. Puji, M. S. Carvalho, and L. Costa, "Green supply chain design: A mathematical modeling approach based on a multi-objective optimization model" *Intern. J. Prod. Econ.*, vol. 183, pp. 421–432, 2017.
- [148] R. J. Baumgartner, M. M. C. Fritz, and J. Sch, "Selected sustainability aspects for supply chain data exchange : Towards a supply chain-wide sustainability assessment" vol. 141, 2017.
- [149] H. Soleimani, K. Govindan, H. Saghafi, and H. Jafari, "Fuzzy multi-objective sustainable and green closed-loop supply chain network design" *Comput. Ind. Eng.*, vol. 109, pp. 191–203, 2017.
- [150] E. Özceylan, N. Demirel, C. Çetinkaya, and E. Demirel, "A closed-loop supply chain network design for automotive industry in Turkey" vol. 113, pp. 727–745, 2017.
- [151] F. F. Liu and Y. Liu, "A methodology to assess the supply chain performance based on gap-based measures" *Comput. Ind. Eng.*, vol. 110, pp. 550–559, 2017.
- [152] M. Merlino and I. Spro, "The Augmented Supply Chain" vol. 178, pp. 308–318, 2017.
- [153] C. Arampantzi and I. Minis, "A new model for designing sustainable supply chain networks and its application to a global manufacturer" *J. Clean. Prod.*, vol. 156, pp. 276–292, 2017.

- [154] Y. Qi, "The impact of operations and supply chain strategies on integration and performance" *Int J Prod. Econ.*, vol. 185, no. December 2015, pp. 162–174, 2017.
- [155] A. Rajeev, R. K. Pati, S. S. Padhi, and K. Govindan, "Evolution of sustainability in supply chain management : A literature review" *J. Clean. Prod.*, vol. 162, pp. 299–314, 2017.
- [156] D. Yue and F. You, "Stackelberg-game-based modeling and optimization for supply chain design and operations : A mixed integer bilevel programming framework" *Comput. Chem. Eng.*, vol. 102, pp. 81–95, 2017.
- [157] D. Bechtsis, N. Tsolakis, D. Vlachos, and E. Iakovou, "Sustainable supply chain management in the digitalisation era : The impact of Automated Guided Vehicles" *J. Clean. Prod.*, vol. 142, pp. 3970–3984, 2017.
- [158] O. Amirtaheri, M. Zandieh, B. Dorri, and A. R. Motameni, "A bi-level programming approach for production-distribution supply chain problem" *Comput. Ind. Eng.*, vol. 110, pp. 527–537, 2017.
- [159] J. Brito, R. Silva, J. Arnaldo, and B. Montevechi, "Simulation Modelling Practice and Theory Perspectives and relationships in Supply Chain Simulation : A systematic literature review" vol. 62, pp. 166–191, 2016.
- [160] Q. Dong and O. Cooper, "An orders-of-magnitude AHP supply chain risk assessment framework" *Intern. J. Prod. Econ.*, vol. 182, pp. 144–156, 2016.
- [161] M. Bogers, R. Hadar, and A. Bilberg, "Additive manufacturing for consumer-centric business models : Implications for supply chains in consumer goods manufacturing" *Technol. Forecast. Soc. Chang.*, vol. 102, pp. 225–239, 2016.
- [162] Y. Boulaksil, "Safety stock placement in supply chains with demand forecast updates" *Oper. Res. Perspect.*, vol. 3, pp. 27–31, 2016.
- [163] F. Jia, X. Wang, N. Mustafee, and L. Hao, "Investigating the feasibility of supply chain-centric business models in 3D chocolate printing : A simulation study" *Technol. Forecast. Soc. Chang.*, vol. 102, pp. 202–213, 2016.
- [164] J. Fischer, A. Márcio, T. Thomé, L. Felipe, B. Hellingrath, and R. Martins, "Development and application of a maturity measurement framework for supply chain flexibility" *Procedia CIRP*, vol. 41, pp. 514–519, 2016.
- [165] A. Shakourloo, A. Kazemi, M. Oroojeni, and M. Javad, "A new model for more effective supplier selection and remanufacturing process in a closed-loop supply chain" vol. 40, pp. 9914–9931, 2016.
- [166] M. Giannakis and T. Papadopoulos, "Supply chain sustainability : A risk management approach" *Intern. J. Prod. Econ.*, vol. 171, pp. 455–470, 2016.
- [167] B. Baud-lavigne, B. Agard, and B. Penz, "Simultaneous product family and supply chain design : An optimization approach" *Intern. J. Prod. Econ.*, vol. 174, pp. 111–118, 2016.
- [168] B. Fahimnia, J. Sarkis, and A. Eshragh, "A tradeoff model for green supply chain planning : A leanness-versus-greenness analysis" *Omega*, vol. 54, pp. 173–190, 2015.

- [169] H. Nikfarjam, M. Rostamy-malkhalifeh, and S. Mamizadeh-chatghayeh, "Measuring supply chain efficiency based on a hybrid approach" *Transp. Res.F Part D*, vol. 39, pp. 141–150, 2015.
- [170] E. Claypool, B. A. Norman, and K. Lascola, "Modeling risk in a Design for Supply Chain problem" *Comput. Ind. Eng.*, vol. 78, pp. 44–54, 2014.
- [171] J. A. Palma-mendoza, "Analytical hierarchy process and SCOR model to support supply chain re-design" *Int. J. Inf. Manage.*, vol. 34, no. 5, pp. 634–638, 2014.
- [172] A. A. Akdogan and O. Demirtas, "Managerial Role in Strategic Supply Chain Management" *Procedia - Soc. Behav. Sci.*, vol. 150, pp. 1020–1029, 2014.
- [173] R. Mastragostino, S. Patel, and C. L. E. Swartz, "Robust decision making for hybrid process supply chain systems via model predictive control" *Comput.F Chem. Eng.*, vol. 62, pp. 37–55, 2014.
- [174] S. Liao and F. Kuo, "The study of relationships between the collaboration for supply chain , supply chain capabilities and firm performance : A case of the Taiwan ' s TFT-LCD industry" *Intern. J. Prod. Econ.*, vol. 156, pp. 295–304, 2014.
- [175] I. P. Vlachos, "A hierarchical model of the impact of RFID practices on retail supply chain performance" *Expert Syst. Appl.*, vol. 41, no. 1, pp. 5–15, 2014.
- [176] P. Pawlewski, "Multimodal Approach to Model and Design Supply Chain" vol. 46, no. 9. *IFAC*, 2013.
- [177] J. Mula, D. Peidro, M. Díaz-madroñero, and E. Vicens, "Mathematical programming models for supply chain production and transport planning" *Eur. J. Oper. Res.*, vol. 204, no. 3, pp. 377–390, 2010.
- [178] H. Min and G. Zhou, "Supply chain modeling : past , present and future" vol. 43, pp. 231–249, 2002.
- [179] H. Hishamuddin, R. Sarker, and D. Essam, "A Simulation Model of a Three Echelon Supply Chain System" *IFAC-PapersOnLine*, vol. 48, no. 3, pp. 2036–2040, 2015.
- [180] S. Sebbah, A. Ghanmi, and A. Boukhtouta, "A column-and-cut generation algorithm for planning of Canadian armed forces tactical logistics distribution" *Comput. Oper. Res.*, vol. 40, no. 12, pp. 3069–3079, 2013.
- [181] R. Kleber, S. Minner, and G. Kiesm, "A continuous time inventory model for a product recovery system with multiple options" vol. 79, pp. 121–141, 2002.
- [182] A. R. Somarin, S. Chen, S. Asian, and D. Z. W. Wang, "A heuristic stock allocation rule for repairable service parts" *Intern. J. Prod. Econ.*, vol. 184, no. November 2016, pp. 131–140, 2017.
- [183] S. H. Amin and G. Zhang, "A multi-objective facility location model for closed-loop supply chain network under uncertain demand and return" *Appl. Math.F Model.*, vol. 37, no. 6, pp. 4165–4176, 2013.

- [184] E. Morosini, E. Israel, A. Albrecht, C. Eduardo, and B. Hellingrath, "Annual Reviews in Control Spare parts supply chains ' operational planning using technical condition information from intelligent maintenance systems" *Annu.F Rev. Control*, vol. 38, no. 1, pp. 147–154, 2014.
- [185] F. Andres, "Optimal Production-Inventory for a Closed Loop Supply Chain" *IFAC-PapersOnLine*, vol. 50, no. 1, pp. 4987–4993, 2017.
- [186] L. Tiacci and S. S. Ã, "Reducing the mean supply delay of spare parts using lateral transshipments policies" *Intern. J. Prod. Econ.*, vol. 133, no. 1, pp. 182–191, 2011.
- [187] E. Koca and E. A. Yıldırım, "A hierarchical solution approach for a multicommodity distribution problem under a special cost structure " *Comput. Oper. Res.*, vol. 39, no. 11, pp. 2612–2624, 2012.
- [188] E. Kutanoglu and D. Lohiya, "Integrated inventory and transportation mode selection : A service parts logistics system" vol. 44, pp. 665–683, 2008.
- [189] R. Augustsson and D. Becevic, "Implementing Additive Manufacturing for Spare Parts in the Automotive Industry A case study of the use of additive manufacturing for spare parts" 2015.
- [190] W. Wang and S. Yue, "An inventory pooling model for spare units of critical systems that serve multi-companies" *Transp. Res. Part E*, vol. 76, pp. 34–44, 2015.
- [191] Q. Hu, J. E. Boylan, H. Chen, and A. Labib, "OR in spare parts management : A review" *Eur. J. Oper. Res.*, vol. 266, no. 2, pp. 395–414, 2018.
- [192] P. Sharma, M. S. Kulkarni, and V. Yadav, "A simulation based optimization approach for spare parts forecasting and selective maintenance" *Reliab. Eng.F Syst. Saf.*, vol. 168, no. May, pp. 274–289, 2017.
- [193] H. Ashfari, M. Sharifi, T. Y. Elmekawy, and Q. Peng, "Facility Location Decisions Within Integrated Forward / Reverse Logistics under Uncertainty" *Procedia CIRP*, vol. 17, pp. 606–610, 2014.
- [194] P. K. Chemweno *et al.*, "Evaluating the Impact of Spare Parts Pooling Strategy on the Maintenance of Unreliable Repairable Systems" *IFAC-PapersOnLine*, vol. 48, no. 3, pp. 989–994, 2015.
- [195] M. A. Seitz, "A critical assessment of motives for product recovery : the case of engine remanufacturing" vol. 15, pp. 1147–1157, 2007.
- [196] R. Subramoniam, D. Huisingh, and R. Babu, "Remanufacturing for the automotive aftermarket-strategic factors: literature review and future research needs" *J. Clean. Prod.*, vol. 17, no. 13, pp. 1163–1174, 2009.
- [197] J. V. L. Silva and R. A. Rezende, "Additive Manufacturing and its future impact in logistics" vol. 46, no. 24. *IFAC*, 2013.
- [198] V. Zanetti, S. Cavalieri, and G. Pezzotta, "Manufacturing and PSS : a Solution Life-Cycle Perspective" *IFAC-PapersOnLine*, vol. 49, no. 12, pp. 1573–1578, 2016.

- [199] M. Zanardini, A. Bacchetti, S. Zanoni, and M. Ashourpour, "Additive Manufacturing applications in the domain of Product Service System : an empirical overview" *Procedia CIRP*, vol. 47, pp. 543–548, 2016.
- [200] R. Jiang, R. Kleer, and F. T. Piller, "Predicting the future of additive manufacturing : A Delphi study on economic and societal implications of 3D printing for 2030" *Technol. Forecast. Soc. Chang.*, vol. 117, pp. 84–97, 2017.
- [201] U. Dombrowski and C. Malorny, "Service planning as support process for a Lean After Sales Service" *Procedia CIRP*, vol. 64, pp. 324–329, 2017.
- [202] G. Liotta, A. Chaudhuri, and J. Holmstr, "Sustainability outcomes through direct digital manufacturing-based operational practices : A design theory approach" vol. 167, pp. 951–961, 2017.
- [203] M. Braglia and M. Frosolini, "Virtual pooled inventories for equipment-intensive industries . An implementation in a paper district" *Reliab. Eng. Syst.F Saf.*, vol. 112, pp. 26–37, 2013.
- [204] "Automotive spare part business." [Online]. Available: <https://www.gitacloud.com/blog/2016/10/11/automotive-spare-parts-business-business-challenges-and-supply-chain-excellence-strategies>. [Accessed: 27-Sep-2018].
- [205] H. A. Taha, "Integer Programming Optimization and its application" vol. 32, no. 4. Academic Press, INC., 1975.
- [206] R. Gen, Mitsuo; Cheng, "Genetic Algorithms and Engineering Optimization" John Wiley & Sons, 2000.
- [207] Z. Michalewicz, "Genetic algorithms + data structures = evolution programs" 1997.
- [208] S. Man, K., Tang, S., Kwong, "Genetic Algorithms" Springer, 1999.
- [209] F. Gentile *et al.*, "Direct imaging of DNA fibers: The visage of double helix" *Nano Lett.*, vol. 12, no. 12, pp. 6453–6458, 2012.
- [210] J. W. Szostak, T. L. Orr-Weaver, R. J. Rothstein, and F. W. Stahl, "The double-strand-break repair model for recombination cell" vol. 33, no. 1, pp. 25–35, 1983.
- [211] J. H. Holland, "Adaptation in Natural and Artificial Systems" 1992.
- [212] D. A. Coley, "An Introduction to Genetic Algorithms for Scientists and Engineers" *An Introd. to Genet. Algorithms Sci. Eng.*, 1999.
- [213] "Genetic Algorithms - Survivor Selection." [Online]. Available: https://www.tutorialspoint.com/genetic_algorithms/genetic_algorithms_survivor_selection.htm. [Accessed: 26-Apr-2020].
- [214] D. E. Goldberg, "Genetic Algorithms in Search, Optimizastion, and Machine Learning" 1989.

- [215] B. Gülsün, Tuzkaya Gülfem, and E. Bildik, "Reverse Logistics Network Design A Simulated Annealing Approach" *J. Eng. Nat. Sci. Mühendislik ve Fen Bilim.F Derg.*, vol. 26, no. 1, pp. 68–80, 2008.
- [216] G. Algoritmalar, "Optimizasyon Problemlerinin Çözümü için Parçaçık Sürü Optimizasyonu Algoritması" *Politek. Derg.*, vol. 11, no. 4, pp. 299–305, 2008.

TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR

İletişim Bilgisi: sinansahin@post.com

Makaleler

1. U. R. Tuzkaya and S. Sahin, "A Single Side Priority Based GA Approach for 3D Printing Center Integration to Spare Part Supply Chain in Automotive Industry" *Teh. Vjesn.*, vol. 28, no. No.3, 2021.

Konferans Bildirileri

1. U. R. Tuzkaya and S. Sahin, "Otomotiv Sektöründe Yedek Parça Dağıtım Sistemi Tasarımı" *8. Ulusal Lojistik ve Tedarik Zinciri Kongresi*, 2019, pp. 177–189.